



UNIVERSIDAD REGIONAL AMAZONICA IKIAM

FACULTAD CIENCIAS DE LA TIERRA Y AGUA

CARRERA DE GEOCIENCIAS

**OBTENCIÓN DEL MODELO BIDIMENSIONAL DE LA VELOCIDAD
DE ONDAS CON LA TÉCNICA MASW EN EL SENDERO DE LOS
MONOS DE LA RESERVA COLONSO – CHALUPAS EN NAPO –
ECUADOR**

Proyecto de investigación previo a la obtención del Título de:

INGENIERO EN GEOCIENCIAS

AUTORA:

PAULINA MARÍA ABRIL COBOS

Napo-Ecuador

2023

UNIVERSIDAD REGIONAL AMAZONICA IKIAM

FACULTAD CIENCIAS DE LA TIERRA Y AGUA

CARRERA DE GEOCIENCIAS

**OBTENCIÓN DEL MODELO BIDIMENSIONAL DE LA VELOCIDAD
DE ONDAS CON LA TÉCNICA MASW EN EL SENDERO DE LOS
MONOS DE LA RESERVA COLONSO – CHALUPAS EN NAPO –
ECUADOR**

Proyecto de investigación previo a la obtención del Título de:

INGENIERA EN GEOCIENCIAS

AUTORA: PAULINA MARÍA ABRIL COBOS

TUTOR: PhD. SEBASTIAN ARAUJO

Napo-Ecuador

2023

DECLARACION DE DERECHO DE AUTOR, AUTENTICIDAD Y RESPONSABILIDAD

Yo, Paulina María Abril Cobos con documento de identidad N° 0105125322, declaro que los resultados obtenidos en la investigación que presento en este documento final, previo a la obtención del título Ingeniería en Geociencias, son absolutamente inéditos, originales, auténticos y personales.

En virtud de lo cual, el contenido, criterios, opiniones, resultados, análisis, interpretaciones, conclusiones, recomendaciones y todos los demás aspectos vertidos en la presente investigación son de mi autoría y de mi absoluta responsabilidad.

Tena, 21 de junio de 2023



Paulina María Abril Cobos

0105125322

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Certifico que el trabajo de integración curricular titulado: “Obtención del modelo bidimensional de la velocidad de onda S con la técnica MASW en el Sendero de los Monos de la Reserva Colonso – Chalupas en Napo –Ecuador”, en la modalidad de: artículo original, fue realizado por: Paulina María Abril Cobos, bajo mi dirección.

El mismo ha sido revisado en su totalidad y analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto, cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad Regional Amazónica Ikiám, para su entrega y defensa.

Tena, 21 de junio de 2023



José Sebastián Araujo Soria

1802672871

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACION EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Yo, Paulina María Abril Cobos, con documento de identidad N° 0105125322, en calidad de autor/a y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación: “Obtención del modelo bidimensional de la velocidad de onda S con la técnica MASW en el Sendero de los Monos de la Reserva Colonso – Chalupas en Napo –Ecuador”, de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN, reconozco a favor de la Universidad Regional Amazónica Ikiam una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Así mismo autorizo a la Universidad Regional Amazónica Ikiam para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el Repositorio Institucional de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación superior.

Tena, 21 de junio de 2023



Paulina María Abril Cobos

0105125322

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a Dios por darme salud, vida y la fuerza necesaria para concluir esta etapa. También agradezco a todos mis docentes de la Universidad por la formación académica recibida en todos estos años, de manera especial a mi tutor PhD. Sebastián Araujo por haberme guiado en todo este proceso de investigación. A mi familia de manera especial a mis padres Vicente Abril y Piedad Cobos y a mis hermanas Anita y Jessica por el apoyo emocional y psicológico que me dieron en todos estos años de vivir sola al ser una etapa dura para mí. A mis familiares que ya no están con nosotros Jorge, Henry y Gilberto. Finalmente, a Roberto y sus padres por el apoyo brindado y demás amigos que se conocen en el transcurso de la universidad, construyendo una amistad verdadera.

TABLA DE CONTENIDO

CARATULA

DECLARACIÓN DE DERECHO DE AUTOR, AUTENTICIDAD Y

RESPONSABILIDAD..... i

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR ... ii

AUTORIZACION DE PUBLICACION EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL iii

AGRADECIMIENTOS..... iv

TABLA DE CONTENIDO..... v

ÍNDICE DE TABLAS..... vi

ÍNDICE DE FIGURAS vii

RESUMEN viii

ABSTRACT ix

INTRODUCCIÓN 1

Contexto Geológico 3

METODOLOGÍA..... 6

Recolección de datos en campo 6

Procesamiento de Datos..... 7

Generación del Modelo Inicial..... 8

Generación del Modelo de velocidades Vs 8

RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... 9

CONCLUSIONES 14

BIBLIOGRAFÍA 0

ANEXOS..... 2

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resultados obtenidos del RMS con las 6 pruebas realizadas	9
Tabla 2. Relación entre los materiales rocosos con la velocidad de onda de corte Vs.	12

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa geológico del área de estudio	4
Figura 2. Diagrama de flujo de la secuencia metodológica	6
Figura 3. Arreglo de la línea sísmica para la recolección de datos.	7
Figura 4. Resultado gráfico del filtrado de frecuencias	10
Figura 5. Modelo a priori de las velocidades de onda S (V_s)	10
Figura 6. Modelo preliminar de ondas S	10
Figura 7. Modelo final S.....	11
Figura 8. Depuración de las ondas mediante el programa Pickwin	2
Figura 9. Curvas de Dispersión	2
Figura 10. Velocidad de onda S.....	3
Figura 11. Modelo Final.....	4

RESUMEN

El método de Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW) es un método de geofísica económico y no invasivo, empleado para conocer la composición estratigráfica del subsuelo, identificar zonas inestables y planificar obras de ingeniería. En esta investigación, se obtuvo un modelo bidimensional de velocidades de onda S empleando la técnica MASW en el sendero de los Monos, ubicado en la Reserva Ecológica Colonso-Chalupas de la Provincia de Napo, Ecuador. En campo, obtuvimos los datos *in situ* a través de 12 geófonos separados a una distancia de 2.5 m y dispuestos en una línea sísmica de 30 metros de longitud. Para el procesamiento, se depuraron las primeras llegadas empleando la interfaz Pickwin, luego se realizó el modelo inicial de ondas S mediante el software Surface Wave Analysis Wizard y se generó el modelo final empleando el programa Geoplot. Los resultados indican una unidad de suelo dentro del rango de 187-200 m/s hasta una profundidad de 10 m. La interpretación de materiales geológicos de acuerdo a los valores V_s indica un horizonte de suelo definido por velocidades entre 160-300 m/s, lo que se relaciona con la clasificación de suelo de resistencia rígida. No fue posible determinar unidades de suelo residual de origen granítico o roca meteorizada. La influencia de la humedad sobre los valores de V_s , el cálculo de parámetros geotécnicos para el estrato de suelo y el análisis de las variaciones de las velocidades de onda V_s en las estaciones seca y lluviosa, son aspectos a considerar en futuras investigaciones. Los resultados de este estudio permiten una mejor comprensión de la composición del subsuelo en la zona, lo que es fundamental para la evaluación del riesgo por deslizamientos en masa y el ordenamiento territorial.

Palabras clave: velocidad de onda S, MASW, Reserva Colonso-Chalupas, ondas superficiales, granito de Abitahua.

ABSTRACT

The Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW) method is an inexpensive and non-invasive geophysical method used to know the stratigraphic composition of the subsoil, identify unstable zones and plan engineering works. In this research, a two-dimensional model of S-wave velocities was obtained using the MASW technique in El Sendero de los Monos, located in the Colonso-Chalupas Ecological Reserve in Napo Province, Ecuador. During the fieldwork, we obtained the data through 12 geophones separated at a distance of 2.5 m and arranged in a seismic line of 30 meters in length. For processing, the first arrivals were debugged using the Pickwin interface, then the initial S-wave model was made using the Surface Wave Analysis Wizard software and the final model was generated using the Geoplot program. The results indicate a soil unit within the range of 187-200 m/s up to a depth of 10 m. The interpretation of geological materials according to the V_s values indicates a residual soil horizon defined by velocities between 160-300 m/s, which is related to the classification of stiff resistance soil. It was not possible to determine residual soil units of granitic origin or weathered rock. The influence of humidity on V_s values, the calculation of geotechnical parameters for the soil layer and the analysis of the variations of V_s wave velocities in the dry and rainy seasons are aspects to be considered in future research. The results of this study allow a better understanding of the composition of the subsoil in the area, which is fundamental for the evaluation of landslide risk and land use planning.

