

Determinación de los módulos dinámicos y capacidad portante de los suelos a partir de velocidades sísmicas tipo P y S en depósitos superficiales usando refracción sísmica y MASW.

Karen Tatiana Duarte Galvis

Director

Manuel Antonio Contreras Martínez

Ingeniero Civil

Msc. En Ingeniería Civil

Co. Director

Jairo Alberto Torres Peña

Físico

Universidad de Pamplona

Facultad de Ingeniería y Arquitectura

Departamento de Ingeniería Ambiental, Civil y Química

Programa Ingeniería Civil

Pamplona

2024

Determinación de los módulos dinámicos y capacidad portante de los suelos a partir de velocidades sísmicas tipo P y S en depósitos superficiales usando refracción sísmica y MASW.

Karen Tatiana Duarte Galvis

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Civil

Director

Manuel Antonio Contreras Martínez

Ingeniero Civil

Msc. En Ingeniería Civil

Co. Director

Jairo Alberto Torres Peña

Físico

Universidad de Pamplona

Facultad de Ingeniería y Arquitectura

Departamento de Ingeniería Ambiental, Civil y Química

Programa Ingeniería Civil

Pamplona

2024

Dedicatoria

En primer lugar, expreso mi más profundo agradecimiento a Dios por brindarme la fuerza, la orientación y la determinación necesarias para alcanzar esta meta significativa en mi trayectoria académica. Su amor incondicional y su gracia han sido mi roca inquebrantable en cada etapa de este camino.

A mi padre, Oscar Celio Duarte Pérez, quien ahora descansa en el cielo, dedico este logro con un sentido de gratitud y amor eterno. Tus enseñanzas, valores y el ejemplo de tu vida continúan guiándome y motivándome cada día. Aunque físicamente ya no estés presente, tu espíritu perdura en cada logro y en cada paso que doy.

A mis seres queridos, amigos y familiares, especialmente a mi hermana Leidy Yohanna Duarte Galvis, cuyo apoyo inquebrantable ha sido mi mayor fortaleza. Sus palabras de aliento y amor han sido un bálsamo en los momentos de desafío y alegría.

A mis profesores, mentores y todos aquellos que han contribuido a mi formación académica, les agradezco sinceramente por su dedicación y sabiduría, que han sido fundamentales en mi desarrollo personal y profesional.

Este logro es el resultado del amor, la dedicación y el apoyo incondicional de cada una de estas personas. A todos ustedes, les dedico este éxito con profunda gratitud y dedicación.

Agradecimientos

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a todas las personas que han sido parte fundamental de mi vida, por sus buenos deseos y su inquebrantable disposición.

A Dimanto Ingeniería S.A.S., mi sincero agradecimiento por brindarme la oportunidad de llevar a cabo esta investigación titulada "Determinación de los módulos dinámicos y capacidad portante de los suelos a partir de velocidades sísmicas tipo P y S en depósitos superficiales usando refracción sísmica y MASW", y por permitirme contar con sus valiosos equipos, los cuales fueron fundamentales para el desarrollo de este trabajo.

También deseo expresar mi gratitud y reconocimiento al MSc. Ing. Manuel Antonio Contreras Martínez y al Co-Director Jairo Alberto Torres Peña, por su profundo conocimiento y por ser mis guías durante todo el proceso de esta investigación.

Asimismo, agradezco enormemente al Ing. Fabricio Rojas y al Ing. Dean Andersson Montañez Torres por su invaluable ayuda y asesoría en la toma de datos en campo, contribuyendo así al éxito y desarrollo óptimo de este proyecto.

Tabla de Contenido

	Pág
INTRODUCCIÓN	16
Planteamiento del problema.....	17
Desarrollo de antecedentes	17
Propósito	18
Fundamentación.....	18
Justificación	18
OBJETIVOS	20
Objetivo General.....	20
Objetivos Específicos.....	20
MARCO REFERENCIAL.....	21
Marco de antecedentes o estado del arte.....	21
Marco teórico	26
Generalidades de los métodos sísmicos	26
Ondas sísmicas.....	26
Método de Refracción Sísmica (RS).....	26
Principio de Huygens.....	27
Principio de Fermat.....	28
Ley de refracción (o de Snell).....	29
MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves).....	31
Norma NSR10.....	33

Estimación de los parámetros elásticos en función de la velocidad de onda tipo P y S	35
Equipos empleados	39
Marco Legal	40
Marco Contextual.....	42
Marco geológico de la zona de estudio.....	42
Localización de la zona de estudio	44
METODOLOGÍA	46
Objetivo 1.....	47
Propagación de ondas sísmicas:.....	47
Refracción sísmica:.....	47
Análisis de ondas superficiales:	47
Métodos geofísicos no invasivos:	47
Aplicaciones en ingeniería civil:.....	48
Determinación y manejo de equipos.....	48
Objetivo 2. Adquisición de datos sísmicos	49
Objetivo 3. Procesamiento de datos sísmico.....	57
Procesamiento de datos para Refracción sísmica	58
Procesamiento de método de análisis multicanal para ondas superficiales (MASW)	62
Objetivo 4 y 5. Módulos dinámicos y capacidad portante de los suelos	65
RESULTADOS.....	70
CONCLUSIONES	74

RECOMENDACIONES.....	76
REFERENCIAS.....	77

Lista de Tablas

Tabla 1. Correlaciones de valores de velocidades para onda P y S para diferentes tipos de material.	32
Tabla 2. <i>Clasificación</i> de los perfiles de suelo considerando los valores de velocidad de onda de corte promedio a 30 metros.....	33
Tabla 3. Correlación del módulo de Young a diferentes tipos de material.....	38
Tabla 4. Correlación del módulo de Poisson a diferentes tipos de material.	39
Tabla 6. Características del perfil sísmico. Coordenadas geográficas en formato MAGNA-SIRGAS (EPSG: 3116).....	51

Lista de Figuras

Figura 1. Principio de Huygens	28
Figura 2. Esquema de tomografía.	28
Figura 3. Conversión de una onda incidente P.	30
Figura 4. GEA24 y accesorios para el método sísmico.	40
Figura 5. Geología de zona en estudio.....	43
Figura 6. Localización a zona de estudio.....	45
Figura 7. Cronograma y descripción de actividades.....	46
Figura 8. Certificación curso Phyton aplicado a la mecánica de suelos	48
Figura 9. Zona de estudio definida	49
Figura 10. presencia de nivel freático superficial en la zona.....	50
Figura 11. Extensión del decámetro y cables para la toma de las líneas sísmicas.....	53
Figura 12. Ubicación de la consola GEA24 en la TRE 01.	54
Figura 13. Conexión de los geófonos al cable para las 4 líneas para ensayo de refracción sísmica y MASW.	55
Figura 14. Punto de impacto para la primera línea.	56
Figura 15. Módulos de SeisImager utilizados para refracción sísmica y MASW	57
Figura 16. Picado de los primeros arribos de las ondas refractadas críticamente.....	59
Figura 17. Primeros arribos de las ondas refractadas críticamente para cada una de las líneas de resistividad sísmica tiempo vs distancia.	60
Figura 18. Modelo preliminar de la velocidad de onda P sobre las líneas de resistividad sísmicas.	61

Figura 19. Tomografías sísmicas de refracción mediante una inversión por mínimos cuadrados.	61
Figura 20. Datos transformados en el dominio de velocidad de fase vs frecuencia aplicando posteriormente a la transformada de Fourier rápido.	63
Figura 21. Curva de dispersión para el modo fundamental (línea roja continua) y la relación señal ruido del dato (línea roja a trazos).	64
Figura 22. Resultado de la inversión de las curvas de dispersión.....	65
Figura 23. Módulos dinámicos de línea LRS 01.....	67
Figura 24. Módulos dinámicos de línea LRS 02.....	67
Figura 25. Módulos dinámicos de línea LRS 03.....	68
Figura 26. Módulos dinámicos de línea LRS 03.....	68
Figura 27. Cambios en profundidad de los parámetros elásticos calculados.....	69
Figura 28. Modelo inicial de tres (3) capas para la tomografía de refracción sísmica en el perfil 01.....	71
Figura 29. Modelo final del subsuelo aplicando el método de tomografía sísmica.....	72
Figura 30. Clasificación del tipo de suelo a partir de la velocidad de onda S en la abscisa X=23m. Para cada una de las líneas.....	73

Lista de Apéndices

Apéndice 1. evidencia toma de datos para las 4 líneas de refracción sísmica y MASW.....	79
Apéndice 2. evidencia toma de datos para las 4 líneas de refracción sísmica y MASW.....	80
Apéndice 3. evidencia toma de datos para las 4 líneas de refracción sísmica y MASW.....	81
Apéndice 4. evidencia toma de datos para las 4 líneas de refracción sísmica y MASW.....	82
Apéndice 5. Mi contribución en esta tesis consistió en desarrollar un programa en Python que permite calcular los módulos dinámicos y la capacidad portante de los suelos de manera rápida y efectiva. Las ventajas de este programa incluyen:.....	83
Apéndice 6. Ejecución del programa	94
Apéndice 7. Determinación de los módulos dinámicos y capacidad portante.....	95

Glosario

Arenas Saturadas: Son suelos compuestos principalmente por partículas de arena saturadas de agua. Tienen una resistencia al corte y una capacidad portante influenciadas por el contenido de agua.

Capacidad Portante: Es la capacidad de un suelo para soportar cargas sin sufrir deformaciones excesivas o fallos. Se expresa típicamente en unidades de presión (kN/m^2 o kPa).

Comportamiento Sísmico: Es la respuesta de una estructura o un suelo a las fuerzas y deformaciones generadas por un terremoto. Incluye aspectos como la resistencia, la rigidez, la capacidad portante y la disipación de energía.

Consolidación: Es el proceso mediante el cual los suelos pierden agua y se compactan bajo cargas aplicadas, lo que resulta en un aumento de la densidad y la resistencia del suelo.

Depósitos Superficiales: Son capas de suelo no consolidado que se encuentran cerca de la superficie terrestre y que pueden tener un espesor significativo. Se forman por procesos geológicos como la deposición fluvial, eólica o glacial.

Grava: Es un tipo de suelo compuesto principalmente por partículas de roca de tamaño medio a grande. Se clasifica como un suelo granular y se utiliza comúnmente como material de construcción.

Microtremor Array Surface Wave (MASW): Es una técnica geofísica que utiliza la energía de los microtemores ambientales para caracterizar las propiedades del subsuelo. Se basa en el análisis de las ondas superficiales generadas por estos microtemores.

Módulo Dinámico (G): Es una medida de la rigidez del suelo bajo cargas dinámicas, como las generadas por un sismo. Se expresa en unidades de fuerza por unidad de área (N/m^2 o MPa).

Ondas de Superficie: Son ondas sísmicas que se propagan a lo largo de la superficie terrestre en lugar de a través del interior del suelo. Incluyen ondas Rayleigh y Love.

Refracción Sísmica: Es una técnica geofísica que utiliza la refracción de ondas sísmicas para caracterizar las capas subsuperficiales del suelo. Se basa en la medición de los tiempos de llegada de las ondas sísmicas refractadas en diferentes interfaces geológicas.

Rigidez Dinámica: Es la capacidad de un suelo para resistir deformaciones bajo cargas dinámicas, como las generadas por un terremoto. Se expresa como el módulo dinámico (G).

Resumen

La investigación se centró en la determinación de los módulos dinámicos y la capacidad portante de los suelos en depósitos superficiales mediante el uso de la refracción sísmica y el MASW. La refracción sísmica permitió calcular las velocidades de propagación de las ondas P y S en el subsuelo, mientras que el MASW analizó las ondas superficiales para obtener perfiles de velocidad de onda de corte.

El estudio se llevó a cabo en una zona específica de Giron, Santander, donde se diseñaron cuatro líneas de 46 metros cada una en un terreno único, para establecer la disposición de los geófonos y la fuente. Luego de diseñar las líneas sísmicas y adquirir los datos, se procesaron utilizando el software SeisImager de la empresa Geometrics, lo que resultó en perfiles 1D y 2D de la zona.

Los datos obtenidos se emplearon para determinar diversos parámetros geotécnicos, como el módulo de Young, el módulo de Poisson y la densidad del terreno, entre otros. Este enfoque proporciona una herramienta efectiva para evaluar los riesgos sísmicos y diseñar estructuras en áreas con depósitos superficiales, como el municipio de Girón.

A través de los perfiles obtenidos de las ondas P y S, fue posible estimar el número de capas, sus espesores y los tipos de material presentes en el subsuelo, junto con sus respectivas velocidades. Además, se determinaron parámetros adicionales del subsuelo, como la capacidad portante, el módulo de Poisson, el módulo de rigidez y la densidad. Estos datos proporcionaron una respuesta valiosa para entender las características del suelo en la zona de estudio.

Palabras claves: refracción sísmica, capacidad portante, MASW, geofísica.

Abstrac

The research focused on determining the dynamic moduli and bearing capacity of soils in superficial deposits using seismic refraction and MASW methods. Seismic refraction allowed for the calculation of the propagation velocities of P and S waves in the subsurface, while MASW analyzed surface waves to obtain shear wave velocity profiles.

The study was conducted in a specific area of Girón, Santander, where four lines of 46 meters each were designed in a single terrain to establish the arrangement of geophones and the source. After designing the seismic lines and acquiring the data, they were processed using Geometrics' SeisImager software, resulting in 1D and 2D profiles of the area.

The obtained data were used to determine various geotechnical parameters, such as Young's modulus, Poisson's ratio, and soil density, among others. This approach provides an effective tool for evaluating seismic risks and designing structures in areas with superficial deposits, such as the municipality of Girón.

Through the profiles obtained from the P and S waves, it was possible to estimate the number of layers, their thicknesses, and the types of material present in the subsurface, along with their respective velocities. Additionally, additional subsurface parameters, such as bearing capacity, Poisson's modulus, stiffness modulus, and density, were determined. These data provided valuable insights into soil characteristics in the study area.

Keywords: seismic refraction, bearing capacity, MASW, geophysics.

Introducción

La dinámica de los suelos es de gran relevancia en la ingeniería civil, especialmente en regiones propensas a fenómenos sísmicos. Considerando la necesidad imperativa de que las construcciones cumplan con estándares resistentes a los terremotos y minimicen el riesgo de pérdidas humanas, como lo estipula el Reglamento Colombiano de Construcciones Sismo Resistentes (NSR10, 2010.), comprender el comportamiento del suelo se vuelve primordial. La comprensión de la respuesta del suelo a la actividad sísmica requiere la realización de pruebas para proporcionar parámetros utilizables en diversas disciplinas de ingeniería, facilitando la construcción de estructuras cada vez más seguras mientras se minimizan los riesgos para la vida humana y la propiedad.

Las pruebas triaxiales son uno de los métodos más confiables para determinar los parámetros dinámicos del suelo, siendo la resistencia al corte particularmente significativo. Regulado por normas como UNE-EN ISO 17892-8:2019, UNE-EN ISO 17892-9:2019, ASTM D-4767 y ASTM D-2850, este ensayo permite variar las presiones en tres direcciones ortogonales sobre el espécimen de suelo, lo que permite mediciones completas de sus características mecánicas. Sin embargo, el acceso a tales pruebas suele estar restringido por el costo, y solo ofrecen información sobre las propiedades dinámicas del suelo en el lugar desde el que se extrajo la muestra, a menudo requiriendo los servicios de laboratorios certificados.

Existen métodos alternativos para capturar las propiedades dinámicas del suelo dentro de la geofísica, la ciencia que estudia las propiedades y fenómenos físicos de la estructura de la Tierra. La geofísica aplicada abarca técnicas para determinar y estudiar parámetros físicos y/o

fisicoquímicos del suelo sin perturbar el terreno, lo que la convierte en un complemento ideal para otros ensayos geotécnicos in situ.

Este documento tiene como objetivo determinar los parámetros dinámicos más relevantes del suelo mediante cuatro líneas de tomografía de refracción sísmica y MASW. Busca resaltar contrastes en las velocidades sísmicas P y S en el área de estudio y posteriormente evaluar las velocidades de onda utilizando ecuaciones propuestas por Tezcan et al. (2009), desarrolladas sobre la base de la teoría de elasticidad y corroboradas mediante resultados geotécnicos de 373 muestras de suelo en varios sitios de construcción.

Planteamiento del problema

El planteamiento del problema se centra en la optimización de la exploración sísmica en la ingeniería civil. Se busca mejorar la precisión, reducir costos y tiempos, explorar tecnologías avanzadas, abordar el impacto ambiental y enfrentar desafíos geotécnicos específicos. Este enfoque impulsa la investigación y el desarrollo de soluciones para mejorar la eficiencia y la efectividad de esta técnica en proyectos de ingeniería civil.

Desarrollo de antecedentes

La comprensión de la dinámica de los suelos ha sido fundamental en la ingeniería civil a lo largo del tiempo. Desde los primeros estudios sobre la respuesta de los suelos a los movimientos sísmicos hasta los avances tecnológicos actuales, se ha buscado mejorar la precisión en la caracterización del subsuelo. Las técnicas de exploración sísmica, como la refracción sísmica y el MASW, han surgido como herramientas poderosas en este campo, permitiendo la determinación de parámetros geotécnicos con mayor eficiencia y precisión.

Propósito

El propósito de esta investigación es llevar a cabo un estudio exhaustivo para determinar los parámetros dinámicos del suelo en la zona de estudio, utilizando técnicas de refracción sísmica y MASW. Este estudio tiene como objetivo contribuir al conocimiento científico en el campo de la ingeniería civil, proporcionando datos relevantes que puedan utilizarse para mejorar la seguridad estructural, la planificación urbana y la mitigación de riesgos sísmicos en la región.

Fundamentación

La fundamentación de esta investigación radica en la importancia de comprender los parámetros dinámicos del suelo para garantizar la seguridad de las estructuras frente a eventos sísmicos. La elección de las técnicas de refracción sísmica y MASW se basa en su capacidad para proporcionar datos precisos y detallados sobre las propiedades del suelo de manera no invasiva. Estas técnicas han demostrado ser efectivas en una variedad de entornos geológicos y pueden ofrecer información valiosa para la toma de decisiones en ingeniería civil y gestión de riesgos naturales.

Justificación

Esta investigación logró determinar los módulos dinámicos y la capacidad portante de los suelos en depósitos superficiales de una zona de estudio ubicada en el municipio de Girón, Santander. Esto se llevó a cabo mediante la utilización de velocidades sísmicas tipo P y S, empleando técnicas de refracción sísmica y MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves).

Los ensayos sísmicos se basan en la transmisión de ondas elásticas y superficiales, las cuales pueden ser generadas de forma natural o inducidas. Esta particularidad los hace más ventajosos

en comparación con el estudio de suelos, el cual presenta limitaciones al caracterizar el subsuelo debido a su enfoque en áreas restringidas y a la necesidad de realizar perforaciones, lo que resulta en costos adicionales y perturbaciones medioambientales.

La identificación de las ondas de velocidad P y S, así como de los módulos dinámicos y mecánicos que determinan la rigidez, la capacidad portante del subsuelo, el módulo de Young, el módulo de Poisson y la densidad en la zona de estudio en Girón, ofrece una ventaja significativa para los propietarios del sector analizado. En caso de que decidan utilizar el terreno para propósitos estructurales en el futuro, esto podría resultar en una reducción de costos considerable.

Objetivos

Objetivo General

Analizar y determinar los módulos dinámicos y capacidad portante admisibles y última de los suelos en depósitos superficiales aplicando métodos de tomografía de refracción sísmica y análisis multicanal de ondas superficiales.

Objetivos Específicos

Entender los fundamentos fisicomatemáticos para los métodos de tomografía de refracción sísmica y MASW con el fin de aplicarlos en un levantamiento sísmico.

Adquirir datos geofísicos mediante métodos de tomografía de refracción sísmica y MASW con el fin de evidenciar contrastes de las velocidades sísmicas P y S en una zona de interés.

Procesar los datos geofísicos con el fin de obtener perfiles de velocidad sísmica tipo P y S en una y dos dimensiones.

Determinar los módulos dinámicos (ρ , G, E, μ , K) a partir de las velocidades sísmicas para la zona de interés.

Realizar el análisis sobre las variables dinámicas calculadas para determinar la capacidad portante de los suelos.

Marco Referencial

Marco de antecedentes o estado del arte

Schulze (1943) puso de relieve la superioridad de los métodos geofísicos sobre los métodos geotécnicos tradicionales, al utilizar técnicas de medición de la velocidad de las ondas sísmicas que no alteran las condiciones naturales del sitio.

Coates (1970) se centró en el uso de las velocidades de la onda P para determinar las resistencias a la compresión libre y el módulo de elasticidad de las muestras de suelo, proporcionando así una herramienta valiosa para la evaluación de la seguridad sísmica de las construcciones. Por otro lado, **Hardin y Black (1968)**, junto con **Hardin y Drnevich (1972)**, establecieron relaciones fundamentales entre la velocidad de la onda de corte, la relación de vacíos y la rigidez al corte de los suelos, basándose en extensos datos experimentales.

