



**UNIVERSIDAD REGIONAL AMAZÓNICA IKIAM**

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y AGUA  
CARRERA DE GEOCIENCIAS

**TOMOGRFÍA DE REFRACCIÓN SÍSMICA EN EL SENDERO DE  
LOS MONOS DE LA RESERVA COLONSO-CHALUPAS, NAPO,  
ECUADOR.**

Proyecto de investigación previo a la obtención del Título de:

**INGENIERA EN GEOCIENCIAS**

**AUTORA**

**ERIKA MISHIEL ROJAS ESTRADA**

Napo-Ecuador

2023



# **UNIVERSIDAD REGIONAL AMAZÓNICA IKIAM**

**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y AGUA  
CARRERA DE GEOCIENCIAS**

## **TOMOGRFÍA DE REFRACCIÓN SÍSMICA EN EL SENDERO DE LOS MONOS DE LA RESERVA COLONSO-CHALUPAS, NAPO, ECUADOR.**

Proyecto de investigación previo a la obtención del Título de:

**INGENIERA EN GEOCIENCIAS**

**AUTORA: ERIKA MISHEL ROJAS ESTRADA**

**TUTOR: PhD. JOSÉ SEBASTIÁN ARAUJO SORIA**

Napo-Ecuador

2023

## **DECLARACIÓN DE DERECHO DE AUTOR, AUTENTICIDAD Y RESPONSABILIDAD**

Yo, ERIKA MISHEL ROJAS ESTRADA, con documento de identidad N° 2200598791, declaro que los resultados Obtenidos en la investigación que presento en este documento final, previo a la obtención del título de 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, 16 de febrero de 2023



Firma

Erika Mishel Rojas Estrada

2200598791

## **AUTORIZACIÓN DE PUBLICACION EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL**

Yo, ERIKA MISHEL ROJAS ESTRADA, con documento de identidad N° 2200598791, en calidad de autor/a y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación: "Tomografía de refracción sísmica en el Sendero de los Monos de la Reserva Colonso-Chalupas, Napo, Ecuador." de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ÒRGANICO 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, 16 de febrero de 2023



Firma

Erika Mishel Rojas Estrada

2200598791

## CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Certifico que el trabajo de integración curricular titulado: “Tomografía de refracción sísmica en el Sendero de los Monos de la Reserva Colonso-Chalupas, Napo, Ecuador.”, en la modalidad de: artículo original, fue realizado por: Erika Mishel Rojas Estrada, 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 Ikiam, para su entrega y defensa.

Tena, 16 de febrero de 2023

Firma:

JOSE  
SEBASTIA  
N ARAUJO  
SORIA

Firmado digitalmente por:JOSE  
SEBASTIAN ARAUJO SORIA  
DN: cn=JOSE SEBASTIAN  
ARAUJO SORIA, gn=JOSE  
SEBASTIAN, c=EC, l=TENA,  
ou=Certificado de Clase 2 de  
Persona Física EC (FIRMA),  
e=urkupayawar@gmail.com  
Motivo:  
Ubicación:  
Fecha:2022-09-08 11:17-05:00

.....  
José Sebastián Araujo Soria

C.I: 1802672871

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo a la comunidad científica ya que con esta investigación quiero generar un aporte a la investigación. También quiero motivar que esta investigación sea retomada para estudiantes de pregrado.

## **AGRADECIMIENTO**

Primero, agradezco a mi tutor de trabajo de integración curricular ya que sin él esta investigación no hubiese sido posible, también a mis docentes que me formaron en mi educación universitaria en Ikiam. Quiero agradecer a todos mis amigos que me alentaron a terminar este trabajo. Desde el cielo un hermoso hombre que no tuve el honor de conocer, pero que me ha guiado con su luz espiritual. También quiero agradecer a mi hermana y a mi madre que sin ellas no lo hubiese logrado. Finalmente, quiero agradecer al proyecto Nb-Lab ya que tenía como objetivo que los estudiantes utilicemos todas las herramientas para culminar nuestras investigaciones.

## TABLA DE CONTENIDO

### CARÁTULA

DECLARACIÓN DE DERECHO DE AUTOR.....	iii
AUTORIZACIÓN DE PUBLICACION EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL .....	iv
CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR ...	v
DEDICATORIA .....	vi
AGRADECIMIENTO .....	vii
TABLA DE CONTENIDO.....	viii
CARÁTULA.....	viii
ÍNDICE DE TABLAS .....	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
RESUMEN.....	xii
ABSTRACT .....	xiii
INTRODUCCIÓN .....	1
MARCO GEOLÓGICO .....	4
METODOLOGÍA.....	7
Adquisición de datos.....	8
Levantamiento de información geológica en campo .....	9
Análisis de datos .....	10
RESULTADOS .....	11
Clasificación de las muestras de roca.....	13
DISCUSIÓN .....	14

**CONCLUSIONES** ..... 19

**REFERENCIAS** ..... 1

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1:</b> Parámetros utilizados para la generación del modelo inicial de cambio de velocidades. ....	10
<b>Tabla 2:</b> Valores comparativos de velocidad de granito.....	15