Keywords: S-wave velocity, MASW, Colonso-Chalupas Reserve, surface waves, Abitagua granite.

INTRODUCCIÓN

El conocimiento de los materiales geológicos que componen el subsuelo es fundamental para la adecuada planificación territorial y la gestión de riesgos naturales (Cargua Quishpe, 2021). Los eventos de movimientos en masa ocasionan consecuencias negativas en la sociedad y economía de las poblaciones (Uvidia Vilema *et al.*, 2019). En los estudios de movimientos en masa, es fundamental el conocimiento de las características mecánicas, geométricas y físicas, de la masa a deslizarse (Vásquez Roura, 2013). La geofísica es un conjunto de técnicas empleadas en ingeniería para conocer la estructura y composición del subsuelo. La técnica de tomografía sísmica se fundamenta en la propagación de ondas sísmicas a través de diferentes materiales geológicos, y la medición de los tiempos de llegada y amplitudes de onda en diferentes puntos de la superficie. Al procesar esta información, se puede generar modelos del subsuelo que permiten entender su composición litológica (Kearey *et al.*, 2017).

La técnica de tomografía de Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW) consiste en la medición de ondas superficiales generadas por fuentes artificiales como el golpeo por martillo, y que se registran en superficie por sensores conocidos como geófonos. Con base en estos registros es posible calcular el tiempo de propagación de las ondas y mediante técnicas de inversión por computación, obtener un modelo de las velocidades de onda S (V_s) de los materiales geológicos a nivel subterráneo (Moon *et al.*, 2017; Park *et al.*, 1999).

MASW se emplea para caracterizar suelos, evaluar la estabilidad de taludes, detectar horizontes de suelo y roca, como otras aplicaciones en geotecnia por ser económica y no invasiva, con esto no es necesario realizar perforaciones para el reconocimiento de los materiales geológicos de la zona (Park *et al.*, 1999). Varios estudios alrededor del mundo se han realizado empleando la técnica MASW. Por ejemplo, Chique (2021) determinó una capa de suelo blando en el departamento de Tacna, al sur de Perú, caracterizados por velocidades de onda V_s menores a 180 m/s que podrían corresponder a depósitos tamaño arena de origen aluvial. De la misma forma, Chique (2021) y Moon *et al.* (2019) demuestran que los valores de V_s varían en función de la profundidad y el material geológico que atraviesan las ondas. Para suelos residuales, Moon *et al.* (2019) encontró velocidades entre 160-300 m/s, mientras que para granitos

totalmente meteorizados determinó velocidades de 260-600 m/s. Trichandi *et al.*, (2022) determinó el saprolito de un cuerpo granítico, en el desierto de la Reserva Nacional Santa Gracia en Chile, cuyas velocidades corresponden a 750-850 m/s. Además, Moon *et al.* (2017) menciona que una roca altamente meteorizada presenta un rango de velocidades de entre 264-420 m/s.

El área de estudio se ubica en una región húmeda tropical de la Amazonía ecuatoriana, donde la precipitación anual alcanza los 4300 mm anuales en la parte baja, y la temperatura promedio anual es de 23° C (Álvarez-Solas *et al.*, 2016). Además, mediante levantamientos de información en campo a escala regional (1:50.000) se conocen las formaciones geológicas del área (Duque *et al.*, 2015). De este modo, en el sendero de los Monos se puede observar capas de suelo orgánico y rocas de textura granítica expuestas a superficie y que presentan diferentes grados de meteorización.

En este contexto, mediante el uso de la técnica MASW se pretende dilucidar la interrogante de conocer cuáles son los estratos de suelo y/o roca de baja velocidad que están asociados a la inestabilidad de laderas en el Sendero de los Monos. Por lo tanto, el objetivo de esta investigación fue recolectar información geológica del subsuelo mediante la técnica MASW, en el Sendero de los Monos de la Reserva Biológica Colonso-Chalupas en la provincia de Napo, Ecuador. A través de esta aplicación se puede obtener un modelo bidimensional de la velocidad de onda S, con la finalidad de conocer el tipo de suelo y su estabilidad.

Los procesos de meteorización son detonantes de los deslizamientos asociados a rocas graníticas (González de Vallejo *et al.*, 2002). De forma similar, la meteorización disminuye las propiedades resistentes de las rocas (Aydin y Basu, 2005). La intensa precipitación y los terremotos son factores condicionantes de los movimientos en masa (Durgin, 1977). Por tal razón, con la técnica MASW y de acuerdo al contexto geológico de la zona de estudio, se espera determinar velocidades de onda que correspondan en primera instancia a suelos de textura arenosa y también a rocas graníticas meteorizadas, las cuales estarían asociadas a los movimientos en masa.

Zona de estudio

El sendero de los Monos es un camino de tránsito ecológico y turístico localizado en la Reserva Biológica Colonso Chalupas (RBCC), Cantón Tena, Provincia de Napo. Limita

al NE con la comunidad Shitig, al SO con Alto Tena y San Francisco y al SE con la Universidad Regional Amazónica Ikiam (Figura 1). El sendero tiene una longitud estimada de 2700 metros e inicia a una altura de 750 m s.n.m (-77.8830 W; -0.93053 N) y culmina a 1200 m s.n.m (-77.89748 W; -0.93155 N) (Ramis *et al.*, 2018). Por otro lado, las condiciones climáticas en la RBCC son variadas; se localiza entre los 560 y los 4432 m s.n.m. Las zonas altas de la reserva registran precipitaciones anuales de 1700 mm y temperaturas que bajan hasta los 3°C. En la parte baja la precipitación anual alcanza los 4300 mm y la temperatura promedio es de 23°C (Álvarez-Solas *et al.*, 2016).

Contexto Geológico

El Ecuador puede dividirse en cinco regiones fisiográficas, de oeste a este, se ubican las tierras bajas de la Costa, la Cordillera Occidental, la Región Interandina, la Cordillera Real, y la Cuenca Oriente (Ruiz, 2002). La Cuenca Oriente se divide en dos áreas morfológicamente distintas, una región de relieve plano hacia el este, que comúnmente se denomina la Región Oriental y la Zona Subandina hacia el este (Ruiz, 2002).

El área de estudio se encuentra en la Zona Subandina, el cual es un remanente de los Andes Orientales de Colombia. A su vez, la Zona Subandina se divide en tres áreas importantes: el Levantamiento Napo, la Depresión Pastaza y la Cordillera del Cutucú (Baby *et al.*, 2004). En conjunto, la Zona Norte Subandina y la Depresión Pastaza definen la porción este del piedemonte de los Andes ecuatorianos. Es una región de aproximadamente 250 km de largo y 60 km de ancho, limitado al oeste por rocas deformadas de la Cordillera Real y la Falla Inversa Subandina, y al este por la Cuenca Oriente y el Frente Subandino (Baby *et al.*, 2004). La Zona Subandina se encuentra estructurada por fallamientos inversos de alto ángulo con orientación N-S y NNE-NNW. De igual forma, marcadores cinemáticos y mapas estructurales indican una tectónica transpresiva con movimientos dextrales (Baby *et al.*, 2004). De acuerdo a Baby *et al.* (2004) la mayoría de las fallas de la zona Subandina corresponden a antiguas fallas normales invertidas, las cuales controlaron los procesos de sedimentación durante el periodo Triásico y Jurásico.

La principal falla reportada dentro del área de estudio, es la Falla inversa Tena, con una longitud de 35 km y rumbo N6°E, la cual deforma rocas sedimentarias marinas del Mesozoico y rocas graníticas que son sobrepuestas por abanicos aluviales del Terciario a lo largo de la zona Subandina. El principal indicador cinemático de la falla es la

formación de escarpes irregulares. Se encuentra oculta o inferida por fotointerpretación (Eguez *et al.*, 2003).