Ohkubo y Terasaki (1976) determinaron varios parámetros del suelo mediante procesamiento de señales digitales, mientras que **Campanella y Stewart (1992)** proporcionaron técnicas prácticas de geofísica para evaluar la rigidez del suelo, contribuyendo así al desarrollo de métodos más eficaces para la evaluación de la seguridad sísmica.

Abd El-Rahman et al. (1992) propusieron una expresión empírica para la capacidad de carga última de los suelos, utilizando el logaritmo de la velocidad de la onda de corte, lo que representa un avance significativo en la predicción de la capacidad de carga de las estructuras en suelos sísmicamente activos. **Turker (2004)** proporcionó una expresión explícita para la presión de apoyo permitida, basándose en estudios de casos y directrices preparadas por el Comité Técnico TC 16 del ISSMGE (IRTP 1999), así como por **Sieffert y BayGress (2000)**.

Massarsch (2004) determinó las propiedades de deformación de suelos de grano fino a partir de pruebas sísmicas, lo que contribuyó al desarrollo de métodos más precisos para la evaluación de la seguridad sísmica de las construcciones. **Tezcan et al. (2006)** introdujeron mejoras en la formulación teórica y proporcionaron numerosos casos prácticos para validar el método propuesto.

Finalmente, **Stokoe y Woods (1972)**, **Tezcan et al. (1975)** y **Butcher et al. (2005)** destacaron la importancia de la velocidad de la onda de corte medida in situ como un índice confiable para la evaluación de las condiciones reales del suelo, lo que representa un avance significativo en la práctica de la ingeniería civil en zonas sísmicas. Estos avances han permitido a los ingenieros determinar la capacidad de carga permitida de manera más conveniente, económica y confiable, contribuyendo así a la seguridad y estabilidad de las construcciones en suelos sísmicamente activos.

A continuación, se presentan algunos trabajos de grado a nivel nacional que han contribuido al conocimiento de la investigación de esta tesis:

Esta monografía se realizó para obtener el título como Ingeniero Civil donde se destaca la importancia de las propiedades dinámicas del suelo en Ocaña. Se realizaron ensayos geofísicos, como Refracción Sísmica y Análisis Multicanal de Ondas Superficiales, para medir y calcular las propiedades, ya que eran desconocidas en la zona. Los resultados indican que Ocaña mayormente tiene suelos sedimentarios, específicamente materiales areno-arcillosos y arcillo-limosos de alta plasticidad. Los valores promedio de propiedades dinámicas, como módulo de rigidez y elasticidad, son cruciales para proyectos de ingeniería y construcción futuros en la ciudad(**Martinez-Ovallos et al., 2018**).

Este trabajo para obtener el título de Ingeniero Civil se centra en el estudio de una ladera cercana al barrio Juan XXIII en Pamplona, una zona sísmica y montañosa. Se utiliza un enfoque que combina herramientas de geofísica y geotecnia para estratificar el suelo. Mediante técnicas como refracción sísmica y análisis multicanal de ondas superficiales (MASW), se determinan las velocidades de las ondas P y S, lo que permite identificar capas, espesores y parámetros dinámicos del suelo. Se emplea también la tomografía de resistividad eléctrica y ensayos SPT para recopilar datos sobre el comportamiento eléctrico y obtener muestras del suelo, que posteriormente son verificadas en laboratorio. A partir de estos datos, se elaboran perfiles geológicos que se correlacionan y comparan con la geología existente, proporcionando una base sólida y certeza para futuros proyectos de construcción en Pamplona(**Montealegre et al., 2018**).

Esta investigación llevada a cabo en la Universidad de Pamplona con el fin de obtener el título de Ingeniero Civil se basó en el uso de métodos como la refracción sísmica, la reflexión sísmica, el MASW y el ReMi para caracterizar el subsuelo en cinco zonas de estudio, con un total de 480 metros de extensión. Tras la adquisición y el procesamiento de datos utilizando programas como SeisImager y Seismic Unix, se generaron perfiles 1D y 2D. Estos perfiles de ondas P y S permitieron estimar la presencia de capas, espesores, tipos de materiales y velocidades en el subsuelo. Además, se determinaron parámetros geotécnicos como la capacidad portante, el módulo de Poisson, el módulo de rigidez, el módulo de Young y la densidad. Estos parámetros proporcionaron posibles explicaciones para las fallas observadas en las zonas críticas estudiadas, lo que resulta crucial para proyectos de construcción y planificación urbana(**Pico & Huertas, 2016**).

Este artículo, realizado en el marco de la obtención del título de Ingeniero Civil, aborda la disposición de residuos sólidos en el relleno sanitario "La Cortada" en Pamplona, Norte de Santander. Su enfoque se centra en la evaluación de los posibles impactos ambientales derivados del flujo no controlado de lixiviados al suelo. Para ello, se emplearon métodos no invasivos como la refracción sísmica y la tomografía de resistividad eléctrica, con el fin de estimar la contaminación en formaciones rocosas ocasionada por la degradación de residuos sólidos. Se caracterizaron las capas superficiales considerando la geología, topografía y condiciones geográficas de la zona. Los resultados obtenidos revelaron velocidades sísmicas y resistividades eléctricas asociadas a materiales y niveles de humedad específicos, proporcionando así información clave sobre posibles riesgos ambientales **(Alemán et al., 2017)**

Esta práctica se llevó a cabo con el fin de obtener el título de ingeniero civil se desarrollo durante 4 meses en la empresa Geología y Servicios Ltda., donde se participó en estudios de exploración geofísica somera. Los ensayos se dividieron en sísmicos (refracción sísmica, MASW) y geoelectricos (sondeos eléctricos verticales, tomografías de resistividad eléctrica). Se adquirieron habilidades en diseño, adquisición, procesamiento e interpretación de datos para investigaciones del subsuelo y sus aplicaciones en ingeniería civil. Como resultado, se entregará un manual de procedimientos de exploración geofísica para guiar al personal en los diferentes estudios de la empresa **(Boada, 2018)**

Material desarrollado a nivel internacional para llevar a cabo la investigación:

Esta investigación para obtener el título como ingeniero civil empleó métodos geofísicos como el MASW y la refracción sísmica en geotecnia para determinar parámetros como el ángulo de fricción y la cohesión del suelo. El objetivo principal era comparar estos valores con los

obtenidos a través de métodos convencionales y así evaluar la capacidad portante en Puente Piedra. Mientras que los métodos convencionales proporcionaron datos iniciales, los geofísicos utilizaron velocidades de ondas S y P para obtener datos geotécnicos más precisos. Como resultado, se llegó a la conclusión de que la metodología geofísica complementó de manera efectiva a los métodos convencionales, ofreciendo resultados más precisos y siendo más respetuosa con el medio ambiente al evitar impactos negativos en la zona(**Gómez et al., 2021**).

Esta tesis para obtener el título de ingeniero civil se basó en la importancia del estudio de la capacidad portante del suelo en la construcción de obras. Tradicionalmente, en Ecuador, este estudio se realiza mediante ensayos convencionales como el SPT y el triaxial. Sin embargo, en los últimos años, se ha observado un aumento en el uso de métodos geofísicos, especialmente la refracción sísmica, incluso por parte del Ministerio de Transporte y Obras Públicas. Esto motivó la idea de comparar el cálculo de capacidad portante entre la geofísica y los métodos convencionales, con el fin de evaluar su viabilidad y eficacia, tanto técnica como económicamente. Cada método tiene fundamentos diferentes: el geofísico es indirecto y superficial, utilizando instrumentos especializados como sismógrafos, mientras que el triaxial y el SPT son métodos directos que involucran la obtención de muestras y ensayos en laboratorio o perforaciones en el sitio(**Guamán, 2022**).

Marco teórico

Generalidades de los métodos sísmicos

Para entender los métodos abordados en este estudio, se realizará un breve repaso por algunas de las teorías fundamentales sobre las ondas y los principios que se aplican.

Ondas sísmicas

Hay dos tipos de ondas mecánicas: las que se mueven dentro del subsuelo, llamadas ondas de cuerpo, y las que se desplazan a lo largo de las partes poco profundas, conocidas como ondas superficiales.

Las ondas de cuerpo se subdividen en ondas de compresión o presión (P) y ondas de corte o de cizalla (S), mientras que las ondas superficiales comprenden las ondas de Rayleigh (R) y las ondas Love (L).

Método de Refracción Sísmica (RS)

En la sísmica de refracción se mide el tiempo de propagación de las ondas mecánicas, transcurrido entre un sitio donde se generan ondas sísmicas y la llegada de éstas a diferentes puntos de medición. Para esto se disponen una serie de sensores (geófonos) de manera colineal a distancias conocidas, formando lo que se conoce como tendido.

una distancia conocida se dispone un punto de disparo que genera ondas sísmicas con la ayuda de un martillo o por la detonación de explosivos, las cuales inducen vibraciones en el terreno que son detectadas por cada uno de los sensores o géofonos en el tendido.(Telford et al., 2004)

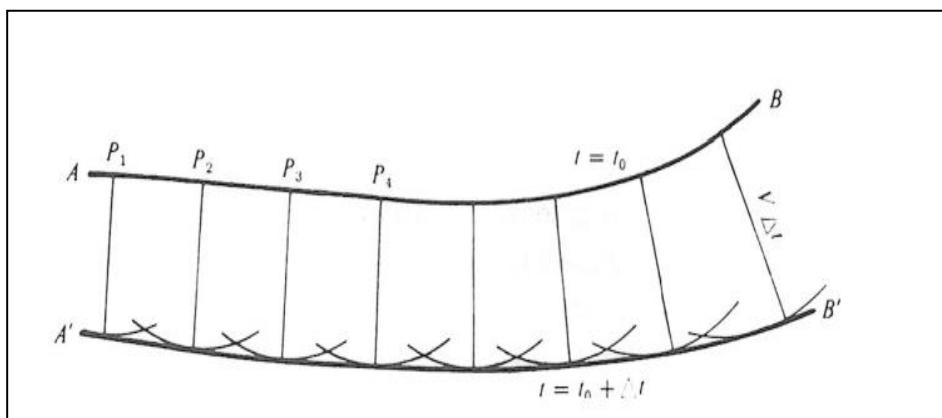
Las ondas P, también conocidas como ondas longitudinales, son las de mayor interés en la refracción sísmica debido a su capacidad para proporcionar información detallada sobre la estructura subsuperficial y su habilidad para penetrar a través de una variedad de materiales, lo que las convierte en una herramienta valiosa para la investigación geofísica. Las leyes que rigen la propagación y la trayectoria de las ondas sísmicas en la refracción son las mismas que se utilizan en óptica:

Principio de Huygens.

El desplazamiento de una onda sigue el principio de Huygens, que sostiene que cada punto en la frontera de una onda puede actuar como una nueva fuente generadora de ondas sísmicas. De esta manera, se puede anticipar la posición de nuevas fronteras de onda generadas, considerando siempre que cada una tiene el potencial para originar más ondas(Nascimento, 2010, p. 23).

En la **Figura 1**, AB representa una frontera de onda en un instante t_0 , y el objetivo es determinar esta frontera de onda en un tiempo específico ($t_0 + \Delta t$). Durante un intervalo de tiempo Δt , la onda se desplaza una distancia $V\Delta t$, donde V representa la velocidad de propagación. Se seleccionan puntos en la frontera de la onda (P1, P2, P3, etc.) y se trazan pequeños arcos con radio $V\Delta t$. A partir de estos arcos diminutos (que forman las fronteras de onda secundarias), podemos definir la posición de la frontera de onda A'B' en un momento posterior ($t + \Delta t$). Esta posición corresponde a la superficie que toca simultáneamente todas las fronteras de onda secundarias.

Figura 1. Principio de Huygens

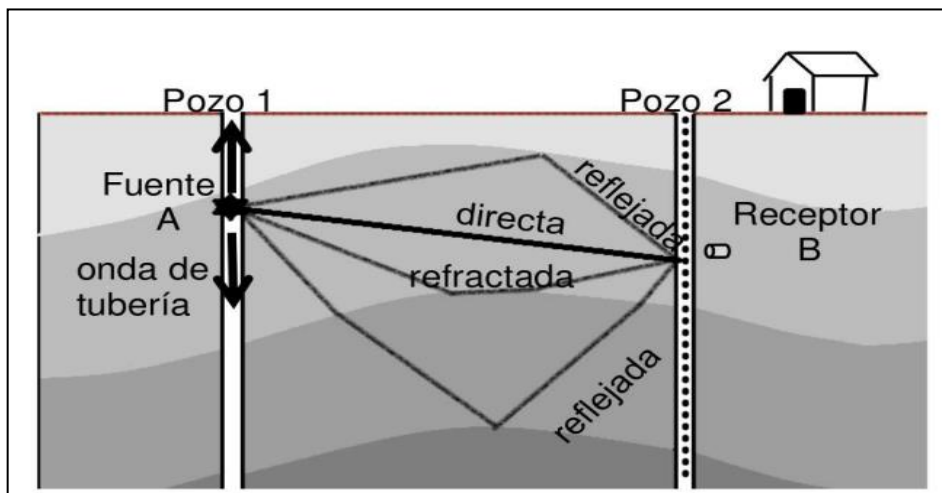


Nota: Así se localizan nuevos frentes de onda, **Fuente:** (Nascimento, 2010, p. 23)

Principio de Fermat

El principio de Fermat sobre la propagación de los rayos de luz, afirma que la trayectoria real entre dos puntos tomada por un haz de luz es aquella que es recorrida en el tiempo mínimo. En la **Figura 2** se representa la tomografía de pozo a pozo y los diferentes recorridos de ondas acústicas.

Figura 2. Esquema de tomografía.



Fuente: (Chambi Chambi et al., 2013, p. 2).

Para aplicar el principio de Fermat a las ondas sísmicas necesitamos saber si estas ondas pueden ser consideradas como ondas planas. Las ondas sísmicas si son emitidas por una fuente puntual, los frentes de ondas cercanas a la emisión son frentes de ondas esféricos, pero a medida que la onda se va alejando de la fuente el frente de onda, deviene a ser plano. Entonces para distancias lejanas del origen de las ondas sísmicas hablamos de la propagación de ondas planas, en este caso de rayos sísmico (*Chambi Chambi et al., 2013, p. 2*). Para determinar el tiempo que tarda en llegar un rayo sísmico desde un punto distante al receptor, se introduce el concepto de "lentitud", representada por $S(x)$, que se define como el inverso de la velocidad, $v(x)$. El cálculo del tiempo de llegada de una señal desde la fuente emitida A hasta el receptor B a lo largo de una ruta potencial se expresa mediante la siguiente fórmula:

$$t_{AB} = \int_A^B S(x) dl = \int_A^B \frac{a}{v(x)} dl. \quad \text{Ec. 1}$$

donde S es una distribución continua de lentitudes $s(x)$ y dl indica el diferencial de camino de A hacia B.

Ley de refracción (o de Snell)

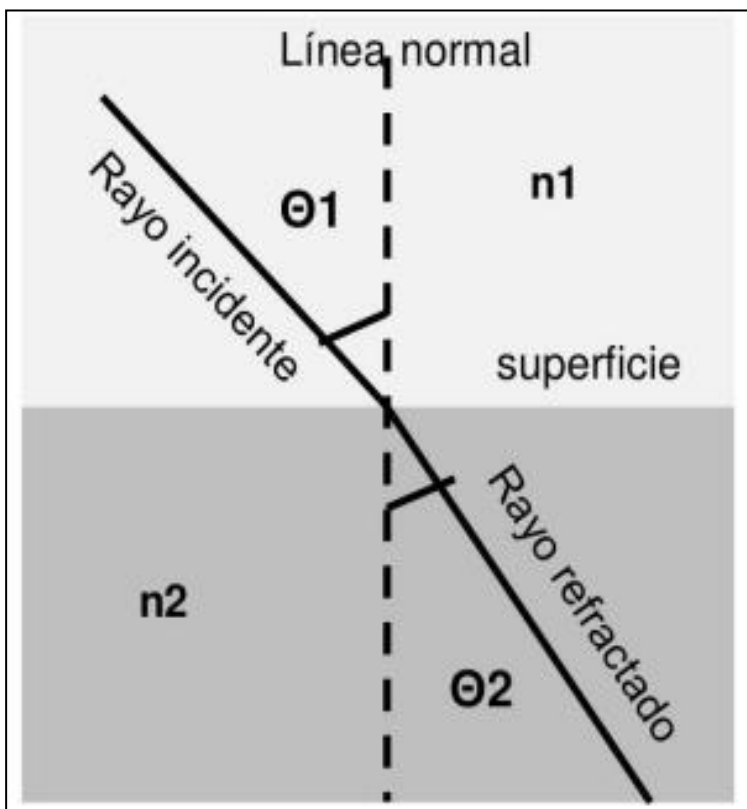
La ley de Snell relaciona los índices de refracción y los ángulos de incidencia y refracción de una onda que atraviesa dos medios de diferentes lentitudes o índices de refracción. Como el índice de refracción es dado por $n = c/v$, donde c es la velocidad de la luz en el vacío o la onda en un medio homogéneo. Luego la ley de Snell es definida como:

$$s_1 \sin \theta_1 = s_2 \sin \theta_2$$

Ec. 2

En la figura 3 θ_1 y θ_2 son los ángulos del rayo de incidencia y del rayo refractado a la normal al plano que separa las dos regiones, respectivamente. Y s_1 y s_2 son las lentitudes en los medios 1 y 2, respectivamente (Chambi Chambi et al., 2013, p. 3).

Figura 3. Conversión de una onda incidente P.



Nota: Las ondas sísmicas que viajan por el subsuelo se reflejan y se refractan siguiendo la ley de Snell. **Fuente:** (Chambi Chambi et al., 2013, p. 3)

MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves)

La técnica Análisis Multi-Canal de Ondas Superficiales (siglas en ingles MASW) emplea el registro de ondas superficiales, con una línea de geófonos que se sitúa sobre el terreno, al igual que de la sísmica refracción. Las ondas superficiales se propagan a una menor velocidad que las ondas de compresión, por lo que se recomienda una adquisición de registros con una longitud considerable.

Este método consiste en la interpretación de las ondas superficiales (Ondas Rayleigh) de un registro en arreglo multicanal, generadas por una fuente de energía impulsiva en puntos localizados a distancias predeterminadas a lo largo de un eje sobre la superficie del terreno, obteniéndose el perfil de velocidades de ondas de corte (V_s) para el punto central de dicha línea.

Los materiales geológicos y de suelos pueden ser clasificados considerando el rango de velocidades de onda P y S de acuerdo a la **Tabla 1** para diferentes tipos de materiales.

Tabla 1. Correlaciones de valores de velocidades para onda P y S para diferentes tipos de material.

Tipo de formación	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Densidad (g/cm3)	Densidad del cristal constituyente (g/cm3)
Suelo vegetal pedregoso	300-700	100-300	1.7 - 2.4	-
Arenas secas	400-1200	100-500	1.5 - 1.7	2.65 cuarzo
Arenas húmedas	1500-2000	400-600	1.9 - 2.1	2.65 cuarzo
Pizarras y arcillas saturadas	1100-2500	200-800	2.0 - 2.4	-
Margas	2000-3000	750-1500	2.1 - 2.6	-
Secciones de pizarras y arenas saturadas	1500-2200	500-750	2.1 -2.4	-
Areniscas porosas y saturadas	2000-3500	800-1800	2.1 -2.4	2.65 cuarzo
Calizas	3500-6000	2000-3300	2.4 - 2.7	2.71 calcita
Caliza ligera	2300-2600	1100-1300	1.8 - 3.1	2.71 calcita
Sal	4500-5500	2500-3100	2.1 - 2.3	2.1 halita
Anhidrita	4000-5500	2200-3100	2.9 - 3.0	-
Dolomita	3500-6500	1900-3600	2.5 - 2.9	(Ca, Mg) CO3 2.8-2.9
Granito	4500-6000	2500-3300	2.5 - 2.7	-
Basalto	5000-6000	2800-3400	2.7 - 3.1	-
Gneis	4400-5200	2700-3200	2.5 - 2.7	-
Carbón	2200-2700	1000-1400	1.3 - 1.8	-
Agua	1450-1500	-	1	-
Hielo	3400-3800	1700-1900	0.9	-
Aceite	1200-1250	-	0.6 - 0.9	-

Fuente: (Tezcan et al., 2009)

Norma NSR10

Los parámetros definidos en la norma(NSR10, 2010), que se utilizan para definir el tipo de perfil de suelo con base en los 30m superiores del mismo y considerando ensayos realizados en muestras tomadas al menos cada 1.50m de espesor del suelo como podemos apreciar en la **Tabla 2**. Estos parámetros son la velocidad media de la onda de cortante, V_s , en m/s , el número medio de golpes del ensayo de penetración estándar, N , en golpes/pie a lo largo de todo el perfil, o, cuando se trate de considerar por separado los estratos no cohesivos y los cohesivos del perfil, para los estratos de suelos no cohesivos se determinará el número medio de golpes del ensayo de penetración estándar, N_{ch} , en golpe/pie, y para los cohesivos la resistencia media al corte obtenida del ensayo para determinar su resistencia no drenada, S_u , en Kpa. Además, se emplean el Índice de Plasticidad(IP), y el contenido de agua en porcentaje.