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Ejemplo de deslizamiento de tierra en el Sendero de los Monos.....	3
<b>Figura 2:</b> Bloque de granito con presencia de musgo (a) y Granito meteorizado(b) en la zona de estudio. ....	4
<b>Figura 3:</b> Mapa de ubicación de la zona de estudio.....	5
<b>Figura 4:</b> Mapa geológico de la zona de estudio. ....	6
<b>Figura 5:</b> Esquema sintetizado de la metodología utilizada. ....	7
<b>Figura 6:</b> Bosquejo de localización de la línea sísmica en el Sendero de los Monos....	9
<b>Figura 7:</b> Convergencia del RMS (root mean square) a lo largo de las iteraciones.....	12
<b>Figura 8:</b> Gráfico de las curvas L.....	12
<b>Figura 9:</b> Resultado de imagen de tomografía sísmica.....	13
<b>Figura 10:</b> Muestra de roca para el análisis petrográfico. ....	14

## RESUMEN

La tomografía de refracción sísmica es una de las técnicas geofísicas más conocidas para determinar la geología del subsuelo; siendo sencilla, económica y no invasiva. La metodología de esta técnica se basa en la medición de las primeras llegadas de las ondas a través del material en la superficie terrestre, después de que las percusiones de un martillo hayan producido señales sísmicas. En esta investigación, utilizamos la tomografía de refracción sísmica 2D en el Sendero de los Monos para hacer un análisis sismoestratigráfico y caracterizar el subsuelo, así como también la geometría de una sección. El Sendero de los Monos es uno de los accesos a la Reserva Colonso Chalupas situada en Napo-Ecuador. La zona de estudio está en una zona de clima tropical y húmedo donde existen deslizamientos a lo largo del sendero y la presencia de bloques meteorizados del granito de Abitagua. El caso de estudio mostró un perfil de velocidades de ondas P desde 361 m/s a 451 m/s y la presencia de una posible falla con cinemática inversa. Adicionalmente, se identificaron tres unidades sismoestratigráficas, la unidad 1 comprendida de suelo arenoso, las unidades 2 y 3 de roca granítica meteorizada.

*Palabras clave:* Tomografía de refracción sísmica, Reserva Colonso-Chalupas, granito de Abitagua, meteorización, falla.

## **ABSTRACT**

The seismic refraction tomography survey is one of the best-known geophysical techniques to determinate subsurface geology; it is simple, inexpensive, and non-invasive way. The methodology of this techniques is based on measuring the first arrivals of waves through the earth's surface material, after the percussions hammer have produced seismic signals. In this research, we use 2D seismic refraction tomography to do a seismostratigraphic analysis and to identify and characterize the subsurface and geometry of a section of the los Monos Trail. This path is one of the accesses to the Colonso-Chalupas reserve located in Napo-Ecuador. The study area is in a tropical and humid climate zone where there are landslides along the trail and the presence of weathered Abitagua granite blocks. The case study showed a profile of low P-wave velocities from 361 m/s to 451 m/s and the presence of a possible fault with inverse kinematics. Additionally, three seismostratigraphic units were identified, unit 1 comprised sandy soil, and units 2 and 3 of weathered granitic rock.

*Keywords:* Seismic refraction tomography, Colonso-Chalupas Reserve, Abitagua granite, weathering, fault.

## INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, ante la necesidad de conocer la naturaleza del subsuelo, se han llevado a cabo métodos geofísicos como: los gravitacionales, magnéticos, resistividad eléctrica, polarización inducida, electromagnética, radar y los métodos sísmicos (Kearey et al. 2017). Dentro de los métodos sísmicos, la tomografía de refracción sísmica es una técnica que mide el tiempo de llegada de las ondas de compresión (ondas P), producidas por una fuente de energía impulsiva a una serie de geófonos localizados en superficie. Mediante el tratamiento de los datos de tiempo de llegada de la ondas directa y reflejada (llamadas dromocronas), es posible generar un modelo en dos dimensiones del subsuelo (Araujo 2010; Rivera et al. 2016). En el modelo, se puede determinar la velocidad de propagación de ondas P a través de diferentes estratos subterráneos de suelos y rocas.

La presente investigación se realizó debido a la ocurrencia de deslizamientos de tierra y desprendimiento de roca granítica a lo largo del Sendero de los Monos, en la provincia amazónica de Napo. Gracheva y Urushadze (2011) define los deslizamientos de tierra como una actividad destructiva directa, donde la masa deslizante expone las superficies a la intemperie y el material suelto es acumulado. En cambio, Cruden (1991) indica que los deslizamientos de tierra son el movimiento de masa rocosa, tierra o escombros por una pendiente, a su vez el autor indica que la meteorización de las rocas es un factor desencadenante de los mismos. Un posible deslizamiento de dimensiones kilométricas podría provocar la destrucción del entorno de la Reserva Colonso Chalupas, y un posterior abandono de las poblaciones afectadas en Shitig, Alto Tena y San Francisco de Guayaquil. Así mismo, frente a este deslizamiento, se vería afectado la conexión con el resto de senderos dentro de la Reserva Biológica Colonso Chalupas. Un ejemplo de deslizamiento de tierra a pequeña escala en el área de estudio se observa en la figura 1. En este sentido, el conocimiento de la estructura y composición de los materiales geológicos es fundamental para analizar la susceptibilidad o probabilidad de deslizamiento (González de Vallejo et al. 2002).