Las principales formaciones geológicas dentro del área de estudio corresponden a la Formación Tiyuyacu, Formación Tena, Batolito de Abitagua-Guacamayos y depósitos aluviales. La formación Tiyuyacu (Eoceno Temprano – Eoceno Medio) se divide en dos miembros en base a su sedimentología y registros geofísicos. El miembro Tiyuyacu Inferior está representado por secuencias de conglomerados de 10 metros de espesor, con gradación ascendente hacia areniscas de grano grueso a fino. El 80% de los conglomerados se componen de cherts color rojizo y 20% de cuarzo y guijarros metamórficos. La matriz del conglomerado se compone parcialmente de ceniza volcánica desvitrificada. El miembro Tiyuyacu Superior se componen del 90% de clastos de cuarzo de bien a muy bien sorteados, la matriz se mantiene escasa y compuesta de arenisca azul a verdosa. Los depósitos fluviales caracterizan las facies sedimentarias de la formación Tiyuyacu (Ruiz, 2002).

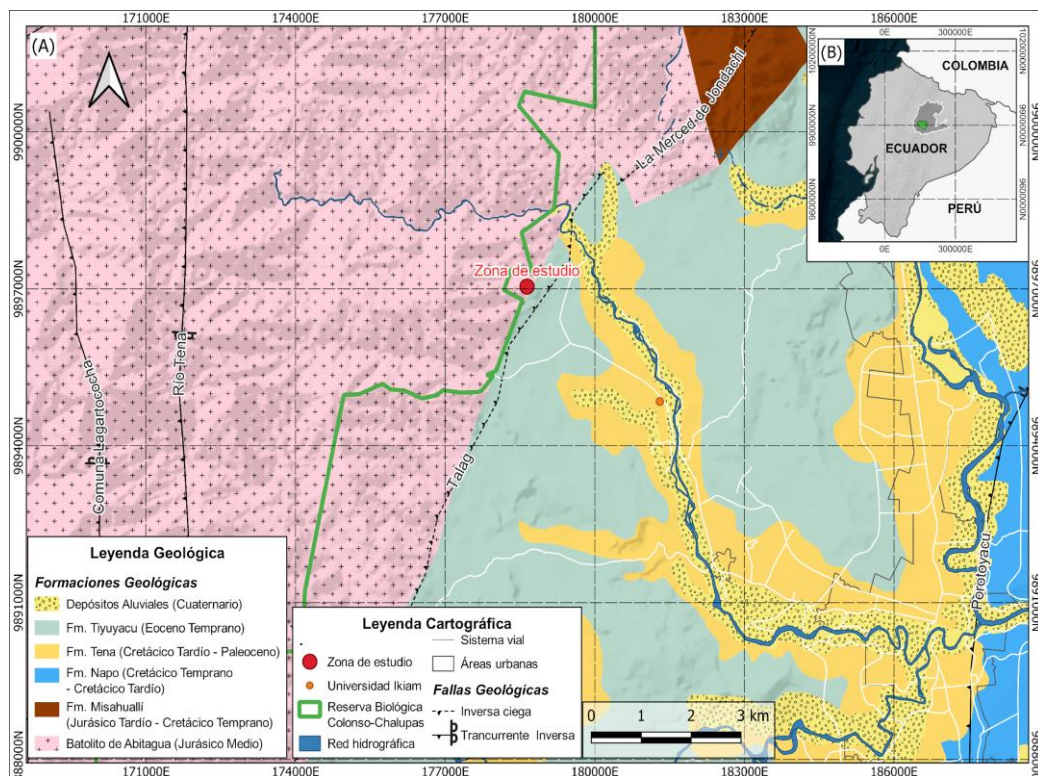


Figura 1. (A) Mapa geológico del área de estudio (punto rojo), se ubica entre el Batolito de Abitagua y la Formación Tiyuyacu. (B) Límites territoriales de la RBCC.

Realizado por: Paulina Abril

La formación Tena (Maastrichtiano - Paleoceno Temprano) se caracteriza por numerosas intercalaciones entre areniscas, lutitas rojizas y escasos conglomerados. El color de la Formación Tena varía desde rojo ladrillo a púrpura hacia areniscas de color verdoso y pardo en la parte inferior de la formación. Esta variada coloración se debe por la meteorización superficial. La potencia de la Fm. Tena en la Zona Subandina puede alcanzar los 900-1000 metros. Esta formación fue depositada principalmente en depósitos aluviales de agua fresca e ingresos marinos que ocurrieron brevemente en la parte baja de la formación (Ruiz, 2002).

El Batolito de Abitagua (Jurásico Medio) se ubica en la Cordillera Real y su litología comprende un monzogranito biotítico de grano medio a grueso que intruye parcialmente a la Formación volcánica Misahuallí (Reyes, 2009). El Batolito de Abitagua es un cuerpo intrusivo de 120 km de largo y 15 km de ancho. Se correlaciona con otros cuerpos plutónicos calco-alcalino ubicados en la Zona Subandina: el Batolito de Zamora y el Batolito Rosa Florida. Se asume una cristalización de edad Jurásica Media para esta formación. Los contactos fallados del Batolito con la Formación Misahuallí y los sedimentos Cenozoicos de la Cuenca Oriente en la parte norte de la Zona Subandina, sugieren que el emplazamiento del Batolito hasta su nivel final fue impulsado por tectonismo del periodo Cretácico hasta el presente (Ruiz, 2002).

METODOLOGÍA

En la figura 2 se indica el flujograma del proceso metodológico para obtener el modelo de velocidades de onda S.

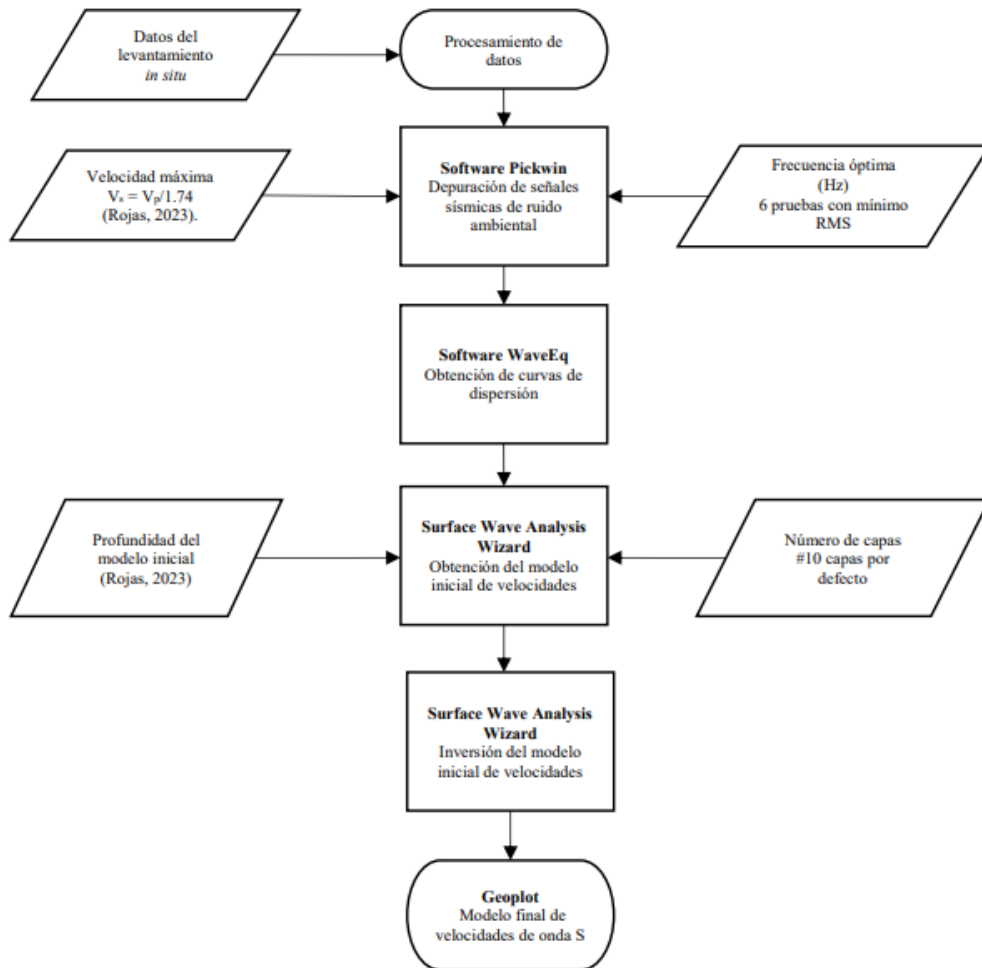


Figura 2. Diagrama de flujo de la secuencia metodológica empleada para obtener los datos en campo, procesamiento y el modelo de velocidades de onda S.