Tabla 2. Clasificación de los perfiles de suelo considerando los valores de velocidad de onda de corte promedio a 30 metros.

Tipo de Perfil	Descripción	Definición
A	Perfil de roca competente.	$\bar{V}_s \geq 1500m/s$
B	Perfil de roca de rigidez media.	$1500m/s > \bar{V}_s \geq 760m/s$
	Perfiles de suelos muy densos o roca	$760m/s > \bar{V}_s \geq 360m/s$
C	blanda, que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante.	

perfiles de suelos muy densos o roca	$760m/s > \bar{V}_s \geq 360m/s$
blanda, que cumplan con cualquiera de los dos criterios.	$\bar{s}_u \geq 100kPa (\approx 1kgf/cm^2)$
Perfiles de suelos rígidos que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante.	$360m/s > \bar{V}_s \geq 180m/s$
D	
Perfiles de suelos rígidos que cumplan cualquiera de las dos condiciones.	$50 > \bar{N} \geq 15, o$
	$100kPa (\approx 1kgf/cm^2) > \bar{s}_u \geq 50kPa (\approx 0.5kgf/cm^2)$
Perfil que cumpla el criterio de velocidad de la onda de cortante.	$180m/s > \bar{V}_s$
E	$IP > 20$
Perfil que contiene un espesor total H mayor de 3 m de arcillas blandas.	$w \geq 40\%$
	$50kPa (\approx 0.5kgf/cm^2) > \bar{s}_u$

Los perfiles de suelo tipo **F** requieren una evaluación realizada explícitamente en el sitio por un ingeniero geotecnista de acuerdo con el procedimiento de A.2.10. Se contemplan las siguientes subclases:

F1 — Suelos susceptibles a la falla o colapso causado por la excitación sísmica, tales como: suelos licuables, arcillas sensitivas, suelos dispersivos o débilmente cementados, etc.

F

F2 — Turba y arcillas orgánicas y muy orgánicas (**H** > 3 m para turba o arcillas orgánicas y muy orgánicas).

F3 — Arcillas de muy alta plasticidad (**H** > 7.5 m con Índice de Plasticidad **IP** > 75)

F4 — Perfiles de gran espesor de arcillas de rigidez mediana a blanda (**H** > 36 m)

Fuente: Norma Sismo Resistente NSR10 basado en la Tabla A.2.4-1

Estimación de los parámetros elásticos en función de la velocidad de onda tipo P y S

La estimación de los parámetros dinámicos: Modulo de Poisson (σ), el parámetro de Rigidez (G), el módulo de Young (E), y el módulo o parámetro de Bulk (K) pueden ser estimados en la posición central de la línea sísmica realizada, se debe considerar que el sistema de unidades de entrada a de ser MKS (Metros, Kilogramos, Segundos), de esta manera las unidades de los módulos seria en Pascales. Las relaciones utilizadas para estos parámetros son las siguientes:

Para el módulo de Poisson se utilizó la siguiente expresión encontrada en **(Telford et al., 1990)**:

$$\sigma = \frac{\left(\left(\frac{V_P}{V_S}\right)^2 - 2\right)}{\left(2\left(\frac{V_P}{V_S}\right)^2 - 2\right)}, \quad \text{Ec. 3}$$

donde V_P es la velocidad de onda tipo P, y V_S es la velocidad de onda tipo S, obtenidas de los ensayos geofísicos indirectos.

La densidad del medio se puede determinar a partir de la siguiente relación (se cumple para rocas sedimentarias, basada en **(Gardner et al., 1974)**):

$$\rho = 0.23 V_P^{0.25}, \quad \text{Ec. 4}$$

donde las unidades de densidad obtenida son gr/cm^3 , para esta expresión velocidad de onda P debe estar en ft/s , de estar V_P en m/s se debe usar:

$$\rho = 0.31 V_P^{0.25}, \quad \text{Ec. 5}$$

la densidad obtenida se debe convertir a kg/m^3 .

Para el caso del módulo de Rigidez (G) la relación está dada por:

$$G = \rho V_S^2, \quad \text{Ec. 6}$$

donde ρ , es la densidad del medio en kg/m^3 .

Para el módulo de *Young* (E), la expresión a usar es la siguiente:

$$E = 2 G (1 + \sigma), \quad \text{Ec. 7}$$

y el módulo de *Bulk* (K), esta expresado por:

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\sigma)}, \quad \text{Ec. 8}$$

En la **tabla 3** se muestran la correlación del módulo de Young el que se destaca la variabilidad en los valores obtenidos para distintos materiales, lo que sugiere una relación intrínseca entre la naturaleza del material y su rigidez bajo carga.

Tabla 3. Correlación del módulo de Young a diferentes tipos de material.

Descripción	Módulo de Young (Ksi) [Mpa]
Arenas	(0.73 - 11.75) [5-81]
Limoso	(0.73 - 2.9) [5 - 20]
Suelo suelto	(1.45 - 3.63) [10-25]
Medio	(4.35 - 7.25) [30- 50]
Denso	(7.25 - 11.75) [50 - 81]
Arena y grava	(4.35 - 46.41) [30- 320]
Suelto	(4.35 - 11.6) [30 - 80]
Medio	(11.6 - 23.21) [80 - 160]
Ligero	(23.21 - 46.41) [160 - 320]
Limoso	(1.02 - 3.05) [7 - 21]
Arcilloso	(0.29 - 36.26) [2 - 250]
Muy blando	(0.29 - 2.18) [2 - 15]
Blando	(0.73 - 3.63) [5 - 25]
Medio	(2.18 - 5.8) [15 - 40]
Rígido	(5.8 - 14.5) [40 - 100]
Arenoso	(3.63 - 36.26) [25 - 250]

Fuente: (Tezcan et al., 2009)

La **tabla 4** relaciona la correlación del módulo de Poisson con diversos tipos de material, se observan patrones significativos que permiten entender la relación entre este parámetro y las propiedades específicas de cada material.

Tabla 4. Correlación del módulo de Poisson a diferentes tipos de material.

Descripción	Poisson Ratio
Arena	0.15 - 0.4
Denso	0.2 - 0.4
Lapso entre denso y ligero	0.15
Ligero	0.25
Limoso	0.3 - 0.35
Arcilla	0.1 - 0.5
Saturado	0.4 - 0.5
No saturado	0.1 - 0.3
Arena arcillosa	0.2 - 0.3

Fuente: (Tezcan et al., 2009)

Equipos empleados

Para la adquisición sísmica se utilizó el equipo de consola GEA24, manufacturado por PASI empresa italiana; para la ejecución se requirió de los siguientes accesorios **Figura 6:**

- **Consola GEA24:** es un sismógrafo compacto de 24 canales (pudiendo emplear hasta 48 canales) con tarjeta de adquisición de 24 bits e interfaz USB para portátil externo (no incluido en el suministro). Indicado para todas las aplicaciones.
- **24 geófonos verticales de 4,5 Hz:** Cada uno de estos con carcasa estándar, punta de acero de 75 mm, 1 m de cable con conector split spring (clip individual).
- 2 cables sísmicos espaciado estándar de 5 m.
- **Cable extensor de trigger:** Aumenta el alcance del geófono que active el shot o golpe y por ende la adquisición del equipo.
- **Radio trigger.**
- Geófono starter o starter piezoeléctrico.

- **Maza de impacto:** este se utiliza para generar los impactos de velocidad de ondas en el terreno.
- **Plato de impacto:** se pone sobre el terreno donde se va a recibir el impacto de la maza de impacto.

Figura 4. GEA24 y accesorios para el método sísmico.



Fuente: Dimanto Ingeniería SAS

Marco Legal

La Ley 400 de 1997 establece criterios y requisitos mínimos para el diseño, construcción y supervisión técnica de nuevas edificaciones, así como para aquellas indispensables en la recuperación de la comunidad después de un terremoto. Su objetivo principal es minimizar el riesgo de pérdida de vidas humanas y proteger el patrimonio del Estado y de los ciudadanos.

TÍTULO A — Requisitos generales de diseño y construcción sismo resistente (NSR-10)

Para la actualización fueron consultadas las últimas versiones de las mismas normas base que fueron utilizadas en la redacción del Reglamento de 1984 y en la actualización del Reglamento NSR-

98. En especial se consultaron los requisitos de 2006 del *NEHRP* (FEMA 450–2006(36)) el cual corresponde en línea directa al documento base que se ha empleado para diseño sísmo resistente en Colombia desde 1984. Además, se tuvieron en cuenta los requisitos del *International Building Code* (IBC-2009(40)).

ASTM D6431-99

Guía estándar para Uso del método de resistividad de corriente directa para el subsuelo: Esta guía resume el equipo, los procedimientos de campo, y métodos de interpretación para la evaluación de las propiedades eléctricas de los materiales del subsuelo y sus poros fluidos, utilizando el método de resistividad de corriente continua (CC). Mediciones de las propiedades eléctricas de los materiales del subsuelo la superficie terrestre y producen una resistividad aparente. Estos datos pueden interpretarse para obtener una estimación de la profundidad, el grosor y la resistividad de la capa subsuperficial.

Norma técnica colombiana NTC-1000 DEL 2004

Sistema Internacional de Unidades, esta norma tiene por objeto: Describir el Sistema Internacional de unidades y Recomendar el uso de múltiplos y sub-múltiplos seleccionados del Sistema Internacional y dar algunas otras unidades que se pueden utilizar con el Sistema Internacional de Unidades y Definir las unidades básicas del SI.

ASTM D5777-00

Guía estándar para Usando el método de refracción sísmica para el subsuelo: Esta guía cubre el equipo, procedimientos de campo y métodos de interpretación para evaluación de las condiciones del subsuelo utilizando el método de refracción sísmica. Las Mediciones de

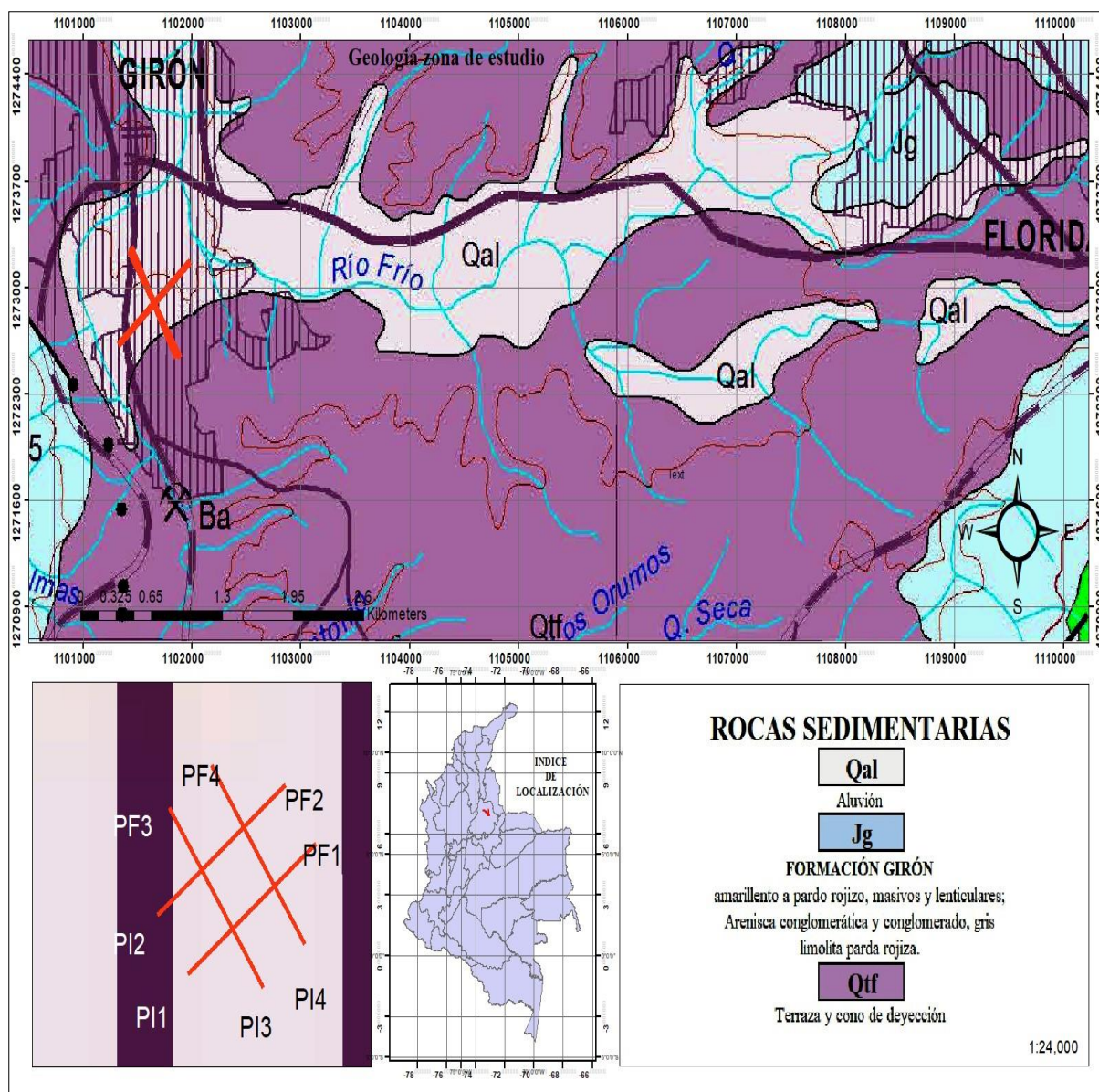
refracción sísmica como se describe en esta guía son aplicables en el mapeo de las condiciones del subsuelo para varios usos incluyendo geológico, geotécnico, hidrológico, ambiental, exploración minera, exploración petrolera e investigaciones arqueológicas

Marco Contextual

Marco geológico de la zona de estudio

La zona entre Girón y Bucaramanga, en Colombia, basada en la geología este suelo se encuentra en una sección cuaternaria tal como se muestra en la **Figura 5** donde principalmente se encuentran depósitos de sedimentos fluviales y lacustres a lo largo de los cursos de agua de la región. Podrían identificarse algunas áreas con formaciones eólicas, como dunas de arena o loess. Los registros paleontológicos podrían ser limitados, pero podrían encontrarse restos fósiles en áreas con exposiciones geológicas adecuadas. No se esperarían formaciones costeras o marinas debido a la ubicación tierra adentro. Además, podrían identificarse evidencias de actividad humana, como arte rupestre o herramientas de piedra, especialmente cerca de los asentamientos históricos.

Figura 5. Geología de zona en estudio



Nota: Geología del área de estudio entre girón y Floridablanca. **Fuente:** (Dwight E. Ward y Richard Goldsmith y Andrés Jimeno V., Jaime Cruz B., Hernán Restrepo y Eduardo Gómez R., de INGEOMINAS plancha geologia 120, 1977)

Localización de la zona de estudio

El área de estudio se localiza en el municipio de Girón, ubicado en el Departamento de Santander. El Municipio forma parte del área metropolitana de Bucaramanga al Noroeste de Colombia y se localiza en la Cordillera Oriental de los Andes colombianos, a una altitud de 7067 msnm, con una superficie de 493 km^2 , y su temperatura máxima promedio diario es de 27 °C.

En la **figura 6** se presenta la localización y el trazado completo de las cuatro líneas sísmicas en el terreno donde se desarrolló la investigación. Las líneas sísmicas fueron desplegadas de principio a fin de la siguiente manera:

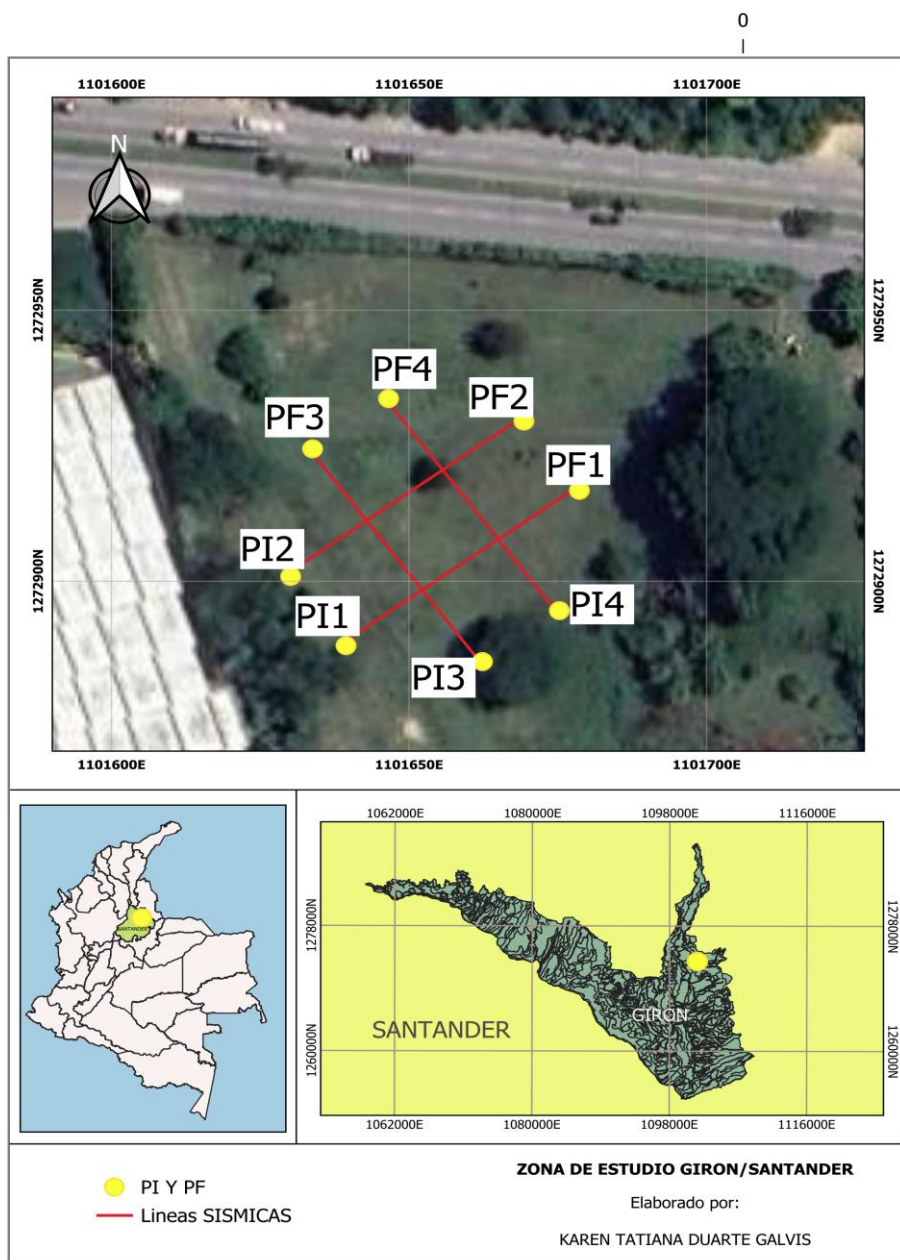
PI1-PF1: Línea sísmica 1

PI2-PF2: Línea sísmica 2

PI3-PF3: Línea sísmica 3

PI4-PF4: Línea sísmica 4

Figura 6. Localización a zona de estudio.



Nota: Localización del área de estudio en el municipio de Girón, departamento de Santander. **Fuente:** Propio

Metodología

La **figura 7** exhibe el cronograma detallado junto con una descripción exhaustiva de las actividades ejecutadas durante el desarrollo de la investigación, cada una alineada con la consecución de los objetivos establecidos.