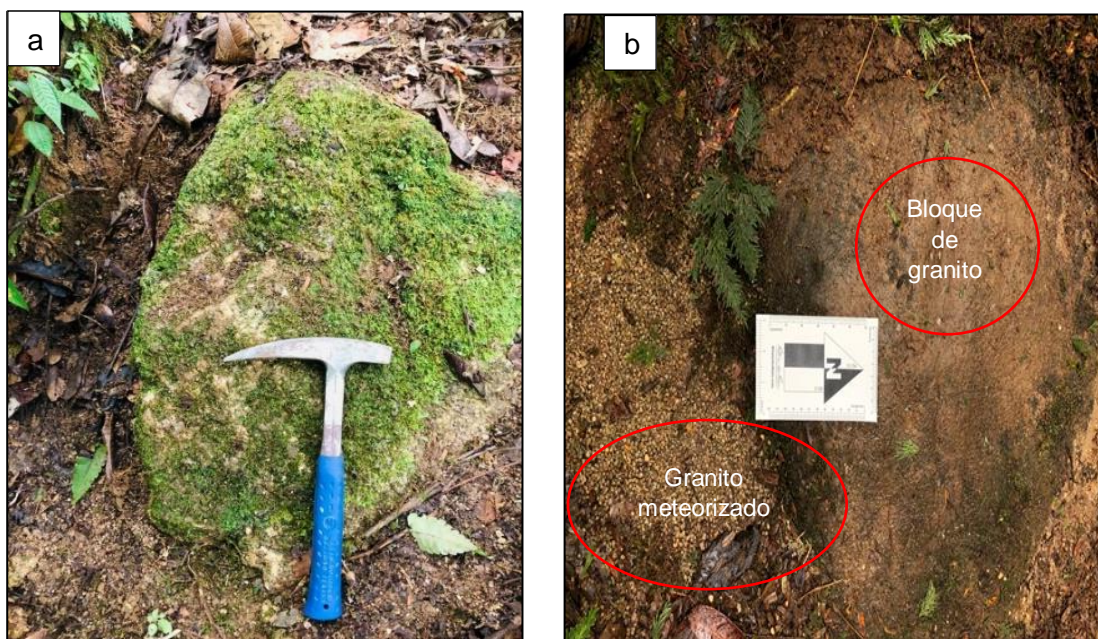
Por otra parte, en nuestra zona de estudio hallamos roca granítica, la cual pertenece al batolito de Abitagua-Guacamayos (Duque et al. 2015). Estas se encuentran disgregadas en bloques de granito en superficie a lo largo de todo el sendero. Los granitos meteorizados se observan en las figuras 2a y 2b. Por lo tanto, el presente estudio pretende realizar un análisis sismoestratigráfico en una sección del Sendero de los

Monos donde se identifique y caracterice, el subsuelo y la geometría mediante la técnica de tomografía de refracción sísmica.

Existen estudios previos de tomografía sísmica en granitos meteorizados. Por ejemplo, en el estudio de Tungka (2022) en la Isla Penang en Indonesia se determinó la geología del subsuelo mediante tomografía sísmica donde se mapeó la complejidad de la geología del subsuelo y se identificó granito y cuarzo hidrotermalmente alterado. En el estudio de Flinchum et al. (2018) en Wyoming, Estados Unidos, se desarrollaron imágenes de refracción sísmica tridimensional en una zona crítica compuesta de saprolito, lecho de roca granítica meteorizada y protolito, bajo una cresta de suelo. El objetivo de este estudio fue proporcionar información sobre la meteorización del subsuelo y describir la forma del límite saprolito/lecho rocoso erosionado. En el estudio de Martí et al. (2004) en Minas Ratonas al suroeste de España, se caracterizó un plutón granítico fracturado con imágenes de alta resolución de tomografía sísmica de ondas P y S. En los Alpes Suizos, Heincke et al. (2006) estudiaron un desprendimiento de rocas graníticas, los autores sugieren que las velocidades de onda P ultra bajas a muy bajas se deben a la roca altamente fracturada. En el estudio de Rodriguez y Ramos (2016) mediante sísmica de refracción y otras técnicas geofísicas se determinó que el granito en áreas cercanas a la ciudad de Melo en Uruguay está afectado por meteorización y por esfuerzos que provocan fracturas, fisuras y fallas. Un estudio importante de sísmica de refracción en granitos de zonas tropicales, fue llevada a cabo por es Zhao et al. (1994) en Singapur, donde se correlaciona la velocidad de la onda P con la meteorización de roca granítica.