Realizado por: Paulina Abril

Recolección de datos en campo

Para la recolección de los datos *in situ*, se empleó un sismógrafo Marca Geometrics, Modelo Es-3000. El equipo consta de 24 sensores sísmicos con una frecuencia de 4.5 Hz. Se emplearon 12 geófonos, dispuestos en línea recta a una distancia de 2.5 cada uno. En la Figura 3 se observa en detalle la configuración de la línea sísmica. La disposición de los geófonos alineados en cierto sentido, a veces conocido como tendido

sísmico, es una metodología ampliamente usada en estudios de refracción sísmica (López *et al.*, 2008; Rinaldi *et al.*, 2016).

Se empleó el software Seismodule Controller para verificar que los geófonos funcionen de manera correcta y transmitan las señales de onda producidas por el golpe de un martillo de 6 kg de masa, sobre una placa de percusión de aluminio. Los golpes con martillo, se realizaron en la mitad de los geófonos. Por lo tanto, el primer golpe se realizó a 1.25 metros y el último golpe de 28.75 metros desde el golpe inicial.

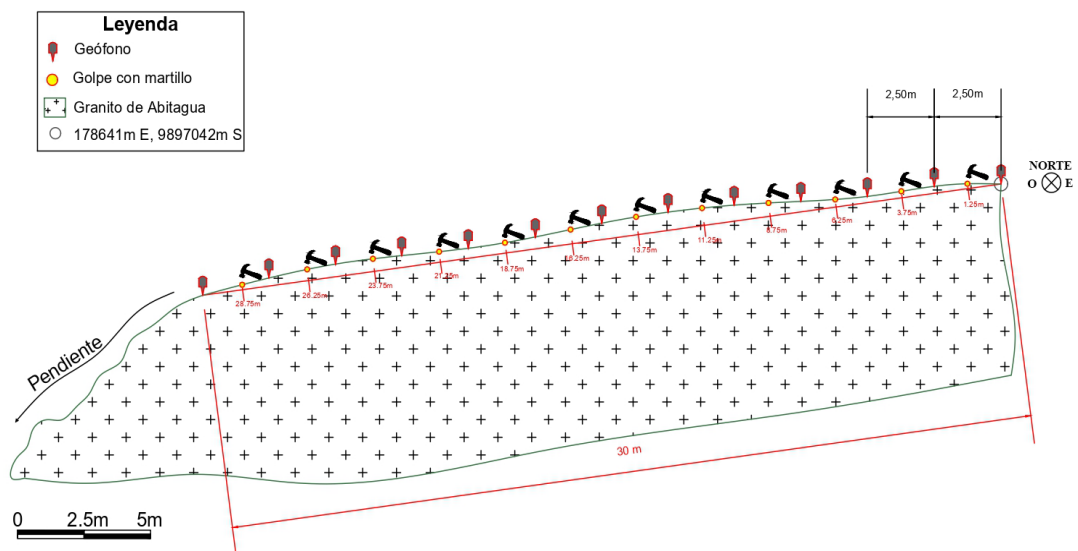


Figura 3. Arreglo de la línea sísmica para la recolección de datos. Se infiere que la línea se realizó sobre el Batolito de Abitagua (simbología geológica de roca granítica).
Realizado por: Paulina Abril

Procesamiento de Datos

Mediante el procesamiento de la información de campo, se pudo obtener el perfil de velocidad de onda V_s . Previamente, Rojas (2023) procesó los datos de este levantamiento sísmico para obtener un perfil de velocidades de onda P.

En primer lugar, se usó la interfaz del software Pickwin para corregir manualmente las señales de onda sísmica y depurarlas del ruido ambiental, debido a que el sismógrafo también detecta señales de ruido ambiental durante la adquisición de datos (Rinaldi *et al.*, 2016).

Posteriormente, se empleó Surface Wave Analysis para establecer un diagrama frecuencia (Hz) versus velocidad de fase (m/s) y determinar curvas de dispersión. En

esta etapa, se emplearon los datos depurados por Rojas (2023) en el software Pickwin para determinarlas. El software Surface Wave Analysis, requiere el ingreso de un valor inicial y final para determinar la velocidad de fase (Geometrics Inc, 2009). Se empleó la ecuación 1 para determinar la velocidad de fase final.

$$V_s = \frac{V_p}{1.74} \quad \text{Ecuación 1}$$

La constante 1.73 es la proporción entre la velocidad de onda V_s y V_p , el cual es normal para la corteza continental (Córdova *et al.*, 2020). En este caso, se consultaron los resultados de Rojas (2023) que determinó una velocidad máxima de onda P = 451 m/s. Así, con la ecuación 1, se obtuvo una velocidad $V_s = 260$ m/s. De la misma forma, para determinar las velocidades de fase, el software requiere del ingreso de frecuencias mínimas y máximas. En este caso, se realizaron seis pruebas para determinar la frecuencia óptima cuyo resultado de un mínimo valor de Root Mean Square (RMS), el cual es una proporción entre las velocidades de onda calculadas por el software y las velocidades observadas, mientras menor sea el RMS, mejor es la aproximación del modelo final a la realidad (Parada, 2018).

Generación del Modelo Inicial

Antes de obtener el perfil de velocidades de onda S, se requiere establecer un modelo inicial de velocidades, el cual se obtiene mediante las curvas de dispersión. En la interfaz MASW (1D) del software Surface Wave Analysis Wizard, se generó el modelo inicial de velocidades de onda S. Para ello, se requiere establecer una profundidad del modelo y el número de capas (estratos) de suelo que tomará el programa para realizar la modelación (Geometrics Inc, 2009). La profundidad del modelo fue de 6 metros, valor consultado de los resultados de Rojas (2023). El número de capas por defecto en el programa fue de 10.

Generación del Modelo de velocidades V_s

A partir del modelo inicial, se configura el software para que resuelva el cálculo del problema inverso del modelo inicial y así obtener el modelo final de velocidades de onda S. La solución a los problemas inversos depende de los datos iniciales. Por tal razón, ha de procurarse que sean confiables, ya que el ruido y los errores en los datos iniciales

son transmitidos al modelo final mediante el algoritmo de inversión. Por lo tanto, en función de la variación de los datos iniciales, pueden existir infinitas soluciones al problema inverso, aquí es necesario suministrar a los algoritmos de resolución, información *a priori* y métodos de regularización (Pedruelo González, 2013).

Empleando el software Geoplot se configuraron aspectos de diseño, como configuración de los ejes, recortar la profundidad del modelo, entre otros.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El objetivo del método MASW es determinar la velocidad de propagación de la onda S en función de la profundidad. Se tomó como referencia la raíz cuadrática media (RMS por sus siglas en inglés), las cuales son empleadas para evaluar la calidad de la señal sísmica en los datos de tomografía. RMS indica cómo se distribuyen y viajan las ondas sísmicas. Para esta investigación se tomó como modelo inicial las velocidades provenientes del procesamiento sísmico en tiempo (velocidades RMS), el cual muestra variaciones laterales de velocidad suaves, que reflejan el modelo real de compactación del subsuelo, es decir que, a mayor profundidad, la velocidad de la onda incrementa (Reina Gutiérrez, 2017).

De las 6 pruebas realizadas se eligió el modelo con una frecuencia de 15 Hz debido a generó un valor mínimo de RMS de 1.466183 m/s. En la Tabla 1 se indican los resultados de la frecuencia y el valor de RMS obtenidos en las 6 pruebas realizadas, en rojo se indica la prueba elegida para obtener el modelo inicial.