Figura 7. Cronograma y descripción de actividades

OBJETIVOS	ACTIVIDAD	Agost.				Sept.				Oct.				Nov.			
		MES 1				MES 2				MES 3				MES 4			
		SEMANAS															
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Objetivo 1 Entender los fundamentos fisicomatemáticos para los métodos de tomografía de refracción sísmica y MASW con el fin de aplicarlos en un levantamiento sísmico.	1.1. Conocer sobre los modulos dinamicos, parametros geotecnicos mediante exploración geofísica.																
	1.2. Adquirir conocimientos sobre el manejo de software SeisImager/2D y SeisImager/SW2D y montaje del equipo de refraccion sísmica y MASW.																
Objetivo 2 Adquirir datos geofísicos mediante métodos de tomografía de refracción sísmica y MASW con el fin de evidenciar contrastes de las velocidades sísmicas P y S en una zona de interés.	2.1. Salidas de campo para toma de datos del ensayo refraccion sísmica.																
	2.2.Salidas de campo para toma de datos del ensayo MASW.																
Objetivo 3 Procesar los datos geofísicos con el fin de obtener perfiles de velocidad sísmica tipo P y S en una y dos dimensiones.	3.1. procesar datos geofisicos mediante programas de software SeisImager/2D Y SeisImager/SW2D para determinar la velocidad de ondas P y S.																
Objetivo 4 Determinar los módulos dinámicos a partir de las velocidades sísmicas para la zona de interés.	4.1. Determinar los modulo de Poisson, módulo de Young, módulo de cortante, rigidez y densidad a partir de las velocidades de ondas P y S.																
Objetivo 5 Realizar el análisis sobre las variables dinámicas calculadas para determinar las propiedades geotécnicas de los suelos.	5.1. Mediante las variables dinamicas realizar analisis que determinen la capacidad portante admisible y ultima del suelo.																
	5.2. Proyecto final de investigación.																

Fuente: propio

Objetivo 1. Entender los fundamentos fisicomatemáticos para los métodos de tomografía de refracción sísmica y MASW con el fin de aplicarlos en un levantamiento sísmico

Durante el proceso investigativo, que tuvo lugar desde el 22 de agosto hasta el 30 de noviembre de 2023, se abordaron diversos temas relevantes en la literatura geofísica y geotécnica. Entre estos temas se incluyen:

Propagación de ondas sísmicas: Se exploraron estudios previos sobre la propagación de ondas sísmicas en diferentes medios, incluyendo su comportamiento en suelos de diferente composición y densidad.

Refracción sísmica: Se revisaron investigaciones relacionadas con la técnica de refracción sísmica, que permite calcular las velocidades de propagación de las ondas P y S en el subsuelo, así como su aplicación en la caracterización de capas geológicas y la determinación de parámetros geotécnicos.

Análisis de ondas superficiales: Se estudiaron trabajos previos sobre el análisis de ondas superficiales mediante técnicas como el MASW (Análisis Multicanal de Ondas Superficiales), que proporciona perfiles de velocidad de onda de corte y es útil para la caracterización de suelos superficiales.

Métodos geofísicos no invasivos: Se examinaron investigaciones que destacan la importancia de los métodos geofísicos no invasivos, como la refracción sísmica y el MASW, en la evaluación de propiedades del subsuelo sin perturbar el terreno.

Aplicaciones en ingeniería civil: Se analizaron estudios que muestran la aplicación de técnicas geofísicas en proyectos de ingeniería civil, especialmente en la evaluación de riesgos sísmicos, el diseño de cimentaciones y la planificación urbana.

Determinación y manejo de equipos: Se investigaron protocolos y procedimientos para la determinación y manejo adecuado de equipos utilizados en estudios geofísicos, como geófonos, fuentes sísmicas y sistemas de adquisición de datos. Se consideraron aspectos como la calibración, la instalación en campo y el mantenimiento para garantizar la calidad de los datos obtenidos.

El investigador completó con éxito un curso en Python aplicado a la mecánica de suelos como se muestra en la **figura 8**, lo que le permitió desarrollar un programa personalizado. Este programa facilitó la determinación de los módulos dinámicos y la capacidad portante de los suelos de manera eficiente y efectiva. Gracias a este curso y al programa creado, el investigador pudo optimizar el proceso de análisis de datos sísmicos, mejorando así la calidad y la precisión de los resultados obtenidos en su investigación.

Figura 8 Certificación curso Python aplicado a la mecánica de suelos



Objetivo 2. Adquisición de datos sísmicos

La búsqueda de la zona para la adquisición de datos tuvo lugar desde el 1 de septiembre hasta el 15 de septiembre de 2023, Después de completar los trámites necesarios y esperar los permisos correspondientes, se logró identificar un área sin restricciones para llevar a cabo el ensayo de tomografía de refracción sísmica y MASW. Una vez obtenida la autorización pertinente, se procedió a informar a la empresa DIMANTO INGENIERIA S.A.S. sobre la aprobación para realizar las actividades en la zona **Figura 9.**

Figura 9. Zona de estudio definida



Fuente: propio

Con la delimitación precisa del área de estudio, se inició la meticulosa planificación de las actividades. El proceso comenzó con una exhaustiva observación del terreno, utilizando GPS satelital y realizando inspecciones en el sitio para identificar características topográficas. Esta evaluación se complementó con un análisis detallado de la geología local, lo que permitió confirmar la presencia de un nivel freático superficial, como se muestra en la **Figura 10**.

Además, se observó un alto flujo vehicular en la vía adyacente, dado que en las cercanías de la zona de estudio se encuentra la vía anillo vial que conecta Floridablanca con Girón en Santander. Estos factores fueron considerados debido a su posible influencia en los ensayos a realizar.

Figura 10. *presencia de nivel freático superficial en la zona*



Fuente: *propio*

En la **tabla 6** se presentan los registros detallados de las coordenadas geográficas y las características de cada línea, así como los parámetros principales considerados para la adquisición de datos

Tabla 5. Características del perfil sísmico. Coordenadas geográficas en formato MAGNA-SIRGAS (EPSG: 3116).

Línea	Coordenada punto inicial	Coordenada punto final	Separación entre geófonos	Número de geófonos	Longitud del arreglo
PI1	1272886.845N	1272916.117 N	1.9m	24	46m
PF1	1101641.319E	1101677.393E			
PI2	1272900.656N	1272928.271 N	1.9m	24	46m
PF2	1101633.668E	1101671.181E			
PI3	1272934.207N	1272895.206 N	1.9m	24	46m
PF3	1101652.607E	1101674.341E			
PI4	1272932.075N	1272883.118 N	1.9m	24	46m
PF4	1101637.031E	1101658.343E			

Nota: Coordenadas del punto inicial y final de los cuatro perfiles sísmicos realizados en el municipio de Girón (Santander), junto con la cantidad de geófonos usados, espaciado entre geófonos y los arreglos utilizados para la adquisición. **Fuente:** Propio.

Este enfoque proactivo nos permitió abordar de manera efectiva las particularidades del terreno, garantizando que nuestra ejecución fuera lo más precisa y exitosa posible. Estar preparados y adaptarnos a las condiciones específicas del lugar fue clave para llevar a cabo nuestros ensayos de manera efectiva y eficiente.

El 16 de septiembre de 2023, se inició la ejecución de toma de datos. A las 5:00 a.m., los equipos fueron proporcionado por la empresa DIMANTO INGENIERIA S.A.S ubicada en Cl. 68 #17-11 Local 2, barrio La Victoria, Bucaramanga, Santander.

Al llegar a la zona de estudio, procedimos a iniciar la ejecución organizando meticulosamente los espacios para garantizar una disposición óptima de las líneas de tomografía de refracción sísmica y de la técnica de Ondas Superficiales Multicanal (MASW) tal como se muestra en la **Figura 11**. Cada una de estas líneas abarcaba una distancia de 54 metros, 46 metros donde se instalaron los 24 geófonos y por fuera de cada línea 4 metros más de espaciamiento.

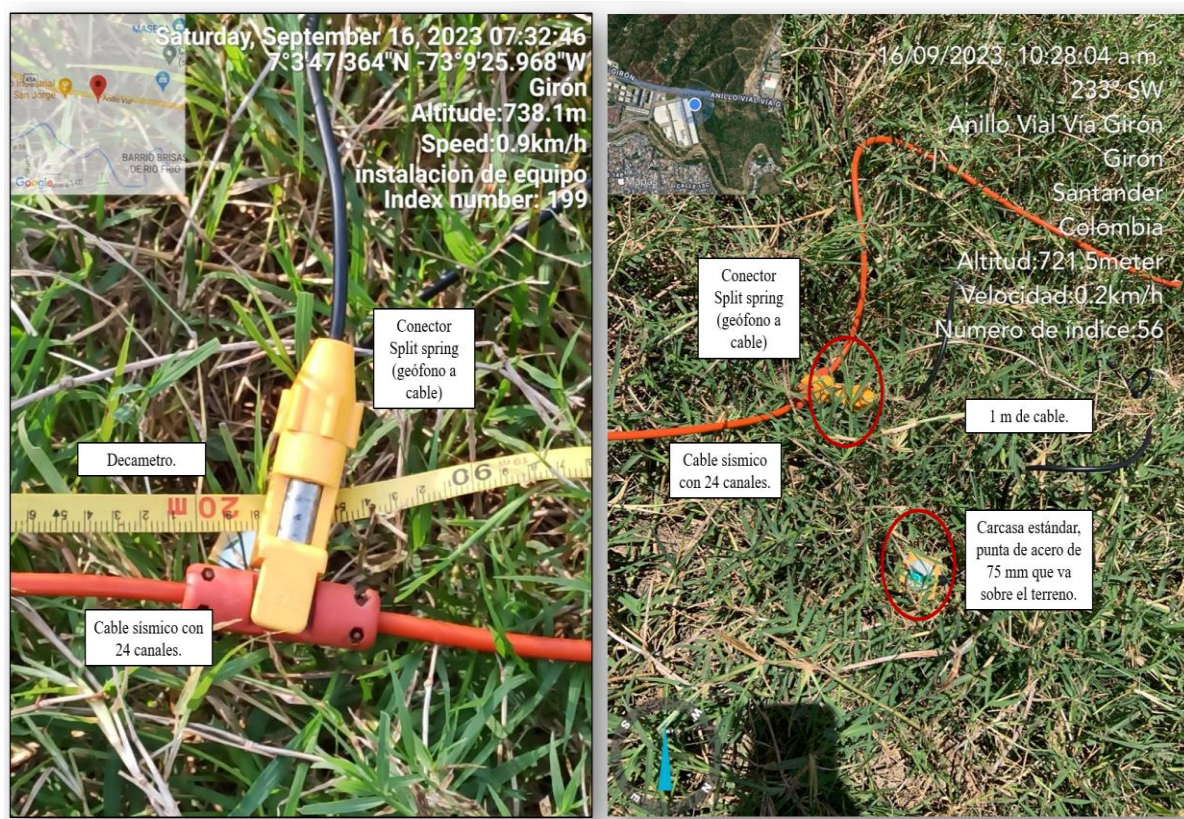
Figura 12. Ubicación de la consola GEA24 en la TRE 01.



Nota: Con el cable y los geófonos en terreno, se procede a ubicar la consola, donde se conecta a los cables y el disparador. Antes de iniciar la adquisición se establecen los parámetros de adquisición. **Fuente:** Propio.

La planificación y ejecución de esta tarea demandaron un período considerable, motivo por el cual procedimos a extender el decámetro, conectar los cables como se indica en la **Figura 13** y vincular los 24 geófonos en cada una de las líneas establecidas.

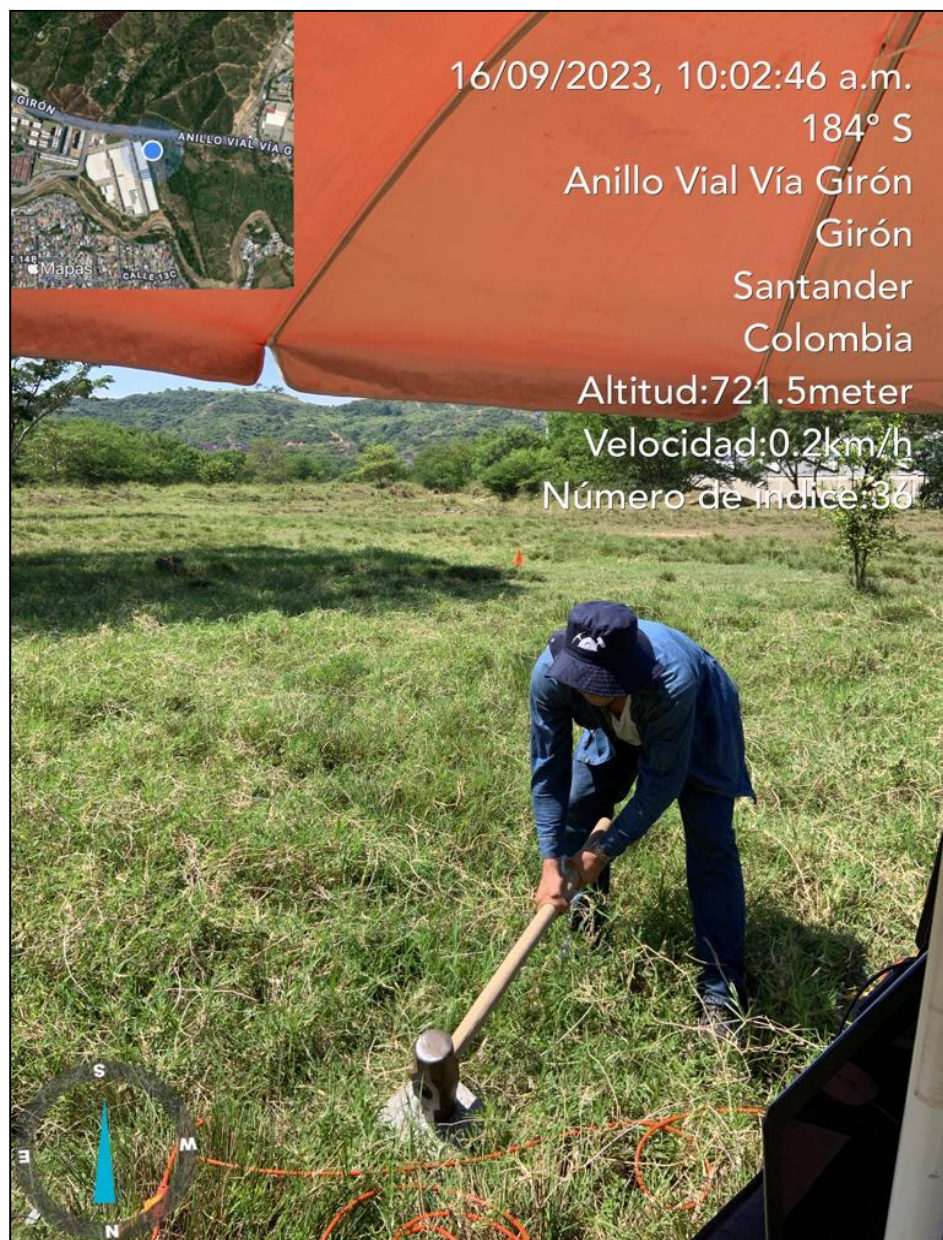
Figura 13. Conexión de los geófonos al cable para las 4 líneas para ensayo de refracción sísmica y MASW.



Nota: Con el cable extendido se ubican los geófonos, usando el decámetro como referencia, y se realiza conexión entre el geófono y el cable. **Fuente:** Propio.

En la **Figura 14** Posteriormente, identificamos el punto de impacto y procedimos a la toma de datos utilizando la consola, sincronizando estas acciones con los golpes proporcionados a la placa por parte del auxiliar.

Figura 14. Punto de impacto para la primera línea.

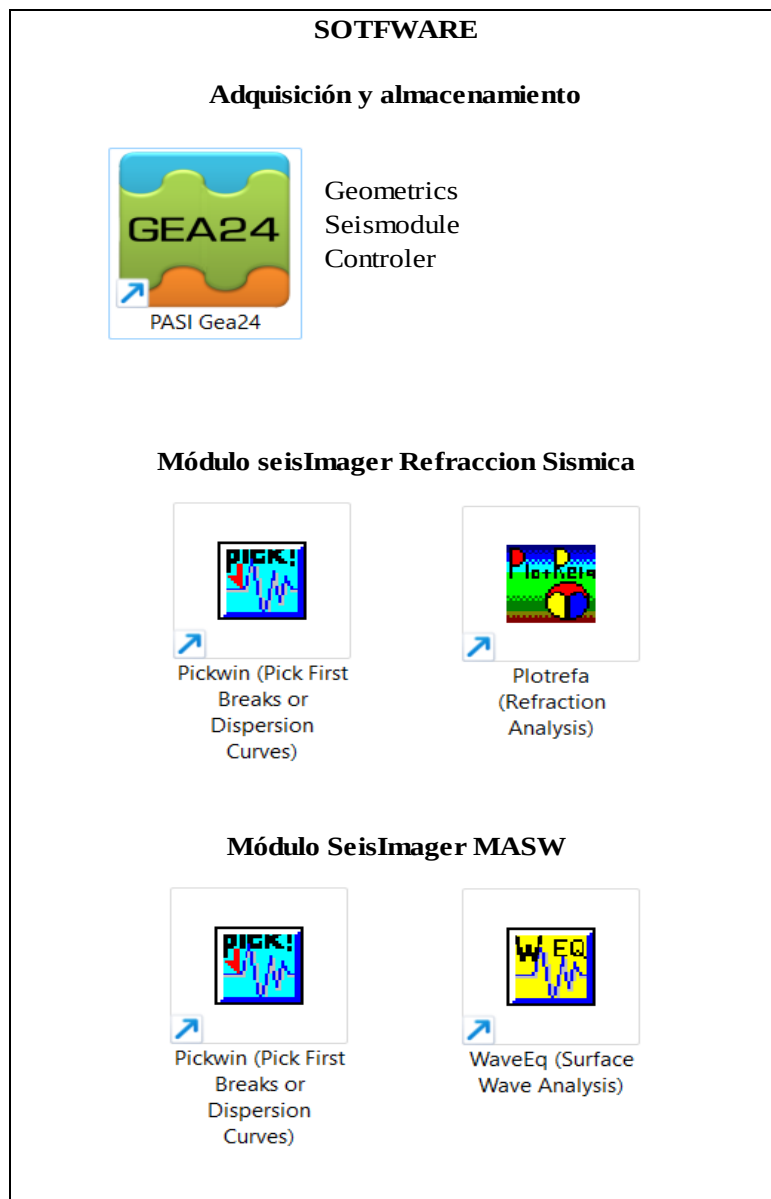


Nota: Para generar las ondas sísmicas, el auxiliar realiza un golpe sobre la placa de impacto utilizando una porra o maza. Esta labor se repite a lo largo del perfil sísmico y para cada una de las líneas. **Fuente:** Propio.

Objetivo 3. Procesamiento de datos sísmico

Los datos del método de refracción sísmica y MASW fueron procesados por el Software SeisImager de la empresa Geometrics los módulos utilizados se muestran en la **figura 15**.

Figura 15. Módulos de SeisImager utilizados para refracción sísmica y MASW



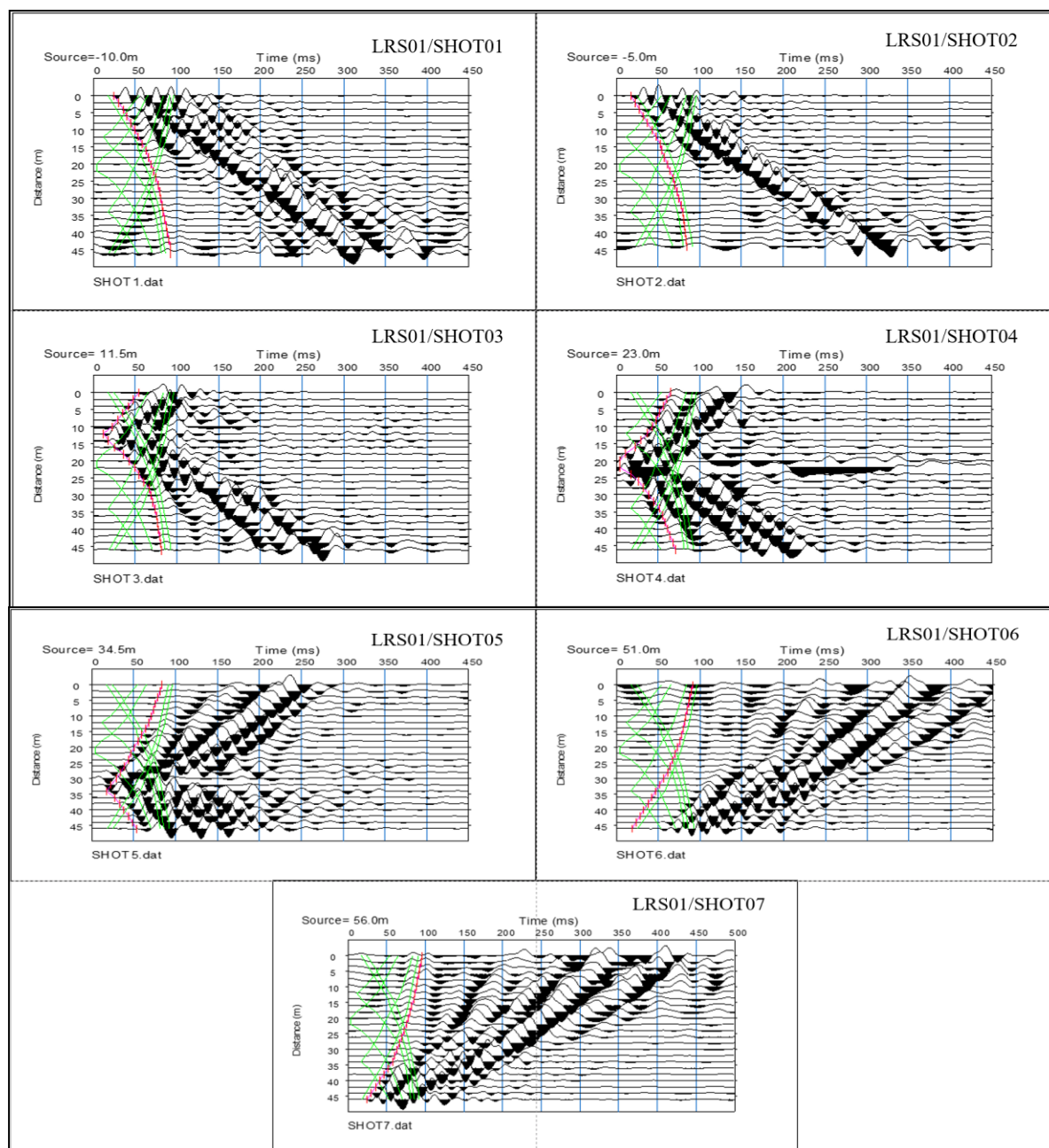
Fuente: (Geometrics,2000), (SeisImager2D_Manual_2009).