**Figura 1:** Ejemplo de deslizamiento de tierra en el Sendero de los Monos.  
**Fuente:** Erika Rojas y Mauricio Ortega 2022



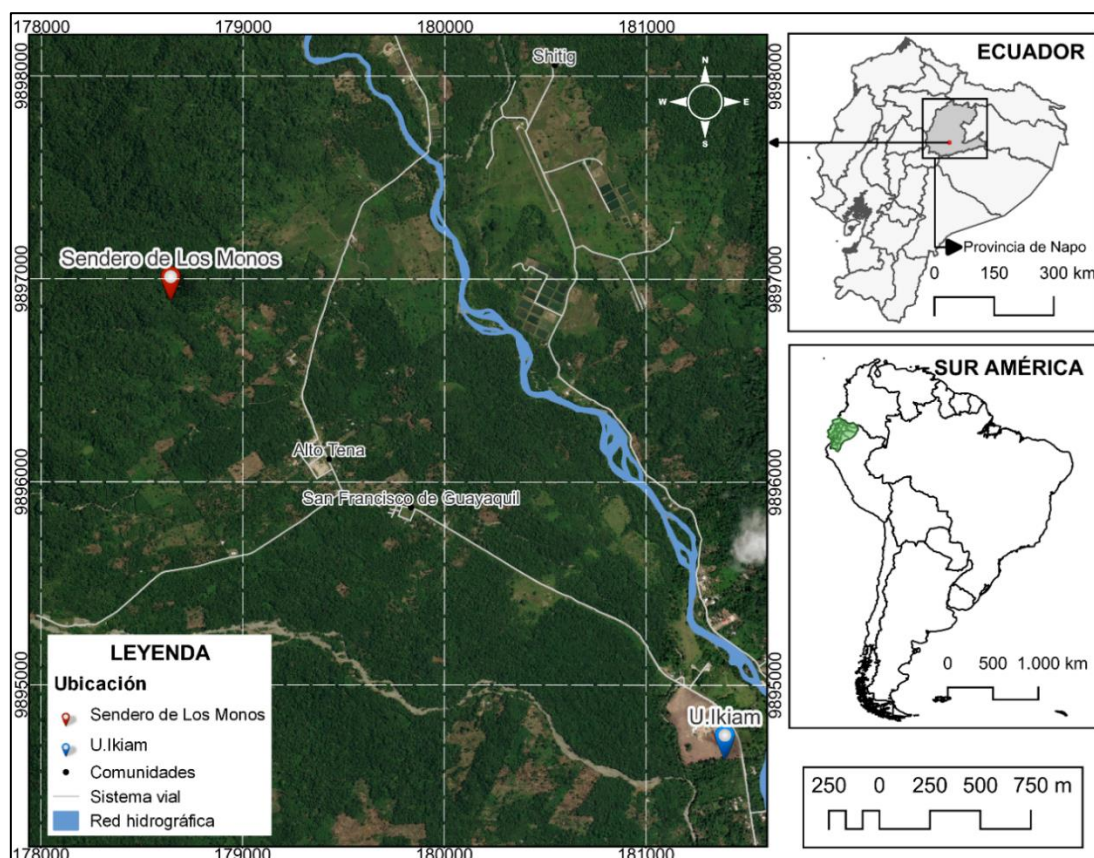
**Figura 2:** Bloque de granito con presencia de musgo (a) y Granito meteorizado(b) en la zona de estudio.  
**Fuente:** Erika Rojas 2020

## MARCO GEOLÓGICO

A nivel macro, la zona de estudio se encuentra en la región Subandina del Ecuador, específicamente en la cuenca oriente, que corresponde a la posición ante-país de transarco de los andes ecuatorianos, limitando al norte con la cuenca Putumayo y al sur con la cuenca Marañón (Baby et al. 2004). Estructuralmente, el subandino corresponde a la parte deformada de la Cuenca Oriente, resultado de la inversión tectónica de estructuras en régimen extensivo del Pre-cretácicas, asociadas al sistema de rift Tetiano Triásico Superior Jurásico Inferior de orientación NNE-SSO (Baby et al. 1999).

El Sendero de los Monos está ubicado en la Reserva Biológica Colonso Chalupas, en el Cantón Tena perteneciente a la 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 3). La temperatura promedio anual es 22.8°C (14.9 – 39.6°C), precipitación promedio anual 3628.8 mm (0 – 52.9 mm diario) y la humedad relativa promedio de 92.1% (43.7%-100%) (Ikiam 2022). La zona de estudio es atravesada por dos fallas geológicas: Talag y Río Tena (Figura 4). La primera falla es de tipo inversa ciega y la segunda falla es inversa y transcurrente dextral (Costa et al. 2020). Geológicamente, se encuentran las formaciones Granito de Abitagua-Guacamayos, Formación Tiyuyacu, Formación Tena y depósitos superficiales (Figura 4) (Duque et al.