Tabla 1. Resultados obtenidos del RMS con las 6 pruebas realizadas.

Prueba	Frecuencia (Hz)	Valor de RMS
1	2	4.365767 m/s
2	5	3.693928 m/s
3	10	3.693928 m/s
4	15	1.466183 m/s
5	20	6.883320 m/s
6	30	7.131685 m/s

Realizado por: Paulina Abril

Se obtuvo el modelo final de velocidades de onda S (V_s), realizando un filtro de las frecuencias que se indican en la Figura 4.

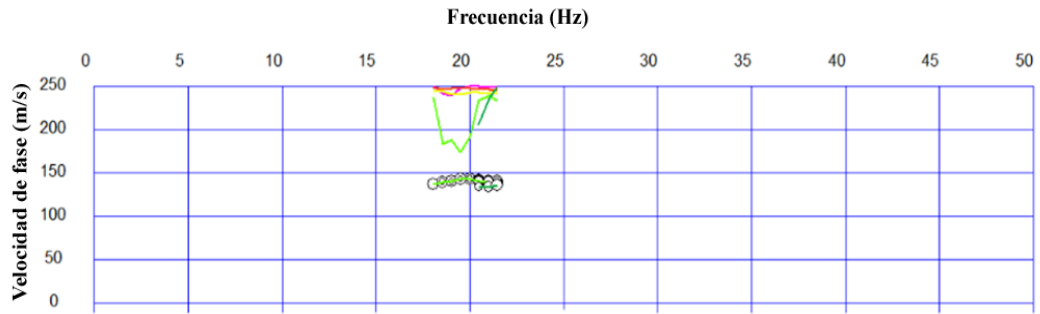


Figura 4. Resultado gráfico del filtrado de frecuencias. Se muestran las curvas de dispersión usadas para obtener el modelo a priori.

Realizado por: Paulina Abril

En la Figura 5 se indica el modelo inicial, con las velocidades de onda S en función de la profundidad.

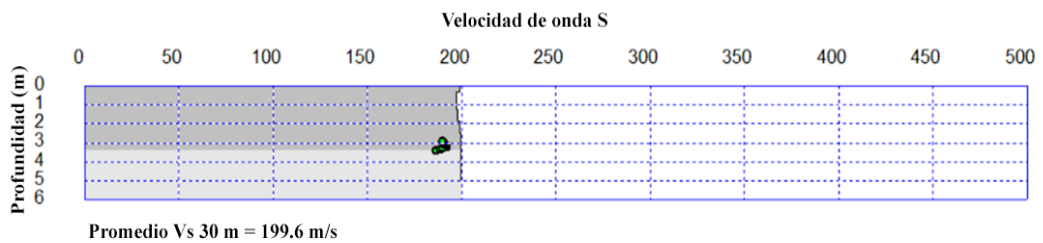


Figura 5. Modelo a priori de las velocidades de onda S (V_s).

Realizado por: Paulina Abril

A partir del modelo inicial, se obtuvo el modelo *cuasi* final de velocidades de onda S (Figura 6) usando la interfaz Geoplot, el modelo final se indica en la Figura 7.

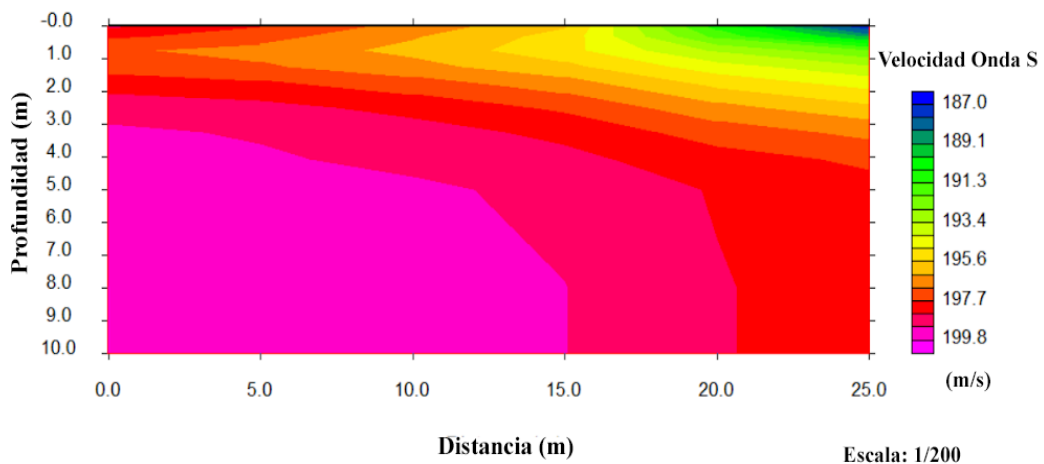


Figura 6. Modelo preliminar de ondas S con una frecuencia de 15 Hz y valor de RMS de 1.466183 m/s.

Realizado por: Paulina Abril

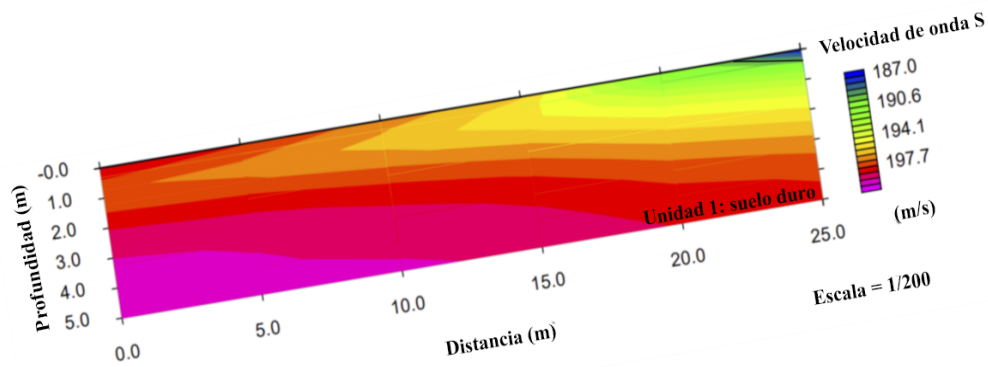


Figura 7. Modelo final S con una frecuencia de 15 Hz, RMS de 1.466 m/s con pendiente de 9°. Los colores son los rangos de velocidad de onda S (V_s) en m/s.

Realizado por: Paulina Abril

El modelo de Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW) indicado en la Figura 7, presenta un rango de velocidades desde los 187 - 200 m/s con una profundidad de 5 metros. Entre los 23 a 25 metros de distancia del lado derecho, a medio metro de profundidad existe una zona azulada que presenta menores velocidad de onda S, entre los 187 m/s y 188 m/s. Las zonas con las mayores velocidades de onda S se muestran en rojo y violeta, las cuales presentan velocidades superiores a 197 m/s. Los horizontes de suelo muestran una geometría irregular, pues entre los 5 a 15 metros de distancia existe una concavidad hacia la derecha del modelo. En este perfil se puede definir una sola unidad, que se define por velocidades (V_s) entre 187 – 200 m/s, es decir una diferencia de 13 m/s, lo cual es un rango pequeño para definir la existencia de algún otro estrato de suelo.

Kausarian (2015) señala una relación entre los materiales rocosos con la velocidad de onda cortante V_s la cual se indica en la Tabla 2. De acuerdo a esta tabla, los valores V_s encontrados en este estudio, comprenderían una zona u horizonte de suelo, que concuerda con la descripción de suelo duro, y se define entre las velocidades de onda cortante de 183-274 m/s.

Tabla 2. Relación entre los materiales rocosos con la velocidad de onda de corte V_s .
Adaptado de (Kausarian, 2015).

Clasificación de Material Rocosos	Velocidad de onda cortante V_s (m/s)
Muy suave	84-107
Suelo suave	107-137
Suelo moderadamente suave	137-183
Suelo duro	183-274
Suelo muy duro	274-366
Roca altamente meteorizada	366-610
Roca ligeramente meteorizada	610-2743

Realizado por: Paulina Abril

Chunga (2012) determinó una unidad litológica de aproximadamente 5 metros de espesor a través de sísmica de refracción, en un estudio de geología superficial alrededor de la Universidad Ikiam. La unidad se conforma por sedimentos de arcilla (filosilicatos) arenosa no consolidada, de color pardo claro a amarillo y origen detrítico. Esta unidad se encuentra subsiguiente a los niveles de suelo, se define con una velocidad de onda S de 185 m/s y se distribuye a lo largo del área. El lugar donde Chunga (2012) describió esta unidad se ubica a 1 km de distancia de nuestra zona de estudio. El autor menciona que la unidad tiene una coloración particular y es fácilmente reconocible.