Lo primero que se debe revisar en el procesamiento son las cabeceras de los datos, específicamente que las coordenadas de disparo correspondan a la posición indicada, también se debe revisar la separación entre los sensores sísmicos, así como el tiempo de registro de las refracciones críticas que generalmente tienen una amplitud baja en comparación con las amplitudes asociadas a las ondas de superficie.

Procesamiento de datos para Refracción sísmica

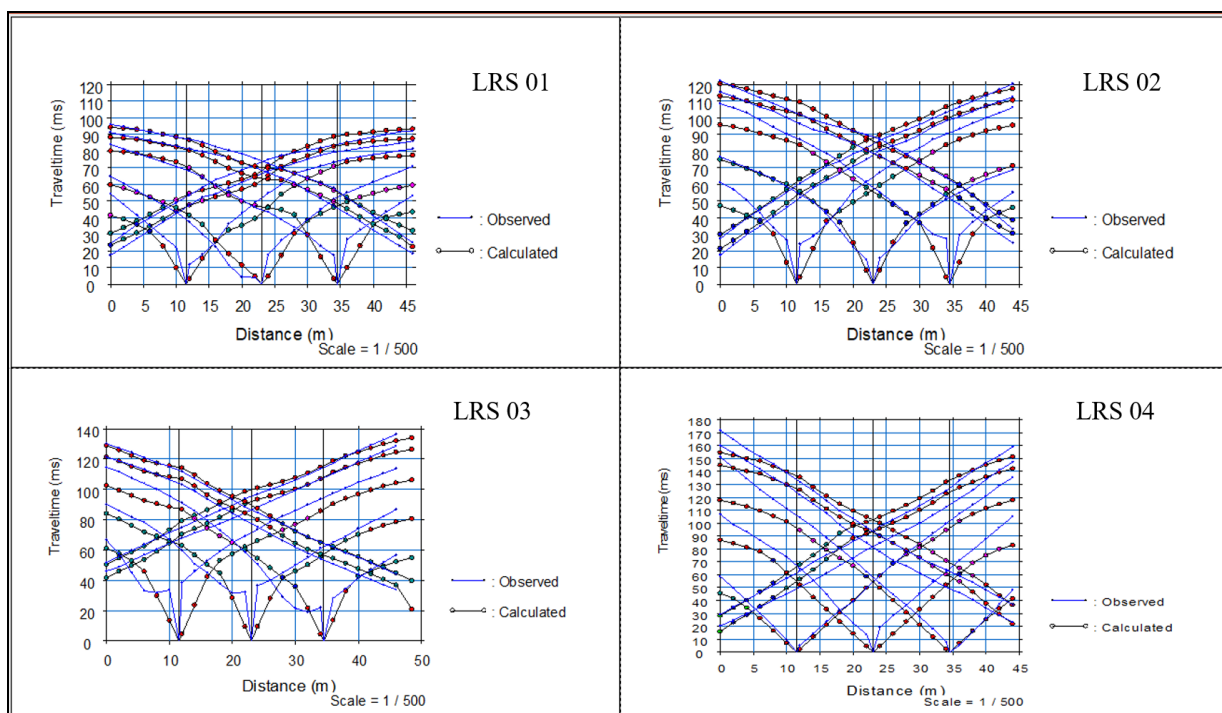
Con propósitos prácticos, a continuación, se detallará el proceso paso a paso para la línea 1 y se seguirá el mismo enfoque con las otras líneas, empleando el módulo Pickwin (Pick First Breaks or Dispersion Curves). En la **Figura 16** se realiza la identificación del primer arribo para cada uno de los trazos sísmicos registrados por cada geófono. Los segmentos de línea resaltados en color rojo indican las primeras llegadas para cada uno de los 24 canales o sensores a lo largo de la línea.

Figura 16 Picado de los primeros arribos de las ondas refractadas críticamente.



Nota: Los segmentos de la línea en color rojo representan las primeras llegadas de las ondas refractadas. **Fuente:** Propia

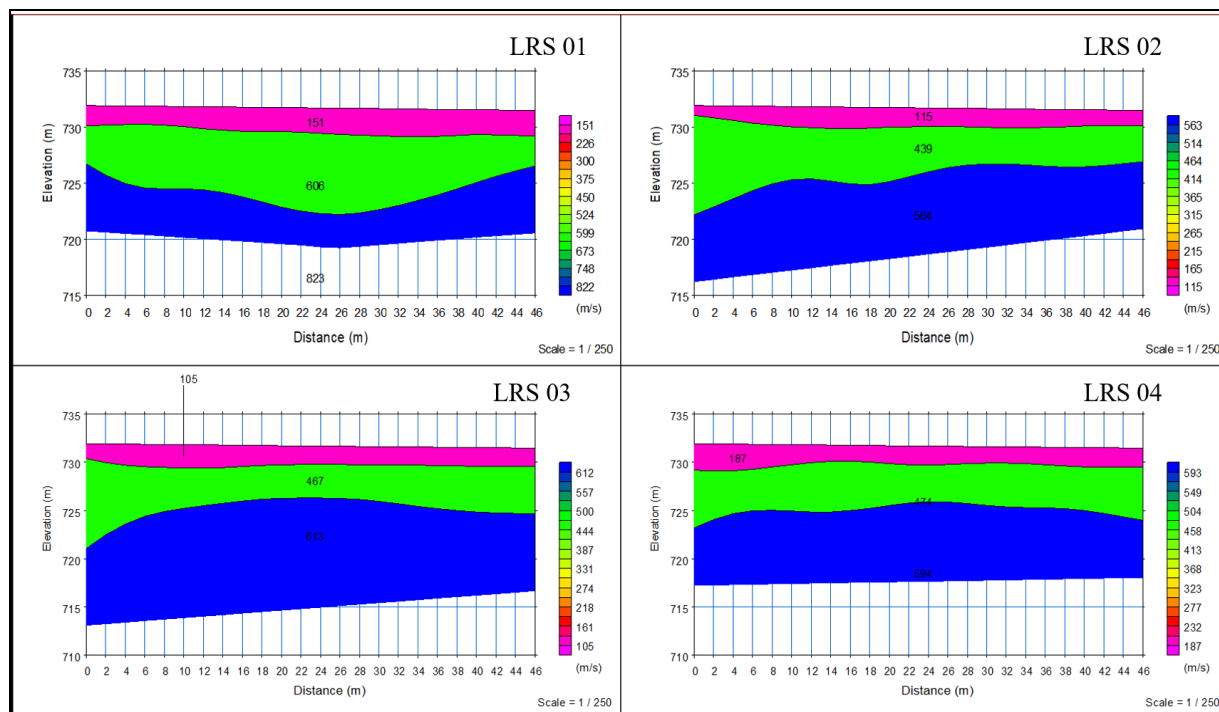
Figura 17. Primeros arribos de las ondas refractadas críticamente para cada una de las líneas de resistividad sísmica tiempo vs distancia.



Nota: Representación para 5 coordenadas de disparo, los círculos en color rojo, verde y azul representan la asignación de capas en los diferentes cambios de pendiente observados en la LRS 01, LRS 02, LRS 03 y LRS 04. **Fuente:** Propio.

En la **figura 18** después de realizar el picado de los primeros arribos y identificar las capas de cada perfil, se procede a asignar capas de acuerdo con el cambio de pendientes presentados y se realiza la inversión por mínimos cuadrados para obtener un modelo preliminar para las velocidades de onda P.

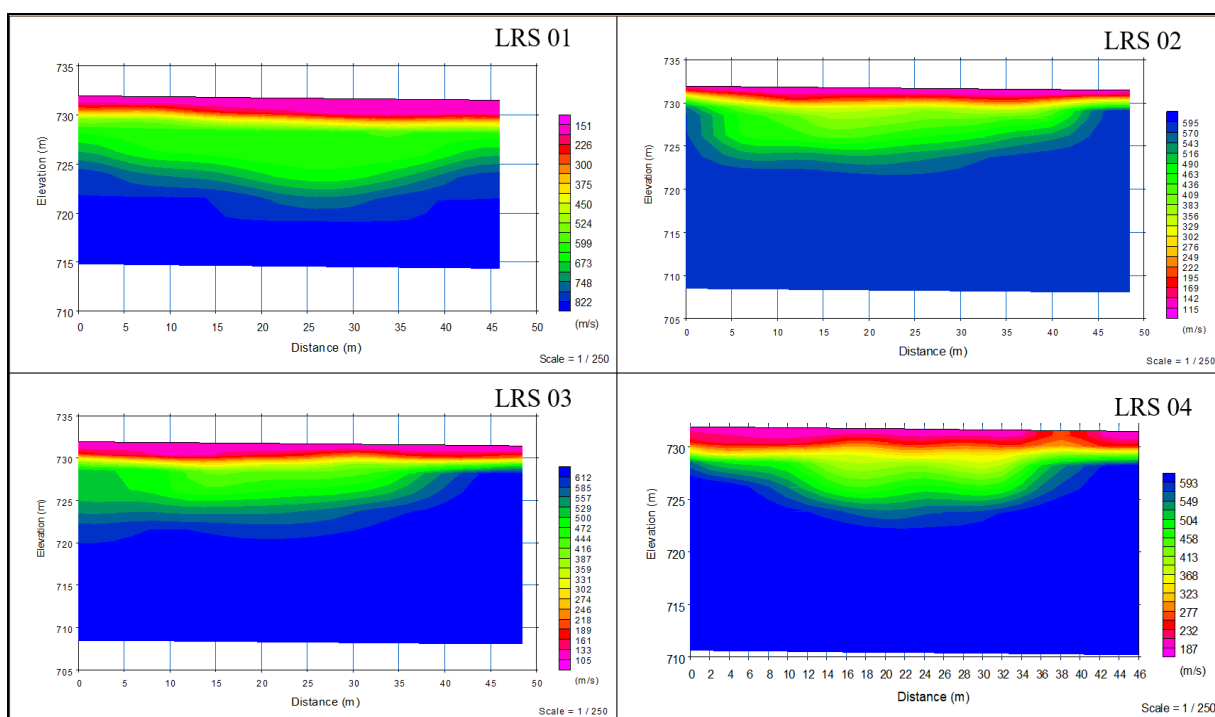
Figura 18. Modelo preliminar de la velocidad de onda P sobre las líneas de resistividad sísmicas.



Nota: revisión del comportamiento de los datos adquirido en cada uno de los niveles, para las líneas de tomografía de resistividad sísmica con arreglo Dipolo-Dipolo. **Fuente:** Propio.

Finalmente, en la **Figura 19** se aplica una inversión más robusta usando la técnica de Tomografía Sísmica y se obtiene el modelo final del subsuelo para la velocidad de onda P, las indicaciones del manual del Software. Este modelo representa la versión definitiva, la cual se interpreta mediante tablas de velocidades de ondas P con el propósito de determinar el tipo de suelo presente.

Figura 19. Tomografías sísmicas de refracción mediante una inversión por mínimos cuadrados.



Nota: Análisis y filtrado de los resultados obtenidos considerando el error RMS entre los valores medidos en campo y los calculados en el proceso de inversión para la TTE 01 con arreglo Dipolo-Dipolo. **Fuente:** Propio.

Procesamiento de método de análisis multicanal para ondas superficiales (MASW)

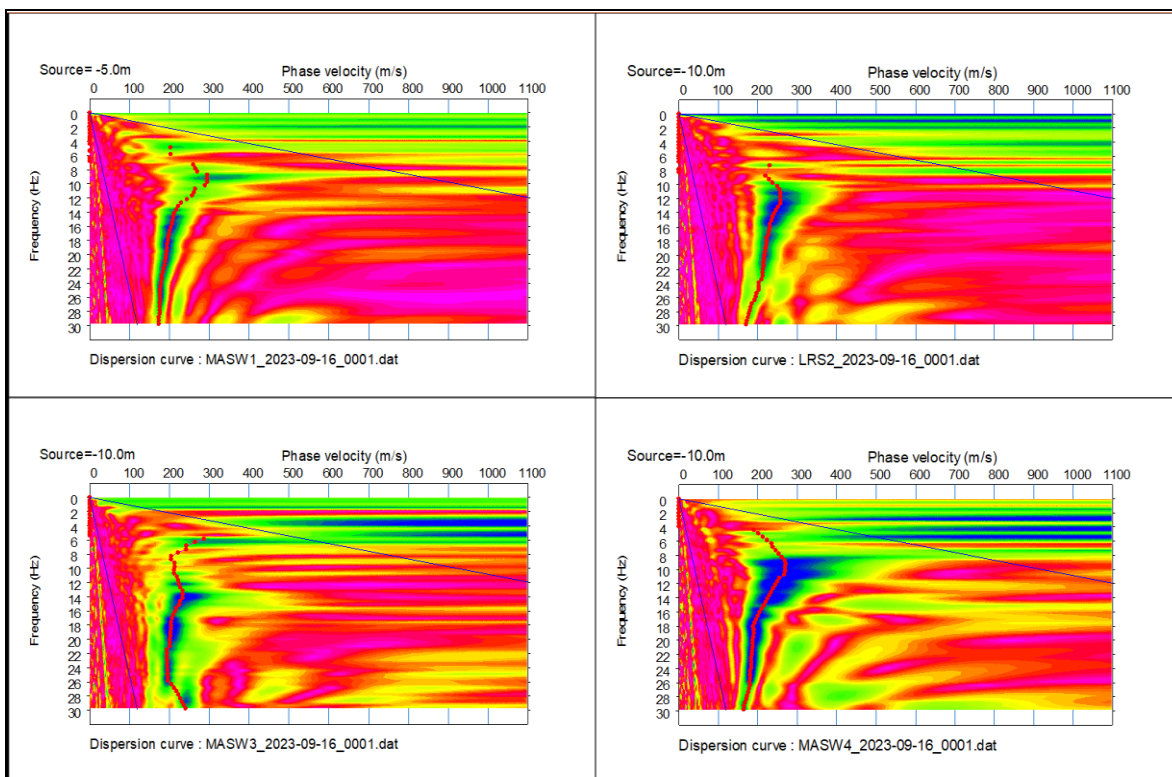
El tratamiento en este método es uniforme para todas las áreas de aplicación, siendo realizado mediante el software SeisImager y empleando los mismos módulos detallados (ver figura 7).

Se inicia con cargar la información en el software de cada uno de los golpes y localización de los geófonos.

A los datos adquiridos se les procede a realizar el cálculo de auto correlación espacial de los registros sísmicos y se procede a obtener un dato en el dominio velocidad de fase versus frecuencia ver **figura 20**, para obtener el dato en el dominio ya mencionado, se procede en dos

etapas, una primera etapa se aplica una transformada de Fourier, utilizando un valor de (1100 m/s) y frecuencia de(35Hz) de las ondas superficiales.

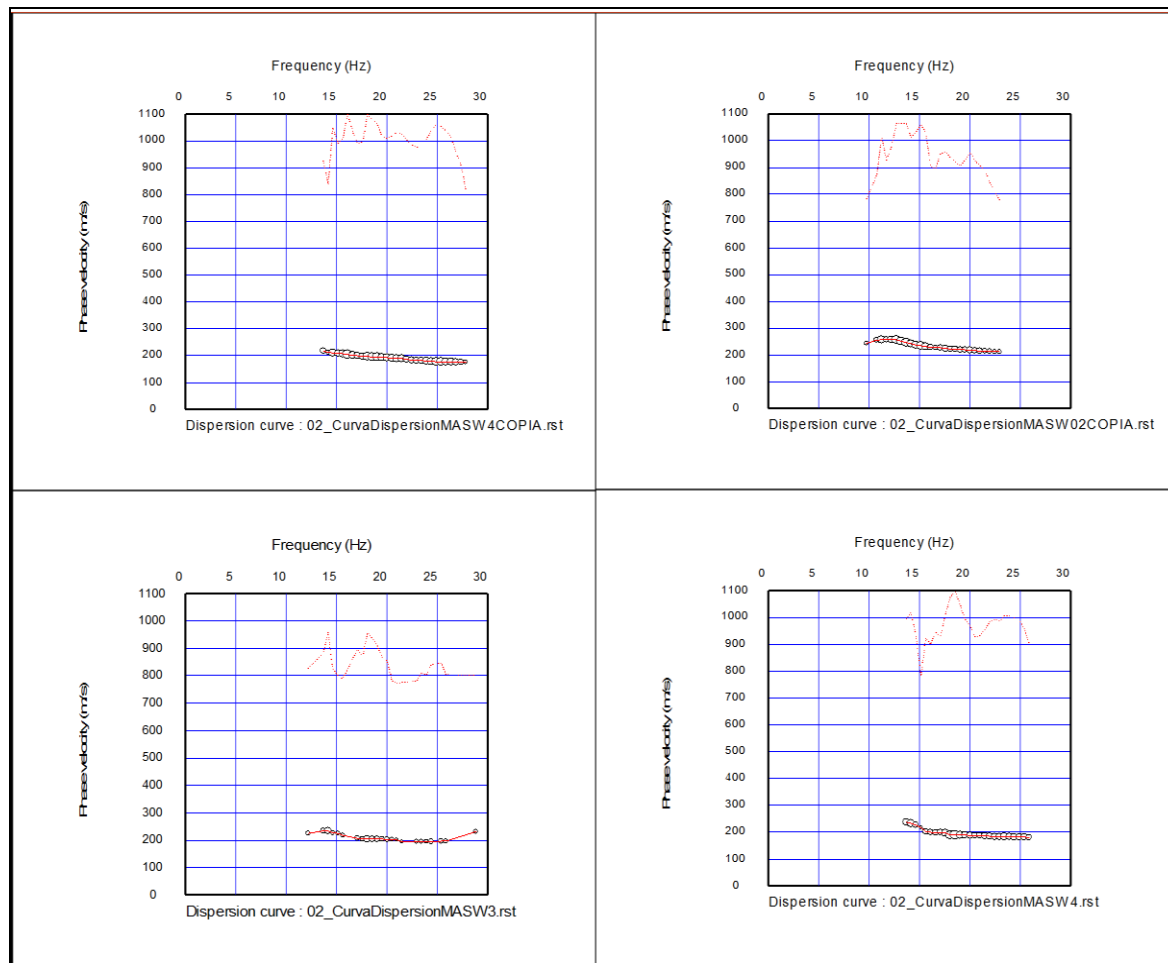
Figura 20. Datos transformados en el dominio de velocidad de fase vs frecuencia aplicando posteriormente a la transformada de Fourier rápido.



Fuente: Propio

Se realiza la inversión de las curvas de dispersión obtenidas ver **Figura 21**. Para generar esta, se realiza un picado (puntos rojos), y se genera la curva de dispersión. Cabe aclarar que esta curva de dispersión corresponde al modo fundamental de las ondas superficiales, las cuales se producen mediante los golpes en la superficie estudiada.

Figura 21. Curva de dispersión para el modo fundamental (línea roja continua) y la relación señal ruido del dato (línea roja a trazos).