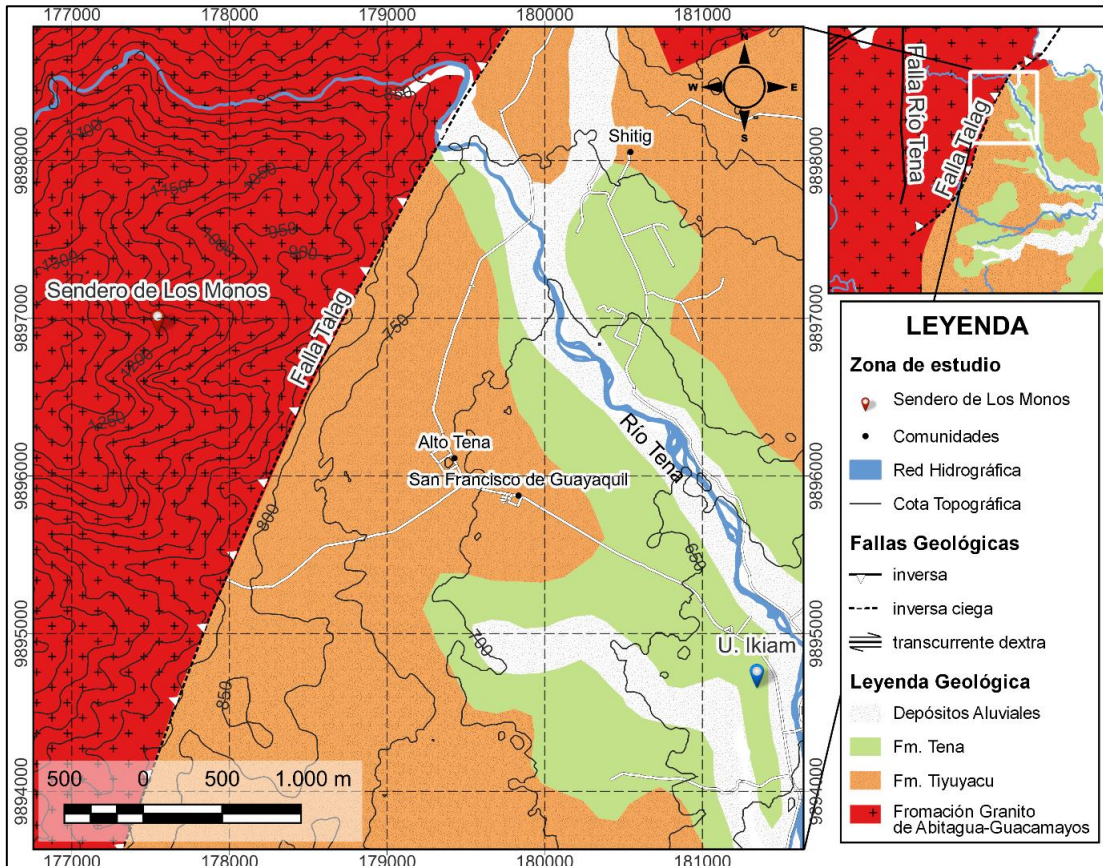
2015). La formación granito de Abitagua-Guacamayos en donde se encuentra localizada la zona de estudio, está constituida por monzogranito de biotita rosado, de grano medio o grano grueso, granito biotita megacristalino de feldespato potásico (Litherland et al. 1994), pertenece al Jurásico temprano -Cretácico temprano (Cochrane 2013; Spikings et al. 2014). La descripción de la litología señalada en los mapas geológicos de Duque et al. (2015) y Costa et al. (2020) sobre la zona de estudio, fueron verificadas en campo, mediante la adquisición y descripción de muestras de roca.



**Figura 3:** Mapa de ubicación de la zona de estudio.

**Elaborado por:** Erika Rojas

El punto rojo señala la zona donde se realizó la línea sísmica cercana al río Tena. Se han señalado para referencia las comunidades Shitig, Alto Tena y San Francisco de Guayaquil. La posición de la universidad Ikiam se señala con un punto azul. La información geológica es extraída del Levantamiento de Cartografía Temática para el Cantón Tena 1:25 000 Lote 2 (Duque et al. 2015). El mapa fue realizado en Sistemas de Información Geográfica (Qgis).



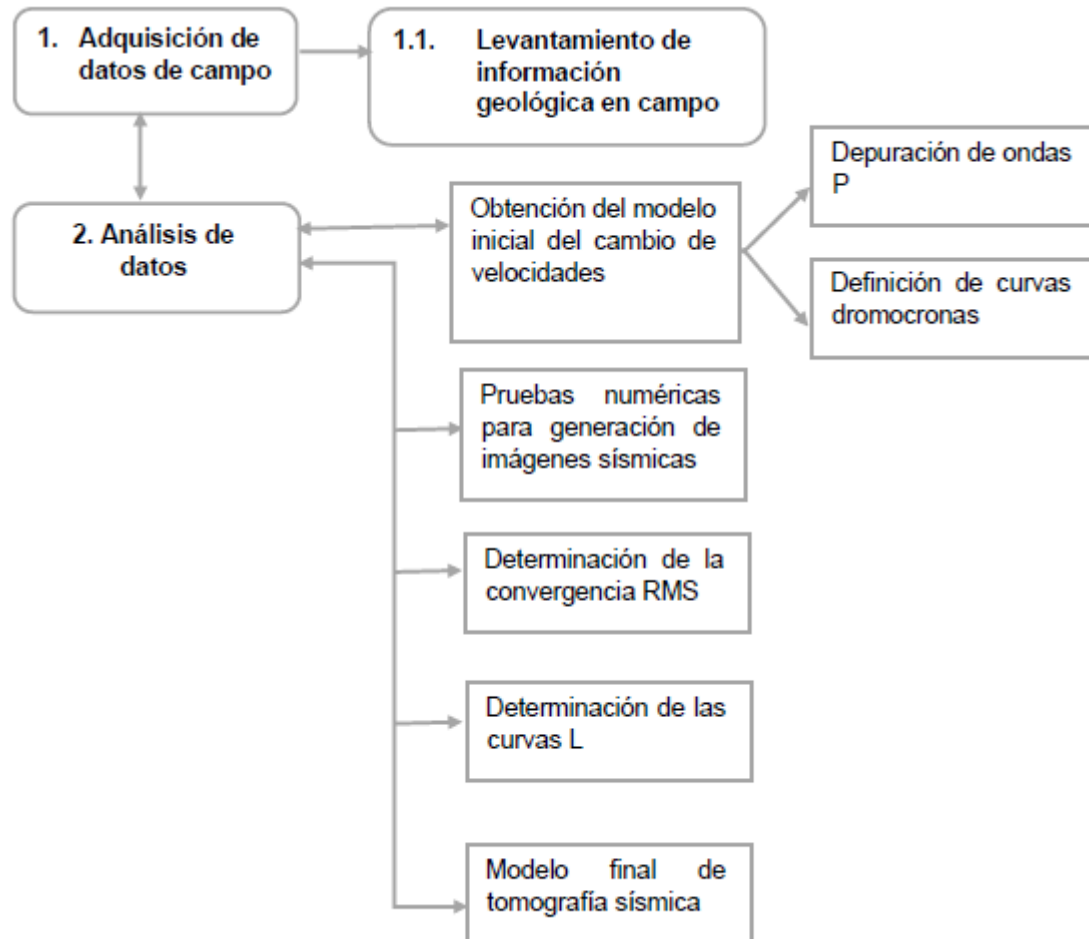
**Figura 4:** Mapa geológico de la zona de estudio.