El horizonte de suelo determinado en este estudio, podría tratarse de sedimentos constituidos por partículas de feldespato alcalino, calco-alcalino y pequeñas cantidades de minerales ferro magnesianos, cuyo origen es de arrastre de material meteorizado que proviene de rocas graníticas (Chunga, 2012).

Por otra parte, Sun *et al.* (2015) mencionan que las velocidades de onda V_s incrementan a medida que incrementa la profundidad del subsuelo. De este modo, hallaron que los valores de V_s para una capa de suelo meteorizado de origen granítico, corresponden a un rango de 200-400 m/s a una profundidad de 0-10 metros. En este estudio, detectamos valores V_s inferiores a 200 m/s, por lo cual, en principio no correspondería a un suelo producto de la meteorización de roca granítica. Chique (2021) determinó una capa de suelo modernamente rígido a una profundidad de 8-20 metros, con velocidades de onda V_s entre 180-500 m/s. Aunque la clasificación de “suelo modernamente rígido” se encuentra en la normativa sismorresistente peruana, es posible inferir a partir de nuestros resultados que, el horizonte de suelo puede tener una resistencia rígida. Moon *et al.* (2019) determinó horizontes de suelo residual que corresponden a valores de V_s

entre 160-300 m/s. Nuestros V_s están dentro de este rango, por lo tanto, es posible inferir que el horizonte de suelo determinado en la presente investigación, se trataría de suelo residual. Así mismo, los autores determinaron V_s entre 260-600 m/s para una roca granítica totalmente meteorizada. Nuestros resultados, no se enmarcan dentro de este rango de valores.

Es interesante señalar lo descubierto por Lima Júnior *et al.* (2012) en relación a los valores de V_s para diferentes estaciones climáticas a 5 metros de profundidad. Para la estación lluviosa, determinaron velocidades V_s entre 220-320, mientras que para la estación seca determinaron V_s entre 270-350, para un horizonte de arcilla arenosa con mica y gránulos dispersos de cuarzo. Nuestra zona de estudio experimenta dos marcadas estaciones a lo largo del año, debido a la Oscilación el Niño Sur (Koutavas y Joanides, 2012), por tanto, se podría realizar un análisis de las variaciones de las velocidades de onda V_s en diferentes estaciones del año, para tener un mejor entendimiento de la influencia de las condiciones climáticas sobre la resistencia de los materiales.

En una región árida de Chile, Trichandi *et al.* (2022) determinaron un horizonte de saprolito cuyo origen es una roca granítica, y las velocidades de onda V_s están dentro del rango de los 750-800 m/s. Nuestros valores de V_s se encuentran lejos de este rango. Sin embargo, es importante señalar, la influencia de la ausencia de humedad del suelo en los valores V_s en rocas de origen granítico. Se puede inferir que la única unidad de suelo determinado en el presente modelo de velocidades de onda (V_s) se trata de una capa de suelo transportado con dureza media-alta y resistencia rígida. Sin embargo, el suelo transportado podría corresponder a la unidad litológica descrita por Chunga (2012), el cual se origina por el arrastre de material meteorizado de rocas graníticas. Es posible que un estrato de roca dura se encuentre a más metros de profundidad. En principio, y en función de la opinión de otros autores, se puede decir que la unidad de suelo tiene una resistencia rígida. Futuras investigaciones deberían enfocarse en caracterizar y determinar la extensión geográfica de esta unidad, con el fin de afinar el modelo de geología superficial dentro del área de estudio.

CONCLUSIONES

El modelo MASW mostró que la velocidad de onda S (V_s) en la zona de estudio varía entre 187 y 200 m/s a una profundidad de 10 metros, con zonas de alta velocidad en la parte central e inferior del perfil de velocidades y una zona baja velocidad a los 23-25 metros del lado derecho. Los valores de V_s indican que la existencia de la única de unidad de suelo, originado por el transporte fluvial, con dureza media - alta y resistencia rígida.

De acuerdo con Chunga (2012), el único horizonte de suelo determinado en este estudio podría corresponder a materiales meteorizados de rocas graníticas y transportados por arrastre fluvial. Por lo tanto, la unidad de suelo inferida no estaría asociado a movimientos de masa. Sin embargo, con el fin de refinar el modelo de geología superficial alrededor de la zona de estudio, se recomienda futuras investigaciones para caracterizar y determinar la extensión geométrica de esta unidad.

Los resultados obtenidos en el estudio difieren de los obtenidos en otros estudios similares en la región, lo que sugiere la importancia de tener en cuenta la influencia de factores como la humedad del suelo y la composición geológica en la interpretación de los resultados aplicando el método MASW.

BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez-Solas, S., Tirira G, D., y Peñuela-Mora, M. C. (2016). Reserva Biológica Colonso-Chalupas : ¿ límite regional en primates del Ecuador? primates del Ecuador? *III Congreso Ecuatoriano de Mastozoología, June*, 126.
- Aydin, A., y Basu, A. (2005). The Schmidt hammer in rock material characterization. *Engineering Geology*, 81(1), 1–14. <https://doi.org/10.1016/J.ENGGEOL.2005.06.006>
- Baby, P., Rivadeneira, M., y Barragán, R. (2004). La Cuenca Oriente: Geología y petróleo. En *La Cuenca Oriente: Geología y petróleo*. Institut français d'études andines. <https://doi.org/10.4000/BOOKS.IFEA.2971>
- Cargua Quishpe, C. J. (2021). *Análisis de Susceptibilidad al Deslizamiento utilizando el Proceso de Jerarquía Analítica (AHP) en SIG en el tramo vial Puyo – Tena*. Universidad Regional Amazónica Ikiám.
- Chique, M. S. (2021). *Caracterización y Modelamiento Geotécnico mediante ensayos de refracción sísmica y análisis multicanal de ondas superficiales aplicados en el Proyecto Planta de Bombeo Ojo Copapujo* (Número February). Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann.
- Chunga, K. (2012). *Estudio de Geología de Superficie para el proyecto “Estudios de suelo de Geología y Geotecnia en los terrenos destinados para la construcción de la Universidad Regional Amazónica, Ikiám- Tena”*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.33279.71842>
- Córdova, A., Espin, P., y Pacheco, D. (2020). Characterization of Tectonic - Magmatic Seismic Source at Chile - Cerro Negro Volcanic Complex (CCNVC). *22nd EGU General Assembly*. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-12453>
- Duque, J., González, S., Andrade, X., y Garzón, O. (2015). *Levantamiento de Cartografía Temática, Escala 1:25.000, Lote 1*.
- Durgin, P. B. (1977). Landslides and the weathering of granitic rocks. En *GSA Reviews in Engineering Geology* (pp. 125–131). Geological Society of America. <https://doi.org/10.1130/REG3-P125>
- Eguez, A., Alvarado, A., Yepes, H., Machette, M. N., Costa, C., y Dart, R. (2003). Database and Map of Quaternary faults and folds of Ecuador and its offshore regions. En *USGS Open-File Report 03-289*.
- Geometrics Inc. (2009). *SeisImager/SW Manual* (Número October).
- González de Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L., y Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geológica*. PEARSON EDUCATION.
- Kearey, P., Brooks, M., y Hill, I. (2017). The principles and limitations of geophysical exploration methods. En *An Introduction to Geophysical Exploration* (Vol. 133, pp. 1–2). <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2017.04.031>
- López, J. M., Mejía, J. A., y Vega, N. (2008). *Aplicación del Método de Refracción Sísmica Para la Determinación de Velocidades de Ondas P*. Universidad de El Salvador.
- Moon, S.-W., Hayashi, K., y Ku, T. (2017). Estimating Spatial Variations in Bedrock Depth and Weathering Degree in Decomposed Granite from Surface Waves. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 143(7), 1–11. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0001679](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0001679)
- Moon, S., Subramaniam, P., Zhang, Y., Vinoth, G., y Ku, T. (2019). Bedrock depth evaluation using microtremor measurement: empirical guidelines at weathered granite formation in Singapore. *Journal of Applied Geophysics*, 171, 34. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2019.103866>
- Parada, L. F. (2018). *Aplicación de técnicas geofísicas basados en ondas superficiales para la*