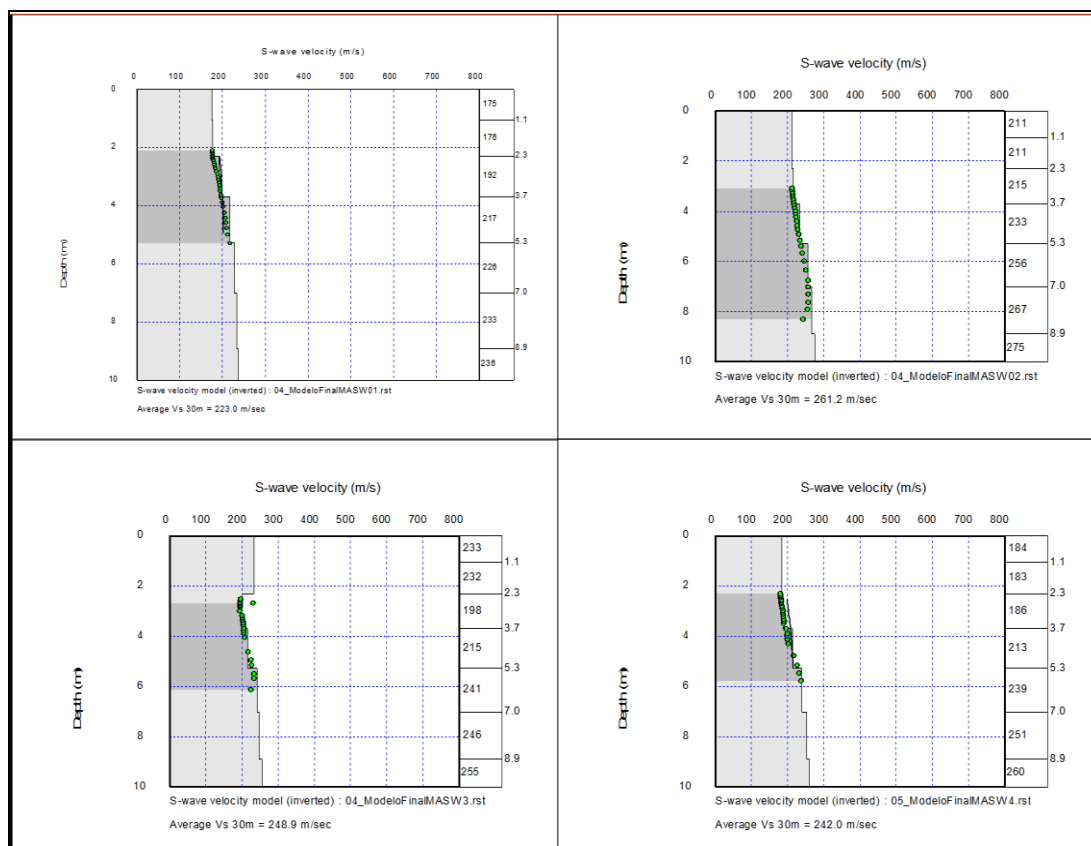


Fuente: Propio.

Para cada punto con información se obtiene un modelo del subsuelo en un perfil 1D (**ver Figura 22**), corresponde al resultado de la inversión de las curvas de dispersión para el modo fundamental encontrado, básicamente este proceso consiste en proponer un modelo inicial basado en la curva de dispersión observada, realizar una iteración para la inversión que en este caso se realiza usando mínimos cuadrados, se calcula un error RMS y se busca reducir el error

RMS modificando el modelo inicial hasta que la curva calculada o teórica se aproxime en un error RMS menor al 10% a la curva observada en campo. Finalmente se procede

Figura 22. Resultado de la inversión de las curvas de dispersión



Fuente: Propio

Objetivo 4 y 5. Módulos dinámicos y capacidad portante de los suelos

Capacidad portante del suelo

La clasificación del tipo de suelo a partir de las velocidades de onda S de intervalo tomadas del resultado del ensayo MASW, sobre la línea LRS 01, LRS 02, LRS 03 y LRS 04 en

el centro o abscisa $X=23\text{m}$, se presenta un valor menor promedio de $V_s = 297 \text{ m/s}$, clasificándolo como suelo tipo D según **(tabla 2)**.

Considerando los resultados de las líneas con las velocidades de onda P y S se puede estimar los módulos dinámicos y mecánicos como capacidad portante (q_a) el cuál es la capacidad que tiene de soportar los esfuerzos, es la presión contacto de medio máxima que se genera entre el cimiento el suelo sin que este último produzca fallas de corte, módulo de Poisson(σ) capacidad que tiene un material que se deforma longitudinalmente al aplicar una carga axial, módulo de rigidez (G) es la relación entre el esfuerzo transversal unitario y el desplazamiento relativo de los planos, es una medida de la deformación cortante, y el módulo de Young (E) que es la relación entre el esfuerzo unitario y la deformación longitudinal unitaria(ver figura 23, 24, 25, 26). A partir de los valores de la velocidad de onda tipo P y tipo S a diferentes profundidades para el centro o abscisa de $X = 23$ metros.

Figura 23. Módulos dinámicos de línea LRS 01

Z (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Peso Especifico (kN/m3)	Capacidad Portante Ultima (kN/m2)	Capacidad Portante Admisible (kN/m2)	Modulo de Subrasante (kN/m3)	gamma	Relacion de Poisson	Modulo de Rigidez a Cortante (kN/m2)	Modulo de Elasticidad (kN/m2)	Modulo Edometrico (kN/m2)	Modulo de Bulk (kN/m2)
0	238.582	175.636	13	228.33	91.33	9133.05	1.85	-0.09	232.75	423.6	252.79	120.02
1	252.954	176.396	13	229.32	91.73	9172.6	2.06	0.03	233.76	481.55	227.52	170.15
2	452.62	192.12	15	288.18	115.27	11527.23	5.55	0.39	293.76	816.65	179.15	1238.59
3	492.289	217.153	15	325.73	130.29	13029.18	5.14	0.38	332.04	916.43	206.24	1264.67
4	492.289	226.981	15	340.47	136.19	13618.88	4.7	0.36	347.07	944.03	219.65	1164.3
5	590.395	226.981	16	363.17	145.27	14526.8	6.77	0.41	370.2	1043.96	216.66	2007.88
6	590.395	233.489	16	373.58	149.43	14943.29	6.39	0.41	380.82	1073.91	226.18	1929.46
7	590.395	233.489	16	373.58	149.43	14943.29	6.39	0.41	380.82	1073.91	226.18	1929.46
8	731.396	236.115	17	401.4	160.56	16055.81	9.6	0.44	409.17	1178.41	228.08	3378.11
9	731.396	236.016	17	401.23	160.49	16049.1	9.6	0.44	409	1177.92	227.98	3376.7
10	836.969	236.016	17	401.23	160.49	16049.1	12.58	0.46	409	1194.28	222.64	4609.92

Fuente: Propio**Figura 24.** Módulos dinámicos de línea LRS 02.

Z (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Peso Especifico (kN/m3)	Capacidad Portante Ultima (kN/m2)	Capacidad Portante Admisible (kN/m2)	Modulo de Subrasante (kN/m3)	gamma	Relacion de Poisson	Modulo de Rigidez a Cortante (kN/m2)	Modulo de Elasticidad (kN/m2)	Modulo Edometrico (kN/m2)	Modulo de Bulk (kN/m2)
0	125.475	213.638	11	235	94	9400.08	0.34	1.26	239.55	1082.77	-61.77	-238.21
1	353.675	213.712	14	299.2	119.68	11967.88	2.74	0.21	304.99	738.08	239.61	428.09
2	371.915	218.202	14	305.48	122.19	12219.29	2.91	0.24	311.4	772.27	237.56	491.68
3	403.71	236.524	14	331.13	132.45	13245.37	2.91	0.24	337.55	837.12	257.51	532.97
4	403.71	248.289	14	347.6	139.04	13904.19	2.64	0.2	354.34	850.42	286.37	464.9
5	502.375	248.289	15	372.43	148.97	14897.34	4.09	0.34	379.65	1017.46	251.6	1047.98
6	502.375	257.303	15	385.95	154.38	15438.17	3.81	0.32	393.43	1038.66	266.31	972.88
7	502.375	257.303	15	385.95	154.38	15438.17	3.81	0.32	393.43	1038.66	266.31	972.88
8	554.148	263.374	16	421.4	168.56	16855.95	4.43	0.35	429.56	1159.81	276.53	1326.05
9	554.148	266.154	16	425.85	170.34	17033.87	4.33	0.35	434.09	1172.04	282.25	1300.96
10	592.218	266.154	16	425.85	170.34	17033.87	4.95	0.37	434.09	1189.41	271.32	1566.06

Fuente: Propio

Figura 25. Módulos dinámicos de línea LRS 03

Z (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Peso Especifico (kN/m3)	Capacidad Portante Ultima (kN/m2)	Capacidad Portante Admisible (kN/m2)	Modulo de Subrasante (kN/m3)	gamma	Relacion de Poisson	Modulo de Rigidez a Cortante (kN/m2)	Modulo de Elasticidad (kN/m2)	Modulo Edometrico (kN/m2)	Modulo de Bulk (kN/m2)
0	212.32	221.352	12	265.62	106.25	10624.89	0.92	6.75	270.77	4196.93	-1556.93	-111.92
1	226.429	220.161	12	264.19	105.68	10567.75	1.06	-7.83	269.31	-3678.77	2377.74	-73.58
2	236.553	201.86	13	262.42	104.97	10496.72	1.37	-0.85	267.5	80.25	499.74	9.9
3	334.82	219.804	14	307.73	123.09	12309.04	2.32	0.12	313.69	702.67	275.37	309.17
4	334.82	231.279	14	323.79	129.52	12951.61	2.1	0.05	330.06	693.13	316.43	254.15
5	343.466	231.279	14	323.79	129.52	12951.61	2.21	0.09	330.06	719.53	302.31	290.21
6	343.466	242.673	14	339.74	135.9	13589.68	2	0	346.32	692.64	346.32	230.88
7	343.466	242.673	14	339.74	135.9	13589.68	2	0	346.32	692.64	346.32	230.88
8	374.461	251.271	14	351.78	140.71	14071.16	2.22	0.09	358.59	781.73	326.21	317.9
9	374.461	255.614	14	357.86	143.14	14314.37	2.15	0.07	364.79	780.65	342.53	299.25
10	376.01	255.614	14	357.86	143.14	14314.37	2.16	0.07	364.79	780.65	339.96	301.85

Fuente: Propio**Figura 26.** Módulos dinámicos de línea LRS 03.

Z (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Peso Especifico (kN/m3)	Capacidad Portante Ultima (kN/m2)	Capacidad Portante Admisible (kN/m2)	Modulo de Subrasante (kN/m3)	gamma	Relacion de Poisson	Modulo de Rigidez a Cortante (kN/m2)	Modulo de Elasticidad (kN/m2)	Modulo Edometrico (kN/m2)	Modulo de Bulk (kN/m2)
0	212.32	190.22	12	228.26	91.3	9130.54	1.25	-1.5	232.68	-232.68	581.7	-19.39
1	226.429	187.694	12	225.23	90.09	9009.33	1.46	-0.59	229.6	188.27	361.68	28.87
2	236.553	186.823	13	242.87	97.15	9714.77	1.6	-0.33	247.57	331.74	331.74	66.35
3	334.82	243.856	14	341.4	136.56	13655.91	1.89	-0.06	348.01	654.26	370.22	194.1
4	334.82	243.856	14	341.4	136.56	13655.91	1.89	-0.06	348.01	654.26	370.22	194.1
5	343.466	243.856	14	341.4	136.56	13655.91	1.98	-0.01	348.01	689.06	351.63	225.09
6	343.466	275.179	14	385.25	154.1	15410.01	1.56	-0.39	392.71	479.11	549.57	89.43
7	343.466	275.179	14	385.25	154.1	15410.01	1.56	-0.39	392.71	479.11	549.57	89.43
8	374.461	288.177	14	403.45	161.38	16137.93	1.69	-0.22	411.26	641.57	506.66	147.56
9	374.461	296.053	14	414.47	165.79	16578.94	1.6	-0.33	422.5	566.15	566.15	113.23
10	376.01	296.053	14	414.47	165.79	16578.94	1.61	-0.32	422.5	574.6	557.29	116.84

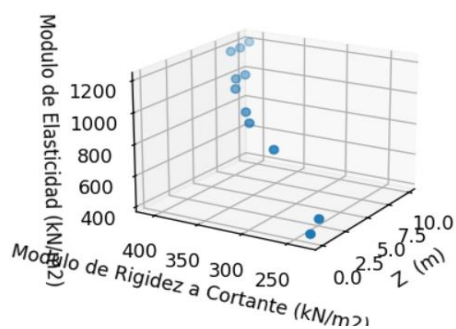
Fuente: Propio

La **Figura 27 (a)** presenta las profundidades del módulo elástico frente al módulo de rigidez, mientras que **(b)** muestra el módulo de volumen frente al módulo de corte en una representación

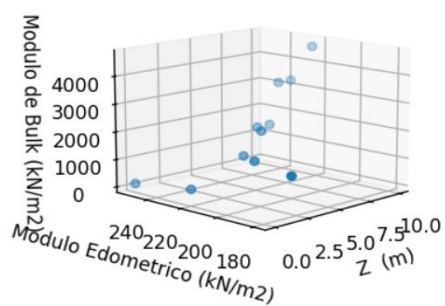
gráfica en 3D con puntos azules. Esta coherencia es evidente, ya que ambos conjuntos de datos muestran una correspondencia creciente a medida que aumenta la profundidad hasta 10m.

Figura 27. Cambios en profundidad de los parámetros elásticos calculados

(a)



(b)



Fuente: Propio.

Resultados

Esta sección se estructura en dos partes: en la primera se determinarán las velocidades de onda P y S correspondientes a cada zona, mientras que en la segunda etapa se calcularán los parámetros del subsuelo mencionados en este estudio de investigación.

Al analizar el primer perfil del suelo para cada una de las líneas (ver **figura 28**), se observó que el material para el primer espesor se encontraba dentro del rango de (300-700) según los porcentajes V_p en la tabla 1 de correlaciones. Este hallazgo indica que el tipo de formación es un suelo residual con una profundidad de 0-2 metros.

Asimismo, al analizar el mismo perfil del suelo para cada línea, se identificó que el material correspondiente al segundo espesor estaba dentro del rango de (400-1200) en la tabla 1 de correlaciones. Esto sugiere que el tipo de formación es un suelo de grava y/o arenas secas con una profundidad de 0-6 metros.

Finalmente, al examinar el primer perfil del suelo para cada línea, se encontró que el material correspondiente al tercer espesor estaba dentro del rango de (1100-2500) en la tabla 1 de correlaciones. Esto indica que el tipo de formación es un suelo de arenas saturadas con una profundidad de 6-10 metros.

La descripción de la composición y las propiedades geotécnicas de cada capa del subsuelo mencionada anteriormente se presenta de la siguiente manera:

Suelo Residual (0-2 metros):

Características Geotécnicas: Posible presencia de arcillas y limos. Tiene una capacidad de carga y drenaje limitados.

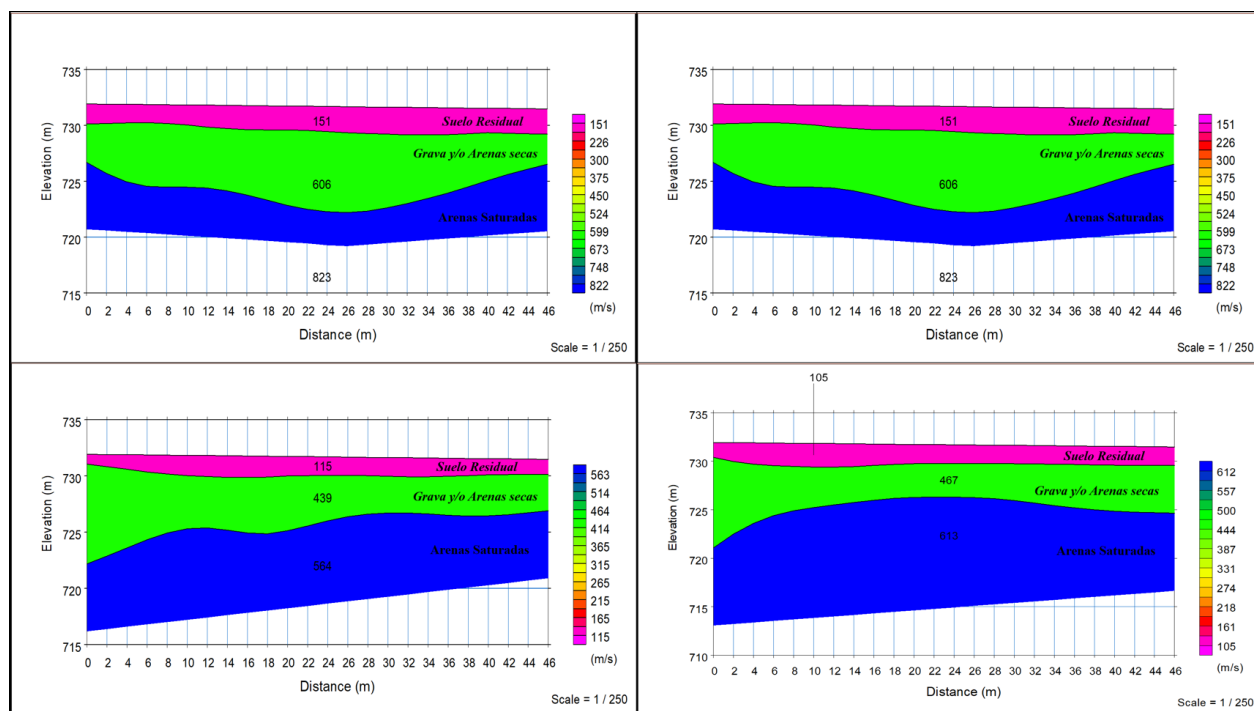
Grava y/o Arenas Secas (2-6 metros):

Características Geotécnicas: Posee una buena capacidad de drenaje y una resistencia mecánica adecuada.

Arenas Saturadas (6-10 metros):

Características Geotécnicas: Tiene una potencialmente baja capacidad de carga debido a la saturación, lo que requiere consideraciones especiales para cimentaciones.

Figura 28. Modelo inicial de tres (3) capas para la tomografía de refracción sísmica en el perfil 01.

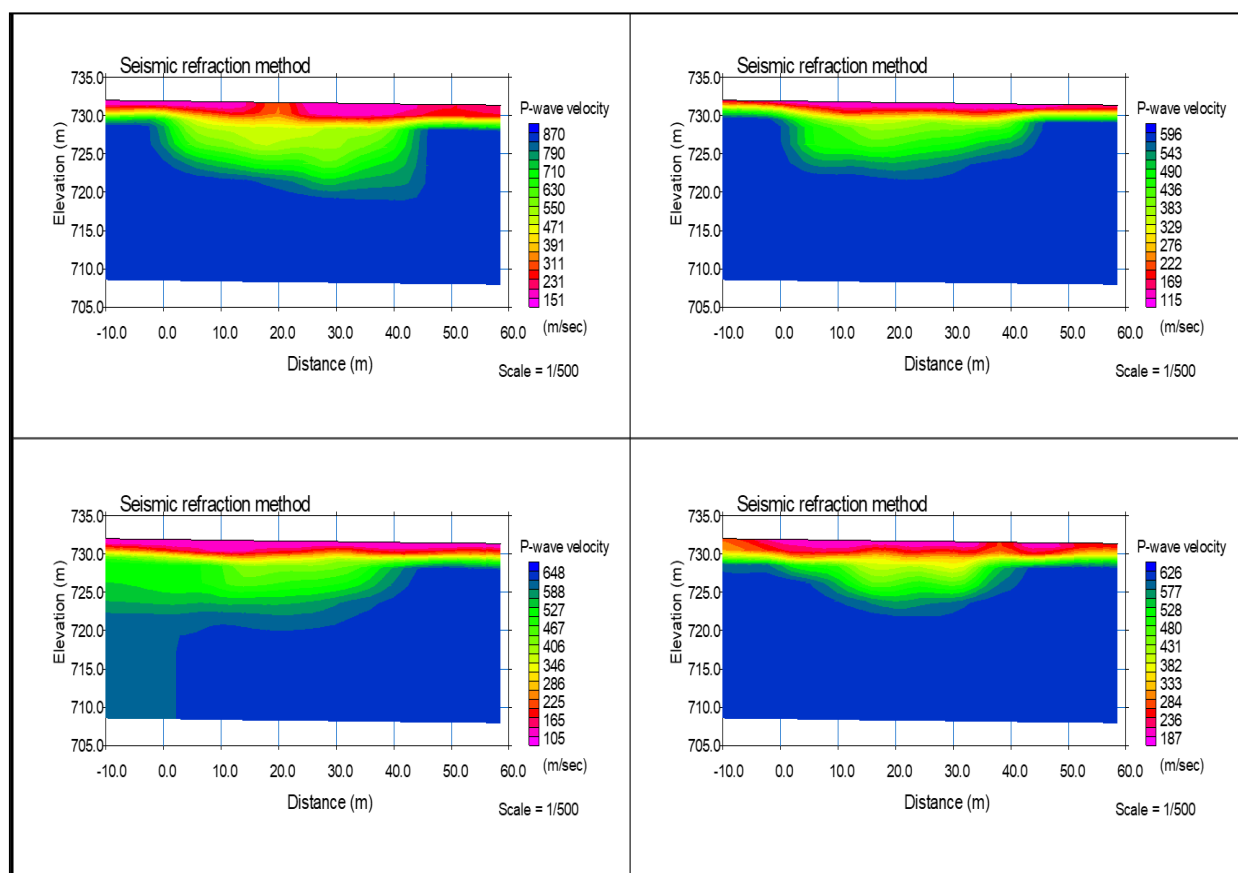


Fuente: propio

La inversión del método de tomografía de refracción sísmica considera el modelo inicial de refracción, el resultado obtenido mantiene el aumento de velocidad en profundidad, la capa 1

se generaliza con velocidades menores a los 900 m/s , la capa 2 o intermedia unas velocidades entre los $900 - 2400 \text{ m/s}$, la última capa o ultimo refractor presentaría una velocidad mayor a los 2400 m/s ; este último refractor se infiere a una profundidad promedio aproximada de 10 metros.