**Elaborado por:** Erika Rojas

Se muestran las curvas de nivel cada 50 metros. La información geológica es extraída del Levantamiento de Cartografía Temática para el Cantón Tena 1:25 000 Lote 2 (Duque et al. 2015) y las fallas geológicas de la base de datos SARA (Costa et al. 2020). El mapa fue realizado en Sistemas de Información Geográfica (Qgis).

## METODOLOGÍA

El método seguido para la obtención de las imágenes tomográficas se puede resumir en el siguiente esquema:



**Figura 5:** Esquema sintetizado.

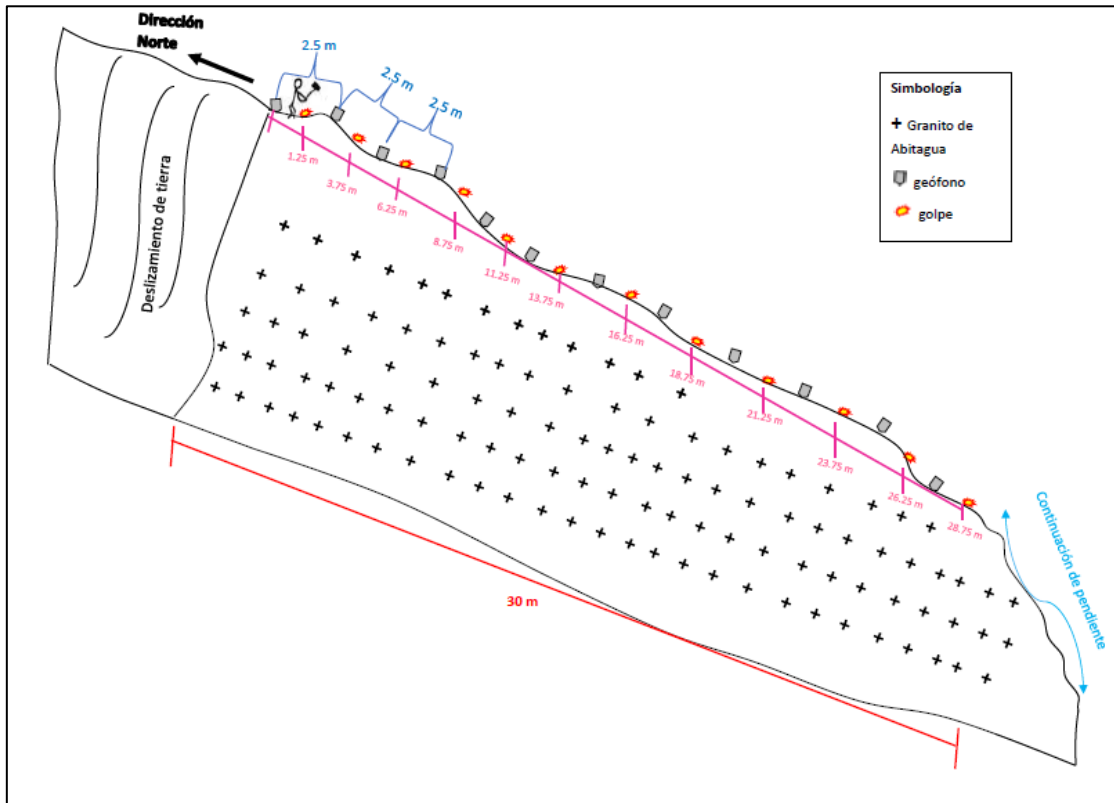
**Elaborado por:** Erika Rojas

Metodología utilizada para la adquisición y análisis de los datos para la obtención de imágenes sísmicas.

## **Adquisición de datos**

Para el registro de los datos in situ se utilizó el sismógrafo Geometrics modelo Es-3000, el cual posee 24 sensores sísmicos de 4.5 Hz. Para el tendido de la línea sísmica, se colocaron 12 geófonos separados a una distancia de 2.5 m. En la figura 6 se esquematiza la línea sísmica con una longitud total de 30 m, sobre la formación Granito de Abitagua. Así mismo, se puede apreciar al noroeste un deslizamiento de tierra. La longitud de la línea sísmica está determinada por la longitud accesible del estudio, no se pudo realizar más extensa la línea sísmica debido a que el lugar es restringido ya que fue ejecutado en una pendiente.