- caracterización sísmica de taludes y/o laderas*. Universidad del Bio-Bio.
- Park, C. B., Miller, R. D., y Xia, J. (1999). Multichannel analysis of surface waves. *Geophysics*, 64(3), 800–808. <https://doi.org/10.1190/1.1444590>
- Pedruelo González, L. M. (2013). *Diseño, análisis y aplicación de las curvas de tiempos medios en problemas de tomografía sísmica en transmisión*. Universidad de Oviedo.
- Ramis, L., Álvarez-Solas, S., y Peñuela, M. (2018). Diagnóstico Preliminar De La Presencia De Primates Que Habitan El Piedemonte De La Reserva Biológica Colonso-Chalupas. *Revista de Investigación Talentos*, 5(2), 1–11. <https://doi.org/10.33789/talentos.5.78>
- Reyes, P. (2009). *Discusión sobre la evolución Jurásico-Cretácica de la Cordillera Real y el Bloque Amotape*. <https://doi.org/10.4324/9780203840252-53>
- Rinaldi, V. A., Ibarra, H. V., Viguera, R. F., y Harasimiuk, J. C. (2016). Aplicación de la tomografía sísmica para la detección de fallas estructurales en una formación terciaria. *Físicas Y Naturales*, 3(2), 45–51. <https://revistas.unc.edu.ar/index.php/FCEFYN/article/view/13772>
- Rojas, E. (2023). *Tomografía de refracción sísmica en el Sendero de los Monos de la Reserva Colonso-Chalupas, Napo, Ecuador*. Universidad Regional Amazónica Ikiam.
- Ruiz, M. H. (2002). *Exhumation of the northern Sub-Andean Zone of Ecuador and its source regions* [Swiss Federal Institute of Technology Zurich]. <https://doi.org/10.3929/ETHZ-A-004489528>
- Trichandi, R., Bauer, K., Ryberg, T., Scherler, D., Bataille, K., y Krawczyk, C. M. (2022). Combined seismic and borehole investigation of the deep granite weathering structure—Santa Gracia Reserve case in Chile. *Earth Surface Processes and Landforms*, 47(14), 3302–3316. <https://doi.org/10.1002/esp.5457>
- Uvidia Vilema, M. A., Chugñay Cargua, A. L., Chugñay Cargua, M. I., y Riofrío López, L. E. (2019). Gestión del riesgo de desastres naturales en la parroquia Pano, Provincia de Napo. *Ciencia Digital*, 3(3.4.), 289–300. <https://doi.org/10.33262/cienciadigital.v3i3.4..874>
- Vásquez Roura, A. V. (2013). *Investigación de deslizamientos a través de métodos geofísicos y técnicas de monitoreo*. Universidad de Cuenca.

ANEXOS

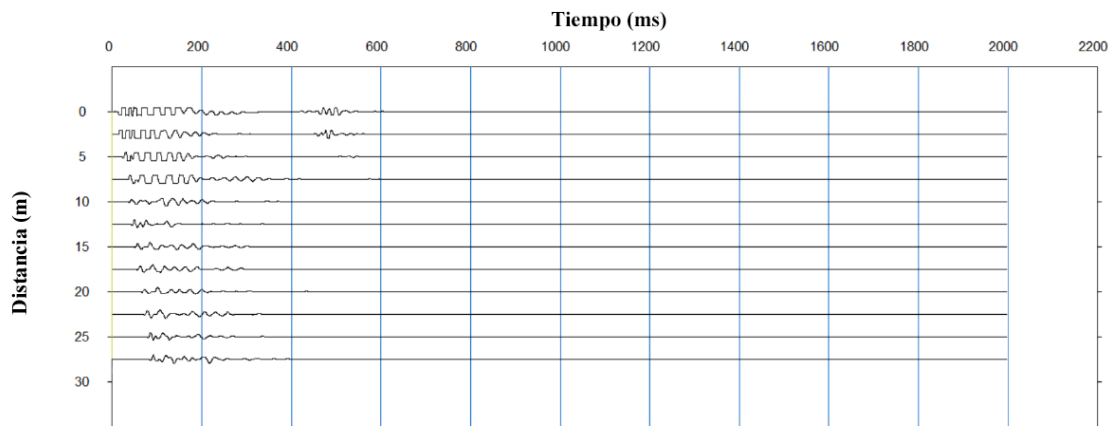


Figura 8. Depuración de las ondas mediante el programa Pickwin.
Realizado por: Paulina Abril

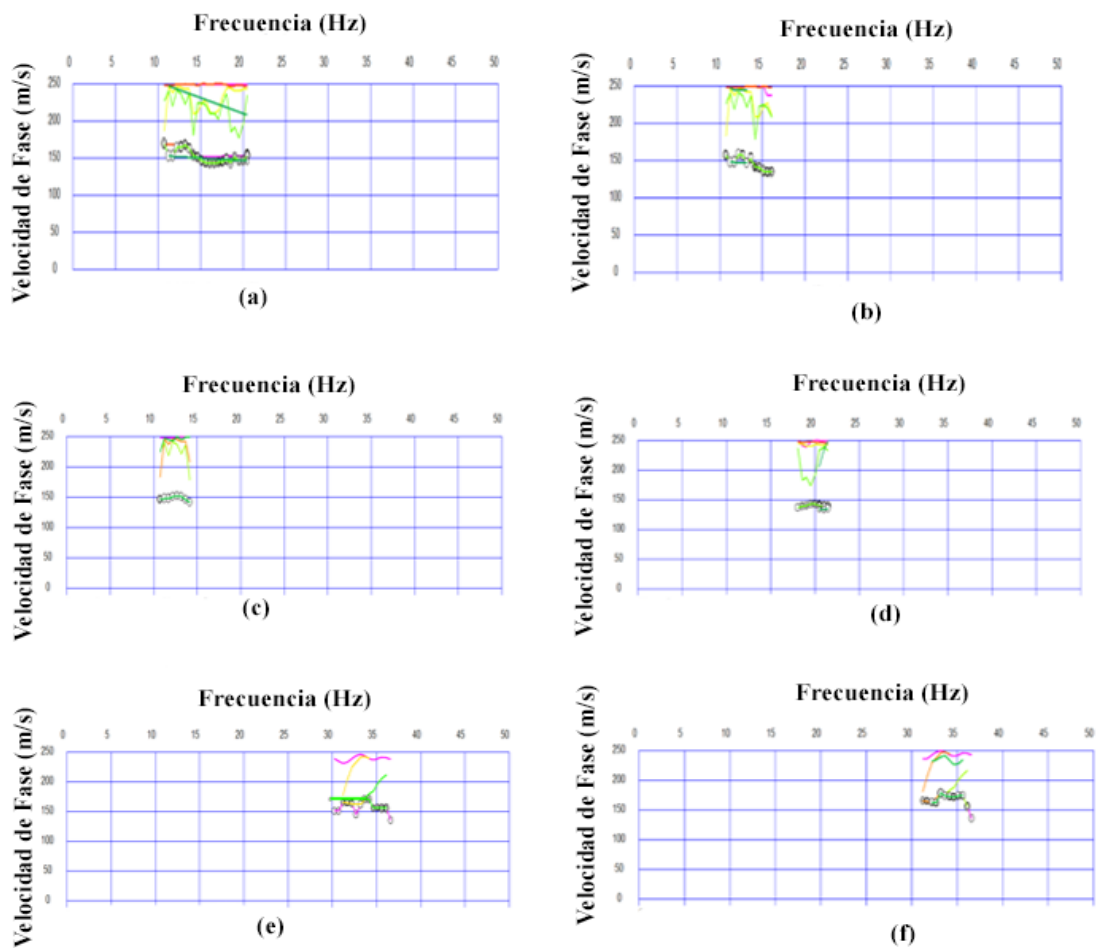


Figura 9. Curvas de Dispersión con la frecuencia de 2Hz (a), 5 Hz (b), 10 Hz (c), 15Hz (d), 20Hz (e), 30Hz (f) a una profundidad de 6 metros.