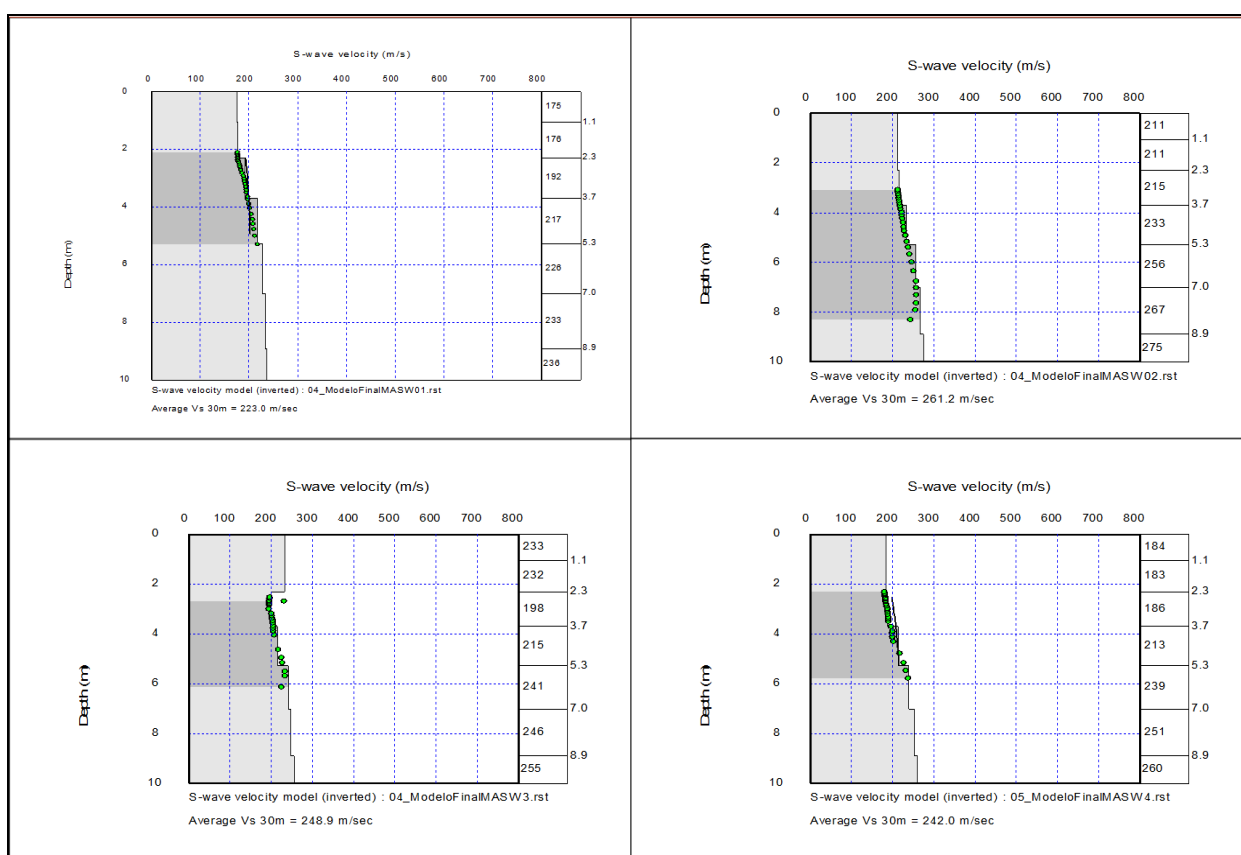
Figura 29. Modelo final del subsuelo aplicando el método de tomografía sísmica.



Fuente: Propio

Con los datos de la **figura 29** se clasifica el tipo de suelo a partir de las velocidades de onda V_s de intervalo tomadas del resultado del ensayo MASW, sobre las líneas sísmicas en el centro o abscisa $X=23m$, presenta un valor promedio de $V_s < 297 \text{ m/s}$ clasificándolo como suelo tipo D.

Figura 30. Clasificación del tipo de suelo a partir de la velocidad de onda S en la abscisa $X=23m$. Para cada una de las líneas.



Nota: Se estiman velocidades menores de los 275 m/s para profundidades inferiores a los 10 metros. **Fuente:** Propio

Conclusiones

El estudio de los fundamentos fisicomatemáticos de la refracción sísmica y el MASW ha permitido comprender en profundidad los principios detrás de estos métodos de tomografía, lo que es esencial para su aplicación en levantamientos sísmicos.

La recopilación de datos a través de la refracción sísmica y el MASW ha sido crucial para obtener una comprensión detallada de las velocidades sísmicas P y S en la zona de interés. Sin embargo, es importante destacar que, durante la toma de datos, se enfrentaron desafíos significativos debido a la alta actividad de transporte en la zona. Esta actividad ha generado interferencias que han impactado en la calidad de los datos recopilados. A pesar de estos obstáculos, los resultados obtenidos aún han permitido identificar contrastes significativos en las propiedades del subsuelo, aunque se debe tener en cuenta esta limitación al interpretar los hallazgos.

A partir de las velocidades sísmicas obtenidas, se ha realizado una evaluación detallada del perfil geotécnico hasta una profundidad de 10 metros. Se han identificado tres tipos distintos de suelos mediante la correlación de las velocidades de onda P con la tabla 1, la cual ofrece criterios para la clasificación de suelos.

En el primer estrato, que abarca desde la superficie hasta los 2 metros de profundidad, se ha determinado la presencia de suelo residual. En el intervalo de 2 a 6 metros de profundidad, se identificaron grava y arenas secas como el tipo de suelo predominante. Finalmente, desde los 6 hasta los 10 metros de profundidad, se observaron arenas saturadas. Este análisis se ha realizado para cada una de las líneas de estudio, proporcionando así una comprensión completa de la composición del suelo en la zona de estudio.

a partir de las velocidades de onda V_s de intervalo tomadas del resultado del ensayo MASW, sobre las líneas sísmicas en el centro o abscisa $X=23\text{m}$, presenta un valor promedio de $V_s < 297 \text{ m/s}$ clasificándolo como suelo tipo D, los suelos de tipo D con respecto a la tabla 2 suelen presentar características específicas que los distinguen, como una baja capacidad portante y una alta compresibilidad, lo que sugiere una respuesta sísmica diferente en comparación con otros tipos de suelos. Además, estos suelos pueden ser más susceptibles a la consolidación y a la deformación bajo cargas estáticas o dinámicas.

El análisis realizado sobre los módulos dinámicos calculados ha permitido evaluar la capacidad portante de los suelos en la zona de interés, lo que es fundamental para la ingeniería geotécnica y el diseño de estructuras resistentes a cargas sísmicas.

La creación del programa en Python para mecánica de suelos fue fundamental para determinar los módulos dinámicos y la capacidad portante de los suelos ofrece una solución eficiente y automatizada para ingenieros y profesionales en geotecnia y geofísica.

Recomendaciones

Se sugiere explorar la aplicación de la metodología desarrollada en esta investigación en diferentes contextos geográficos y geológicos para validar su eficacia y generalización.

Se recomienda investigar posibles mejoras o refinamientos en la metodología utilizada, incluyendo la inclusión de técnicas complementarias o la optimización de los procedimientos de adquisición y procesamiento de datos, con el fin de aumentar la precisión y confiabilidad de los resultados.

Es importante realizar validaciones experimentales adicionales, como pruebas de campo o comparaciones con datos de laboratorio, para fortalecer la robustez de la metodología y aumentar su aceptación en la comunidad científica y profesional.

Se sugiere la creación de herramientas de software o aplicaciones prácticas que faciliten la implementación de la metodología propuesta en proyectos de ingeniería geotécnica, con el objetivo de realizar análisis de suelos más eficientes y precisos en el campo.

Se recomienda organizar talleres, seminarios o cursos de capacitación dirigidos a profesionales de la ingeniería geotécnica para difundir los resultados de esta investigación y promover su aplicación práctica en la industria, con el fin de cerrar la brecha entre la investigación académica y la práctica profesional.

Se anima a futuros investigadores a seguir explorando esta línea de investigación y abordar preguntas aún no resueltas o áreas de mejora identificadas durante este estudio, con el objetivo de mantener el avance del conocimiento en el campo de la caracterización de suelos mediante técnicas sísmicas.

Referencias

- alemán, j., cañas, d., & clavijo, y. (2017). *caracterizacion geofísica del subsuelo en el relleno sanitario regional “la cortada”, pamplona norte de santander, usando metodos de refraccion sismica, análisis multicanal de ondas superficiales (masw) y tomografía de resistividad eléctrica(trs).*
- boada, j. p. (2018). *realización de actividades y participación en proyectos para la exploración geofísica somera aplicada a la ingeniería civil en la empresa geologia y servicios ltda (gys), ubicada en la ciudad de bucaramanga, departamento de santander.*
- chambi chambi, j., carita montero, r., & berrocal tito, m. (2013). reconstrucción de imágenes para tomografía de pozo a pozo con el método de levenberg marquardt. *revista de investigación de física*, 16(02), 1-9. <https://doi.org/10.15381/rif.v16i02.8680>
- gardner, g. h. f., gardner, l. w., & gregory, a. r. (1974). formation velocity and density—the diagnostic basics for stratigraphic traps. *geophysics*, 39(6), 770-780. <https://doi.org/10.1190/1.1440465>
- gómez, b. d., ronald, h., vega, b. r., luis, f., chung, m. t., & roberto, c. (2021). *para optar el título profesional de ingeniero civil.*
- guamán, j. d. m. (2022). *determinación y correlación de parámetros elásticos de las capas del subsuelo aplicando metodos geofísicos y geotécnicos.*
- magmapmanual.pdf*. (s. f.).
- (dwight e. ward y richard goldsmith y_andrés jimeno v., jaime cruz b., hernán restrepo y_eduardo gómez r., de ingeominas plancha geologia 120, 1977)

- martinez-ovallos, c. a., gallardo-amaya, r. j., & afanador-garcía, n. (2018). determinación de los parámetros dinámicos en depósitos sedimentarios de ocaña norte de santander, mediante métodos geofísicos. *revista ingenio*, 15(1), 51-57. <https://doi.org/10.22463/2011642x.3139>
- montealegre, y. y., caro, n. y., patiño, y. m., rozo, y., torres, j. a., gutierrez, d. a., contreras, m. a., & gomez, j. c. (2018). *caracterización geofísica y geotécnica usando refracción sísmica y tomografía de resistividad eléctrica. caso de estudio: barrio juan xxiii, (pamplona-norte de santander)*.
- nascimento, f. (2010). *universidade federal fluminense instituto de geociências graduação em geofísica*.
- reglamento colombiano de construccion sismo resistente nsr10(2010)*
- pico, k. d. g., & huertas, l. g. b. (2016). *caracterización geofísica del subsuelo mediante las técnicas de refracción sísmica, reflexión sísmica, masw y remi en depósitos superficiales y zonas críticas de la universidad de pamplona*.
- seisimager2d_manual_v3.3.pdf*. (s. f.).
- telford, w. m., geldart, l. p., & sheriff, r. e. (2004). *applied geophysics* . cambridge univ. pr.
- tezcan, s. s., ozdemir, z., & keceli, a. (2009). seismic technique to determine the allowable bearing pressure for shallow foundations in soils and rocks. *acta geophysica*, 57(2), 400-412. <https://doi.org/10.2478/s11600-008-0077-z>
- título a nsr-10 del decreto 926 del 19032010_0, 2010_*

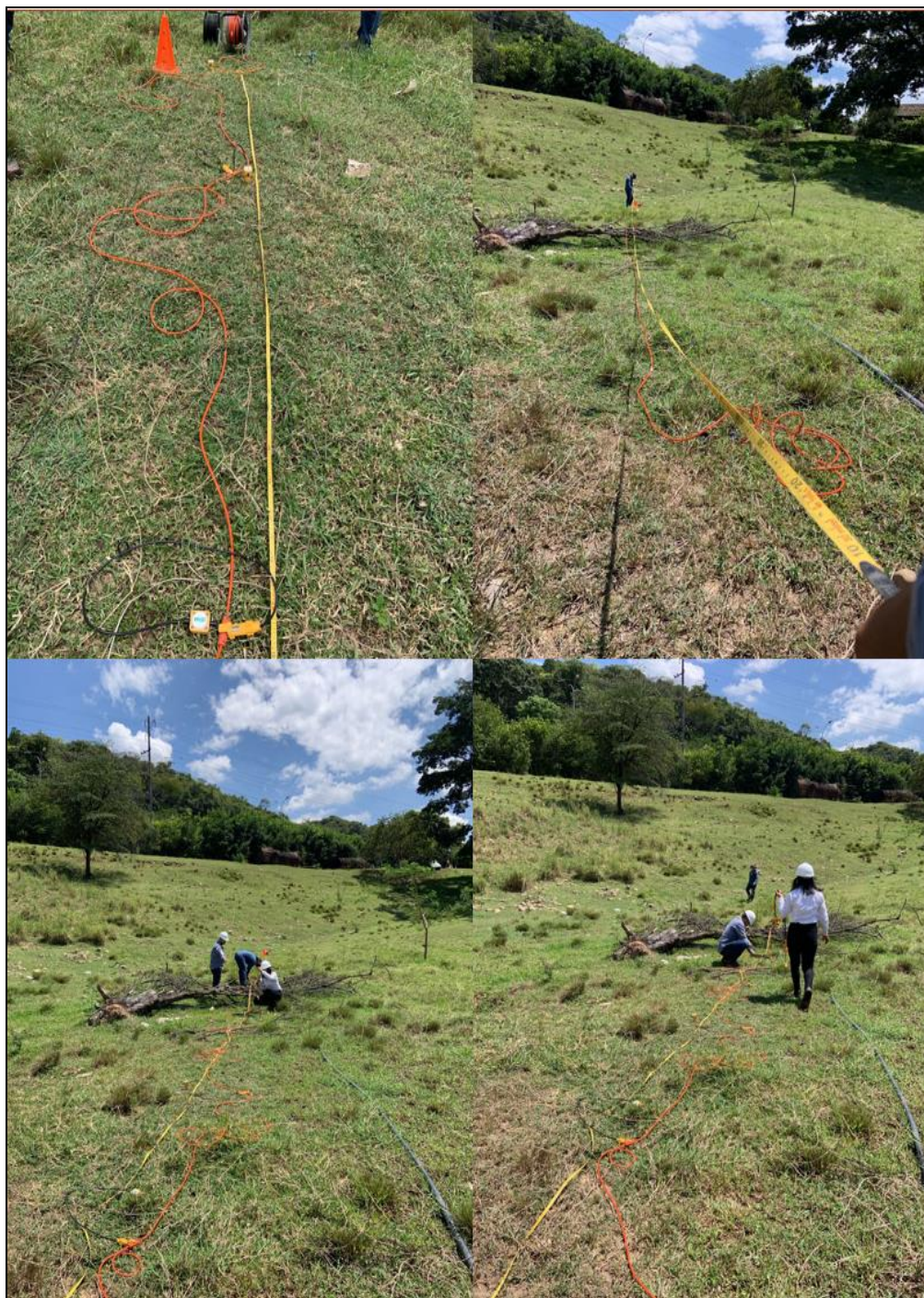
Apéndices

Apéndice 1. evidencia toma de datos para las 4 líneas de refracción sísmica y MASW



Fuente: propio

Apéndice 2. evidencia toma de datos para las 4 líneas de refracción sísmica y MASW



Fuente: propio

Apéndice 3. evidencia toma de datos para las 4 líneas de refracción sísmica y MASW



Fuente: propio

Apéndice 4. evidencia toma de datos para las 4 líneas de refracción sísmica y MASW



Fuente: propio

Programa Python para determinar módulos dinámicos y capacidad portante de los suelos.

***Apéndice 5.** Mi contribución en esta tesis consistió en desarrollar un programa en Python que permite calcular los módulos dinámicos y la capacidad portante de los suelos de manera rápida y efectiva. Las ventajas de este programa incluyen:*

- **Facilidad de uso:** Gracias a una sintaxis simple y legible, el programa es accesible incluso para aquellos sin experiencia extensa en programación.
- **Amplia disponibilidad de bibliotecas:** Se aprovecha de bibliotecas especializadas como NumPy y SciPy, lo que simplifica la implementación de cálculos complejos.
- **Flexibilidad:** El programa es adaptable a diferentes necesidades y contextos gracias a la versatilidad de Python como lenguaje de programación.
- **Comunidad activa:** Python cuenta con una gran comunidad de desarrolladores que proporcionan soporte y recursos, facilitando la resolución de problemas y el aprendizaje continuo.
- **Integración con otras herramientas:** Puede integrarse fácilmente con software existente, lo que amplía su utilidad en entornos de ingeniería civil y geotécnica.
- **Portabilidad:** Funciona en diversas plataformas, lo que permite su ejecución en diferentes entornos informáticos sin requerir modificaciones significativas.

Estas características hacen que el programa Python sea una herramienta valiosa para el cálculo de módulos dinámicos y capacidad portante en el campo de la geotecnia e ingeniería civil.

Se presenta un programa en Python que utiliza una interfaz gráfica para agilizar los procesos prácticos y visualizar los resultados mediante gráficos 3D. Para su desarrollo, se emplearon diversas bibliotecas como pandas, numpy, tkinter y matplotlib.

Se creó una ventana principal utilizando la biblioteca tkinter, donde se agregaron widgets o elementos de marco (frames) que se incorporaron dentro de esta ventana. Cada marco contiene líneas de código específicas que facilitan la entrada y salida de información de manera gráfica, permitiendo la interacción entre el usuario y la interfaz.