Por otra parte, la adquisición de datos se hizo con el programa computacional *Seismodule Controller* y se procedió a verificar que los geófonos estén funcionando correctamente en el panel de ruido. Para generar las ondas sísmicas se utilizó un martillo de 6 kg sobre una placa de percusión de aluminio. Los golpes fueron realizados a la mitad de la distancia entre geófonos, para mantener una distancia prudencial para cada geófono, en cambio sí se realizará los golpes sobre cada geófono podríamos provocar ondas de interferencia de la onda de sonido ya que llegaría muy pronto al geófono. Otra de las razones de la metodología planteada, es que buscamos el mayor número de percusiones, porque generan un mayor número de datos de la onda P, al realizar los golpes a la mitad de la distancia entre geófonos. Hay que mencionar que esta metodología podrá ser utilizada en futuros trabajos para investigar las ondas S. La figura 6 muestra las posiciones relativas de los lugares de golpe.



**Figura 6:** Bosquejo de localización de la línea sísmica en el Sendero de los Monos.

**Elaborado por:** Erika Rojas

Se observa la posición de los geófonos y los golpes. La dirección norte de la pendiente se ha marcado como referencia.

## Levantamiento de información geológica en campo

Durante la campaña de campo, se recolectaron 10 muestras de roca granítica en superficie, con el objetivo de realizar una descripción visual y clasificación mineralógica de las mismas. La descripción visual estuvo orientada a reconocer los signos visibles de la meteorización sobre la superficie de la roca y los gránulos minerales. Con base en la composición mineralógica de las muestras, se empleó el diagrama de Streckeisen para realizar su clasificación. El diagrama de Streckeisen es una herramienta muy utilizada para la caracterización y clasificación de rocas ígneas plutónicas y volcánicas. Para la caracterización geológica de las rocas empleando este diagrama, es necesario conocer la composición mineralógica y la textura de los mismos. La metodología consiste en trazar un gráfico en el que se representan en un eje horizontal el contenido porcentual de silicatos y en el eje vertical el contenido porcentual en sílice de la roca. En el diagrama, se han establecido distintas zonas que corresponden a diferentes tipos de roca plutónica como granito, diorita, gabros, entre otros (Castro-Dorado 2015). En este sentido, se identificó los minerales con una lupa geológica y la cuantificación porcentual de minerales se realizó empleando AutoCAD.

## Análisis de datos

El modelo inicial de velocidades se generó con los datos de las primeras llegadas, que corresponden a las ondas P. Una depuración manual de dichos datos se realizó con la ayuda del software *Pickwin*, para posteriormente determinar las dromocronas en *Plotefra* del programa *Seislmager*. Los parámetros de este primer modelo inicial se muestran en la tabla 1.

**Tabla 1:** Parámetros de datos.

Elaborado por: Erika Rojas

Valores utilizados para la generación del modelo inicial de cambio de velocidades.

<b>Profundidad hasta la parte superior de la capa más baja (m)</b>	<b>Velocidad mínima (Km/s)</b>	<b>Velocidad máxima (Km/s)</b>	<b>Numero de capas</b>	<b>Elevación en la parte inferior izquierda del modelo (m)</b>	<b>Elevación en la parte inferior derecha del modelo (m)</b>
7	0.3	0.7	10	856	849

A partir del modelo inicial y con datos de elevación de los geófonos, se realizaron pruebas de resolución del problema inverso. Los parámetros para la solución de este problema fueron 8 iteraciones y 8 nodos. A continuación, se realizaron varias pruebas numéricas variando el suavizado vertical y manteniendo constante el parámetro de suavizado horizontal. Podemos escoger también el proceso contrario (mantener el suavizado vertical y variar el suavizado horizontal) y llegaremos a la misma regularización. Sin embargo, la variación del suavizado vertical produce una mayor resolución de las perturbaciones laterales.

El problema inverso emplea una combinación de mínimos cuadrados lineales y análisis de tiempo de retardo para invertir las primeras llegadas para una sección de velocidad (Geometrics Inc 2009). Al ejecutar la inversión temporal se generan errores en la inversión de mínimos cuadrados. Para estimar el error en la tomografía sísmica podemos calcular los residuos, es decir las diferencias entre los tiempos de viaje observados  $t_{obs}$  menos los tiempos de viaje calculados  $t_{cal}$  (Araujo 2010). Dado que el software *Seislmager* usa los mínimos cuadrados para resolver el problema inverso Geometrics Inc (2009), el error se puede calcular como error cuadrático medio de estos residuos (*root mean square RMS*):