Realizado por: Paulina Abril

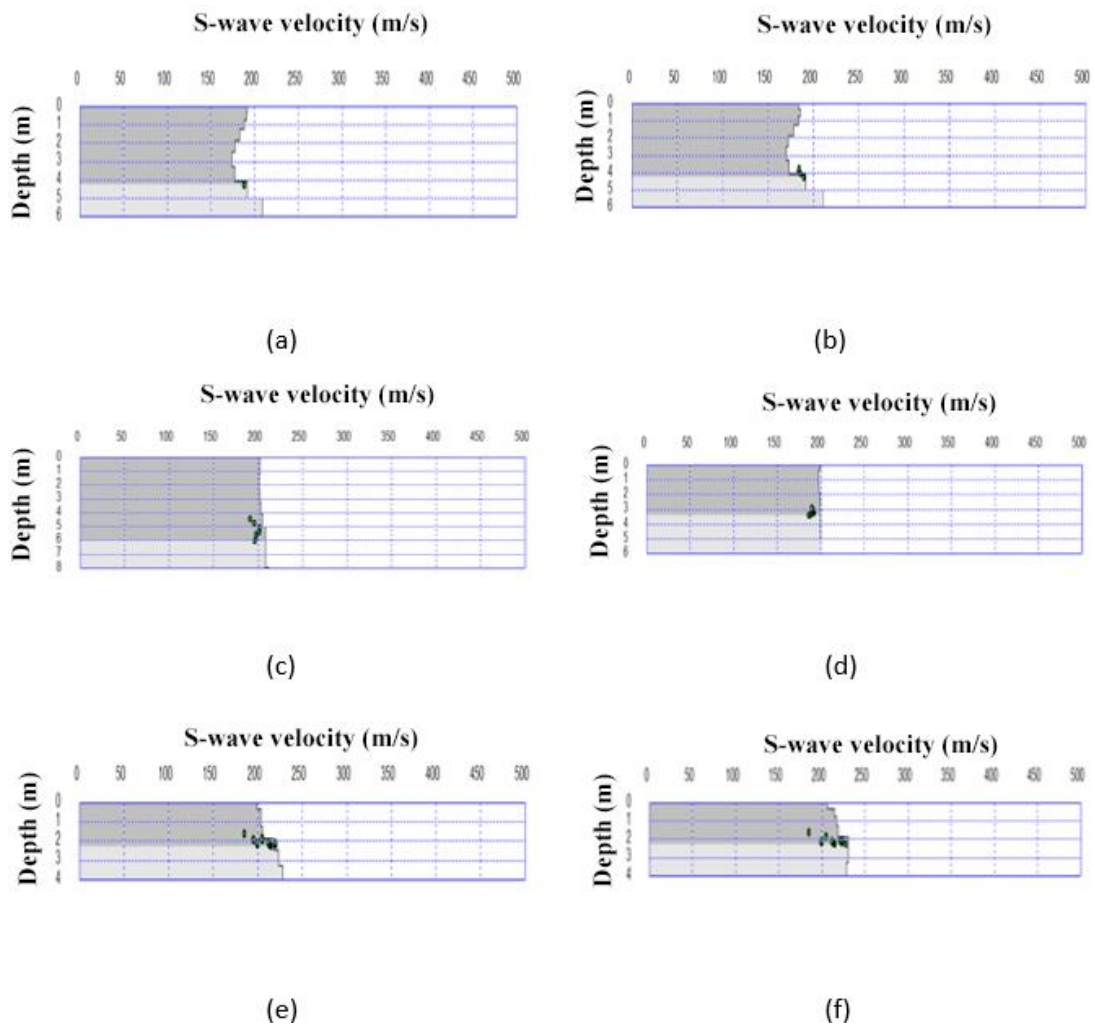


Figura 10. Velocidad de onda S con una frecuencia de 2Hz (a), 5 Hz (b), 10 Hz (c), 15Hz (d), 20Hz (e), 30Hz (f) a una profundidad de 6 metros.

Realizado por: Paulina Abril

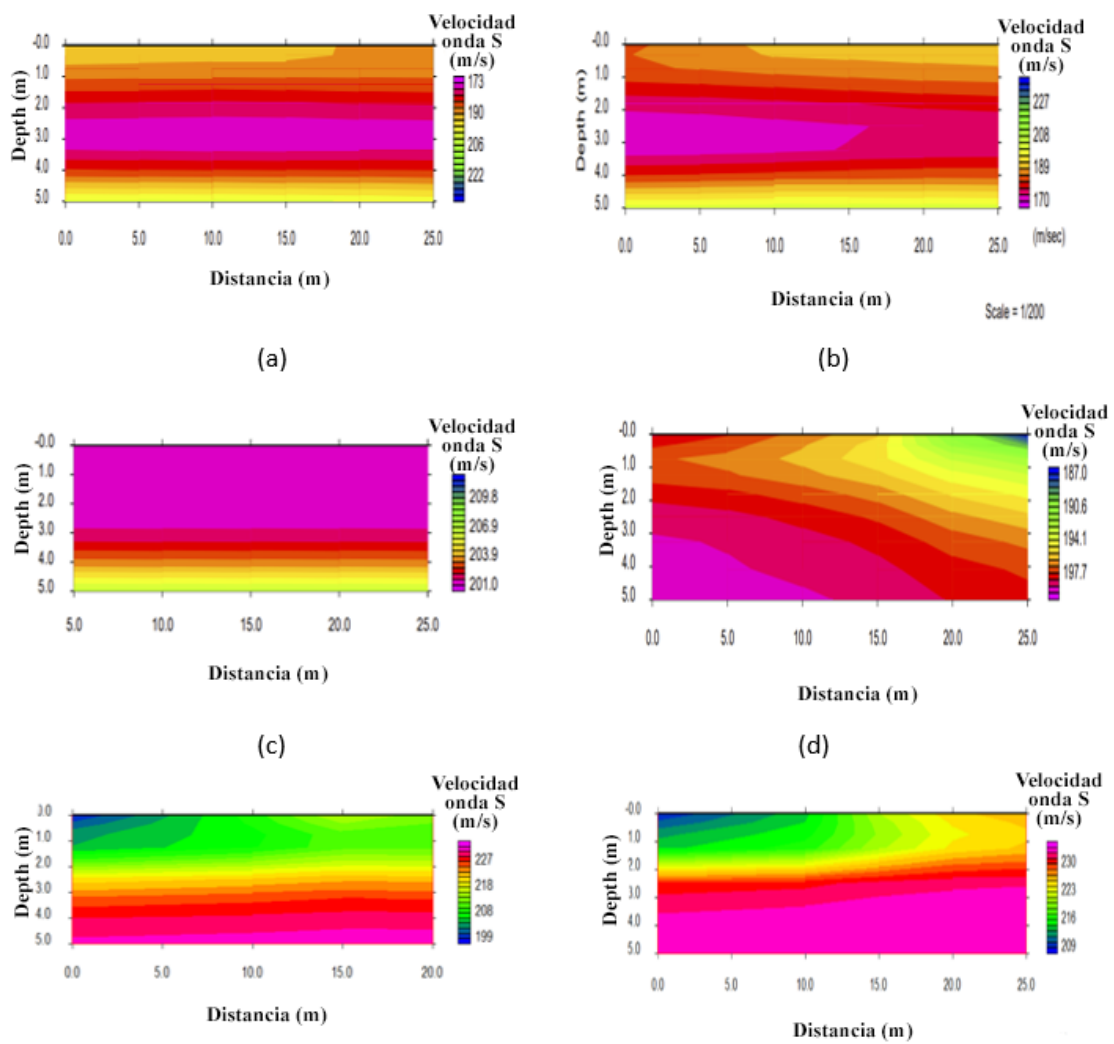


Figura 11. Modelo Final con una frecuencia de 2Hz (a), 5 Hz (b), 10 Hz (c), 15Hz (d), 20Hz (e), 30Hz (f) a una profundidad de 6 metros.
Realizado por: Paulina Abril