- *Programa en Python que permite determinar módulos dinámicos y capacidad portante de los suelos.*

```
from tkinter import Label, Button, Frame, messagebox, filedialog, ttk, Scrollbar, Entry,
VERTICAL, HORIZONTAL
import tkinter as tk
import pandas as pd
from mpl_toolkits.mplot3d import Axes3D
import matplotlib.pyplot as plt
from matplotlib.backends.backend_tkagg import FigureCanvasTkAgg

#-----Creando la Raiz del Programa-----
raiz=tk.Tk()
raiz.config(bg="navy")
raiz.geometry("600x400")
raiz.minsize(width=600, height=400)
raiz.title("Calculo de propiedades dinamica")

raiz.columnconfigure(1,weight=25)
raiz.rowconfigure(1,weight=25)
raiz.columnconfigure(1, weight=1)
raiz.rowconfigure(2,weight=1)

#-----Creando los elemenos Frame de la Raiz-----

# Elemento Frame 1
frame1 = Frame(raiz)
```

```
frame1.grid(column=0, row=0, sticky="nsew")
frame1.columnconfigure(0, weight=1)
frame1.rowconfigure(0, weight=1)
```

```
# Elemento Frame 2
```

```
frame2 = Frame(raiz, bg="gray26")
frame2.grid(column=1, row=0, sticky="nsew")
frame2.columnconfigure(0, weight=1)
frame2.rowconfigure(0, weight=1)
```

```
# Elemento Frame 3
```

```
frame3 = Frame(raiz, bg="gray26")
frame3.grid(column=0, row=1, sticky="nsew")
frame3.columnconfigure(0, weight=1)
```

```
# Elemento Frame 4
```

```
frame4 = Frame(raiz)
frame4.grid(column=1, row=1, sticky="nsew")
frame4.columnconfigure(0, weight=1)
frame4.rowconfigure(0, weight=1)
frame4.columnconfigure(1, weight=1)
frame4.rowconfigure(1, weight=1)
frame4.columnconfigure(2, weight=1)
frame4.rowconfigure(0, weight=1)
frame4.columnconfigure(3, weight=10)
```

```
#-----FRAME 1-----#
```

```
# Etiquetas para los cuadros de ingreso de datos
```

```
factorseLabel = Label(frame1, text = "Factor de seguridad n:")
factorseLabel.grid(row=0, column=0, sticky="w", padx=10, pady=10)
```

```
anchocimiLabel = Label(frame1, text = "Ancho del cimient B (m):")
anchocimiLabel.grid(row=1, column=0, sticky="w", padx=10, pady=10)
```

```
asentamientoLabel = Label(frame1, text = "Asentamiento maximo esperado  $\Delta$  (m):")
asentamientoLabel.grid(row=2, column=0, sticky="w", padx=10, pady=10)
```

```
gravedadLabel = Label(frame1, text = "Graverdad g (m/s2):")
gravedadLabel.grid(row=3, column=0, sticky="w", padx=10, pady=10)
```

```
comentariosLabel = Label(frame1, text = "Comentarios:")
```

```

comentariosLabel.grid(row=4, column=0, sticky="w", padx=10, pady=10)

# Cuadro ingreso de datos

cuadroFactorse = Entry(frame1)
cuadroFactorse.grid(row=0, column=1, padx=5, pady=5)
cuadroFactorse.config(fg="red", justify="center")

cuadroAnchocimi = Entry(frame1)
cuadroAnchocimi.grid(row=1, column=1, padx=10, pady=10)
cuadroAnchocimi.config(fg="red", justify="center")

cuadroAsentamiento = Entry(frame1)
cuadroAsentamiento.grid(row=2, column=1, padx=10, pady=10)
cuadroAsentamiento.config(fg="red", justify="center")

cuadroGravedad = Entry(frame1)
cuadroGravedad.grid(row=3, column=1, padx=10, pady=10)
cuadroGravedad.config(fg="red", justify="center")

cuadroComentario = Entry(frame1)
cuadroComentario.grid(row=4, column=1, padx=10, pady=10)
cuadroComentario.config(fg="red", justify="center")

#-----FRAME 2 (visualizacion de los datos de excel)-----
--#

tabla = ttk.Treeview(frame2,height=10)
tabla.grid(column=0, row=0,sticky="nsew")

ladox = Scrollbar(frame2, orient=HORIZONTAL,command= tabla.xview)
ladox.grid(column=0,row=1,sticky="ew")

ladoy = Scrollbar(frame2, orient=VERTICAL,command= tabla.yview)
ladoy.grid(column=1,row=0,sticky="ns")

tabla.configure(xscrollcommand=ladox.set, yscrollcommand=ladoy.set)

estilo = ttk.Style(frame3)
estilo.theme_use("clam") # ('clam', 'alt', 'default', 'classic')
estilo.configure(".",font=("Times new roman", 14),foreground ="black", background
="white")

```

```
estilo.map("Treeview", background=[("selected", "green2")], foreground = [("selected",
"black")]) )
```

```
#-----FRAME 3-----#
```

```
# Funcion del boton abrir archivo
```

```
def abrir_archivo():
    global archivo_seleccionado # Indicar que estás usando la variable global
    archivo = filedialog.askopenfilename(title="Abrir", initialdir="c:",
                                         filetypes=(("Ficheros de Excel", "*.xlsx"),
                                                    ("Ficheros de Texto", "*.txt"),
                                                    ("Todos los Ficheros", "*.*")))
    if archivo: # Verifica si se seleccionó un archivo
        archivo_seleccionado = archivo
        #indica['text'] = archivo
```

```
# Funcion del boton mostrar y limpiar
```

```
def datos_excel():
    global archivo_seleccionado # Indicar que estás usando la variable global

    if not archivo_seleccionado: # Verifica si se seleccionó un archivo
        messagebox.showerror("Información", "Primero selecciona un archivo")
        return None

    try:
        df = pd.read_excel(archivo_seleccionado)
        archivo_seleccionado = df # Asignar el DataFrame a la variable global
    except ValueError:
        messagebox.showerror("información", "Formato Incorrecto")
        return None
    except FileNotFoundError:
        messagebox.showerror("Información", "El archivo está malogrado")
        return None
```

```
Limpiar()
```

```
tabla["column"] = list(df.columns)
```

```

tabla["show"] = "headings" # Encabezado

for columna in tabla["column"]:
    tabla.heading(columna, text=columna)

df_fila = df.to_numpy().tolist()
for fila in df_fila:
    tabla.insert("", "end", values=fila)

return df # Devolver el DataFrame

def Limpiar():
    tabla.delete(*tabla.get_children())

# Funcion del boton calcular datos

def datos_calculados():
    global archivo_seleccionado # Indicar que estás usando la variable global
    global df

    n = float(cuadroFactorse.get())
    b = float(cuadroAnchocimi.get())
    d = float(cuadroAsentamiento.get())
    g = float(cuadroGravedad.get())

    # PROCESAMIENTO
    # Paso 1 - Calculo de peso especifico
    #l = 3.2*(vp)**0.25

    archivo_seleccionado["Peso Especifico (kN/m3)"] = round(3.2*(archivo_seleccionado['Vp
(m/s)']**0.25)

    # Paso 2 - Coeficiente de correccion por ancho de cimiento

    if (0 <= b <= 1.20):
        beta = 1

    elif (1.20 < b <= 3.00):

        beta = 1.13-(0.11*b)

    else:

```

```

    beta = 0.83 - (0.01*b)

# Paso 3 - Calculo Capacidad Portante y Modulo de subrasante

# qf = (0.10*l*vs*beta)

    archivo_seleccionado["Capacidad Portante Ultima (kN/m2)"] =
round((0.10*(archivo_seleccionado['Peso Especifico (kN/m3)'])*(archivo_seleccionado['Vs
(m/s)'])*beta),2)

    # qa = qf/n
    archivo_seleccionado["Capacidad Portante Admisible (kN/m2)"] =
round(archivo_seleccionado['Capacidad Portante Ultima (kN/m2)']/n,2)

    # ks = 4*l*vs
    archivo_seleccionado["Modulo de Subrasante (kN/m3)"] =
round((4*archivo_seleccionado['Peso Especifico (kN/m3)']*archivo_seleccionado['Vs (m/s)']),2)

# Paso 4 - Calculo de relacion de poisson, Modulo de rigidez a Cortate y Modulo de
elasticidad

    # gamma = (vp/vs)**2
    archivo_seleccionado['gamma'] = round((archivo_seleccionado['Vp
(m/s)']/archivo_seleccionado['Vs (m/s)'])**2,2)

    # v = (gamma - 2)/(2*(gamma - 1))
    archivo_seleccionado['Relacion de Poisson'] = round((archivo_seleccionado['gamma']-
2)/(2*(archivo_seleccionado['gamma']-1)),2)

    # mrc = (l*(vs)**2)/g
    archivo_seleccionado['Modulo de Rigidez a Cortante (kN/m2)'] =
round((archivo_seleccionado['Peso Especifico (kN/m3)']*archivo_seleccionado['Vs (m/s)'])/g,2)

    # e = 2*(1+v)*mrc
    archivo_seleccionado['Modulo de Elasticidad (kN/m2)'] = round((2*(1 +
archivo_seleccionado['Relacion de Poisson'])*archivo_seleccionado['Modulo de Rigidez a
Cortante (kN/m2)']),2)

# Paso 5 - Modulo edometrico y Modulo de Bulk

    # ec = gamma*e/(2*((3*gamma) - 4))
    archivo_seleccionado['Modulo Edometrico (kN/m2)'] =
round((archivo_seleccionado['gamma']*archivo_seleccionado['Modulo de Elasticidad
(kN/m2)'])/(2*((3*archivo_seleccionado['gamma'])-4)),2)

```

```
# k = e*(gamma - 1)/3
archivo_seleccionado['Modulo de Bulk (kN/m2)'] = round(archivo_seleccionado['Modulo
de Elasticidad (kN/m2)']*(archivo_seleccionado['gamma'] - 1)/3,2)
```

```
Limpiar()
```

```
try:
    df = archivo_seleccionado
except ValueError:
    messagebox.showerror("información", "Formato Incorrecto")
    return None
except FileNotFoundError:
    messagebox.showerror("Información", "El archivo está malogrado")
    return None
```

```
Limpiar()
```

```
tabla["column"] = list(df.columns)
tabla["show"] = "headings" # Encabezado
```

```
for columna in tabla["column"]:
    tabla.heading(columna, text=columna)
```

```
df_fila = df.to_numpy().tolist()
for fila in df_fila:
    tabla.insert("", "end", values=fila)
```

```
return df # Devolver el DataFrame
```

```
def Limpiar():
    tabla.delete(*tabla.get_children())
```

```
# Funcion del boton exportar datos
```

```
def exportar_datos():
```

```
    global archivo_seleccionado # Indicar que estás usando la variable global
    archivo1 = filedialog.asksaveasfilename(title="Guardar", initialdir="c:",
        filetypes=(("Ficheros de Excel", "*.xlsx"),
```

```

        ("Ficheros de Texto", "*.txt"),
        ("Todos los Ficheros", "*.*")),defaulttextension=".xlsx")
if archivo1: # Verifica si se seleccionó un archivo
    archivo_seleccionado = archivo1
    #indica['text'] = archivo

df.to_excel(archivo1, sheet_name = 'CALCULOS', engine = 'openpyxl')

#-----Creacion de botones de ejecucion en el frame 3_-----
-----

boton1 = Button(frame3, text="Abrir", bg="green2", command=abrir_archivo)
boton1.grid(row=1, column=0, sticky="nsew", padx=10, pady=10)

boton2 = Button(frame3, text="Mostar", bg="magenta", command=datos_excel)
boton2.grid(row=1, column=1, sticky="nsew", padx=10, pady=10)

boton3 = Button(frame3, text="Limpiar", bg="green2", command=Limpiar)
boton3.grid(row=1, column=2, sticky="nsew", padx=10, pady=10)

boton4 = Button(frame3, text="Calcular Datos dincamicos", command=datos_calculados)
boton4.grid(row=1, column=4, sticky="nsew", padx=10, pady=10)

boton5 = Button(frame3, text="Exportar Calculos", command= exportar_datos)
boton5.grid(row=1, column=5, sticky="nsew", padx=10, pady=10)

#indica = Label(frame3, fg="white",bg="gray26", text="Ubicacion del Archivo",
font=("Times new roman",8,"bold"))
#indica.grid(row=1, column=3)

#-----FRAME 4-----#

#archivo = 'C:/Users/Yair/Documents/Escritorio/PYTHON_DEAN/PPROGRAMAS DE
PYTHON/CALCULOS_EXPORTADOS.xlsx'

#df = pd.read_excel(archivo)

def update_plot():
    # Obtener las variables seleccionadas

```

```

x_variable = x_variable_combobox.get()
y_variable = y_variable_combobox.get()
z_variable = z_variable_combobox.get()

# Limpiar el gráfico actual
ax.cla()

# Datos de ejemplo (reemplaza con tus propios datos)
x = df[x_variable]
y = df[y_variable]
z = df[z_variable]

# Graficar los datos en el gráfico 3D
ax.scatter(x, y, z)

# Configurar etiquetas de los ejes
ax.set_xlabel(x_variable)
ax.set_ylabel(y_variable)
ax.set_zlabel(z_variable)

# Agregar etiquetas de los ejes
#ax.text2D(0.05, 0.95, x_variable, transform=ax.transAxes)
#ax.text2D(0.05, 0.9, y_variable, transform=ax.transAxes)
ax.text2D(0.05, 0.85, "Grafico de variable")

# Actualizar el widget de lienzo
canvas.draw()

# Crear un Frame para el gráfico
graph_frame = ttk.Frame(frame4)
graph_frame.grid(row=2, column=1, columnspan=4, rowspan=2)

# Crear etiquetas y combobox para seleccionar variables
variables_label = ttk.Label(frame4, text="Selecciona las variables para cada eje:")
variables_label.grid(row=0, column=0, columnspan=4, pady=10)

# Lista de variables (reemplaza con tus propias variables)
variables = ["Z (m)", "Vp (m/s)", "Vs (m/s)", "Peso Especifico (kN/m3)",
            "Capacidad Portante Ultima (kN/m2)", "Capacidad Portante Admisible (kN/m2)",
            "Modulo de Subrasante (kN/m3)", "gamma", "Relacion de Poisson", "Modulo de
Rigidez a Cortante (kN/m2)",
            "Modulo de Elasticidad (kN/m2)", "Modulo Edometrico (kN/m2)", "Modulo de Bulk
(kN/m2)"]

```

```

# Combobox para el eje x
x_variable_combobox = ttk.Combobox(frame4, values=variables)
x_variable_combobox.set(variables[0])
x_variable_combobox.grid(row=1, column=0, padx=10, sticky=tk.W)

# Combobox para el eje y
y_variable_combobox = ttk.Combobox(frame4, values=variables)
y_variable_combobox.set(variables[1])
y_variable_combobox.grid(row=1, column=1, padx=10, sticky=tk.W)

# Combobox para el eje z
z_variable_combobox = ttk.Combobox(frame4, values=variables)
z_variable_combobox.set(variables[2])
z_variable_combobox.grid(row=1, column=2, padx=10, sticky=tk.W)

# Botón para actualizar el gráfico
update_button = ttk.Button(frame4, text="Actualizar Gráfico", command=update_plot)
update_button.grid(row=1, column=3, pady=10, sticky=tk.W)

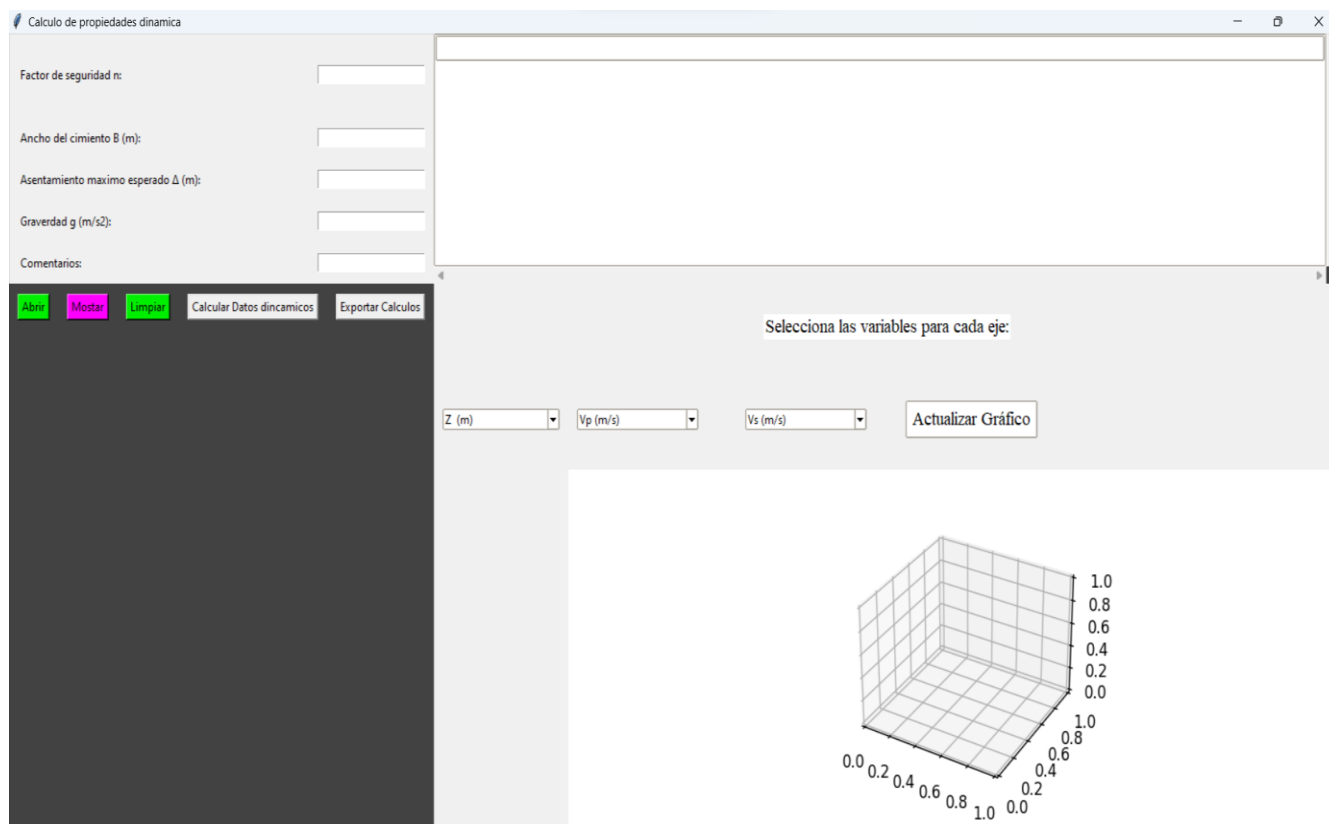
# Crear un gráfico 3D inicial
fig = plt.Figure(figsize=(8, 3), dpi=120)
ax = fig.add_subplot(111, projection='3d')
canvas = FigureCanvasTkAgg(fig, master=graph_frame)
canvas_widget = canvas.get_tk_widget()
canvas_widget.pack(fill=tk.BOTH, expand=True)

#-----Iniciar el bucle principal

raiz.mainloop()

```

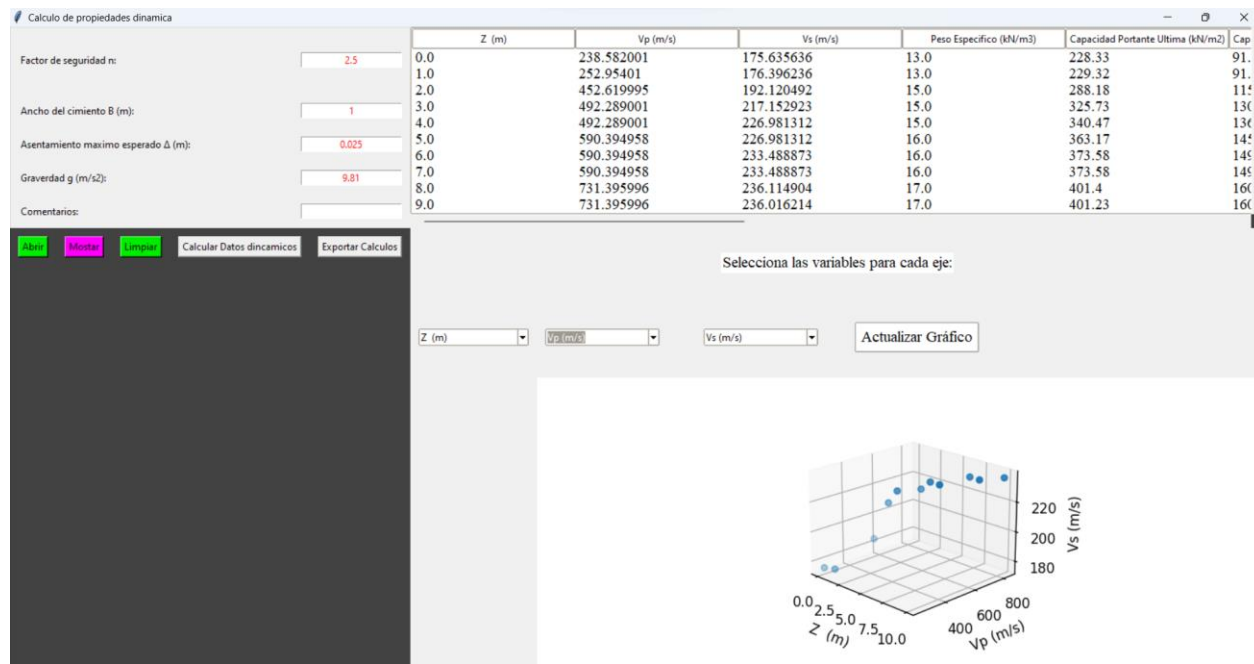
Apéndice 6. Ejecución del programa



Fuente: Propio.

En la figura anterior se muestra la interfaz, en la que se pueden agregar las velocidades de onda P y S para calcular los módulos dinámicos, parametrizando el factor de seguridad (n), el ancho del cimientto Δ (m), y la gravedad g (m/s^2) según corresponda en el titulo B de la NSR 10.

Apéndice 7. Determinación de los módulos dinámicos y capacidad portante.



Fuente: propio

Una vez que se abre el documento que contiene las velocidades de onda P y S, el programa realiza los cálculos de los módulos dinámicos de manera rápida y eficiente. Además, ofrece la posibilidad de exportar los cálculos al equipo. En la parte inferior derecha, los usuarios pueden seleccionar las variables para cada eje y visualizar los resultados en tres dimensiones.