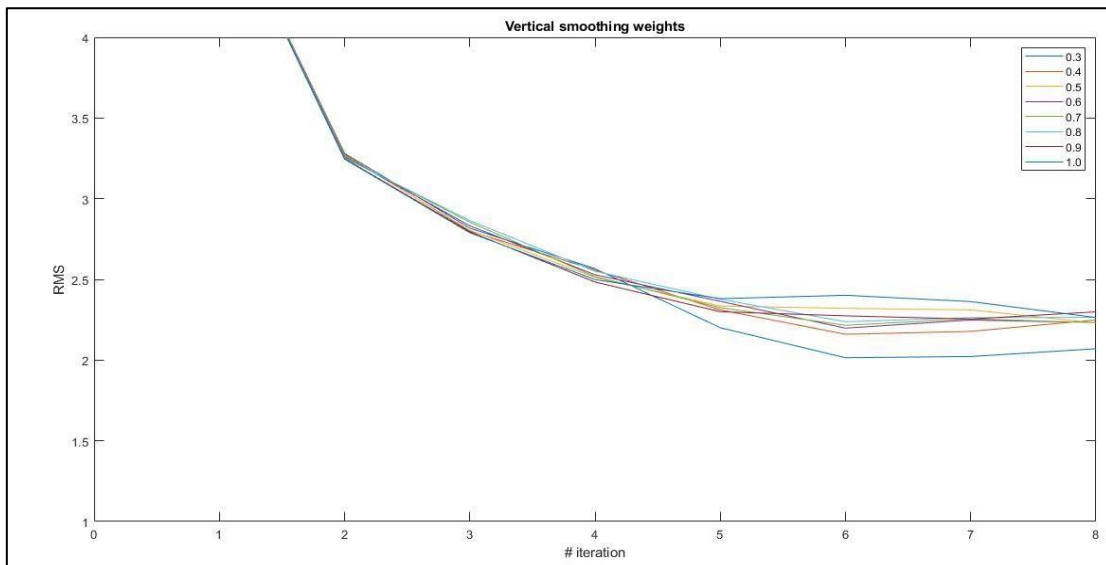
$$\text{RMS} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (t_{i_{obs}} - t_{i_{cal}})^2}}{N}$$

Usando programación en Matlab, se graficaron los errores vs el número de iteraciones para observar la mayor convergencia y menor oscilación con los suavizados mencionados anteriormente. La mejor convergencia del algoritmo fue con 8 iteraciones (Figura 7). Sin embargo, el error es solamente uno de los parámetros para determinar la solución óptima en este tipo de problemas, ya que interesa la convergencia del error hacia un mínimo, y también la estabilidad de la solución. Para ello, se utilizó el criterio de la curva L con la Norma L2, Norma L1 y Norma infinito Aster et al. (2019) para regularizar el problema inverso y elegir el modelo óptimo.

El buzamiento de la falla geológica sobre el perfil estratigráfico, fue determinado escalando la imagen de tomografía y empleando la herramienta ángulo del software AutoCAD versión 2019.

## **RESULTADOS**

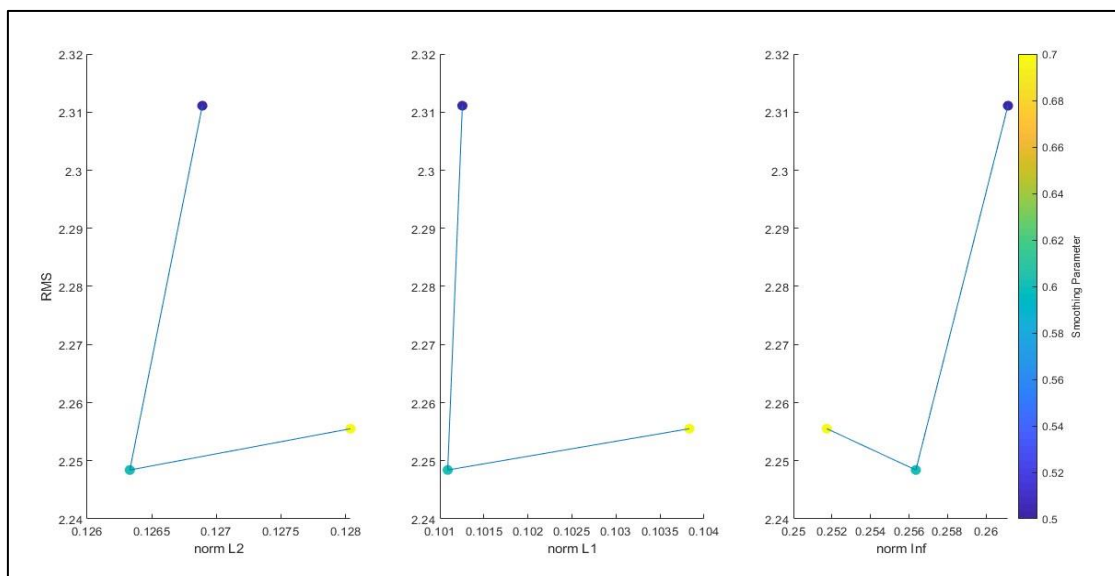
Tomando en cuenta las estrategias para escoger visualmente el valor óptimo de la curva L y la convergencia de los suavizados (Figura 7), se seleccionó la curva paramétrica (Norma L2, Norma L1, Norma infinito) en donde se observa mejor la forma de la letra "L" en la gráfica de la figura 8. Hansen (1998) menciona que, para la curva L cada punto se encuentra asociado a un valor  $\lambda$ , de modo que su resolución consiste en encontrar el valor óptimo representado por el punto de inflexión que separa las partes horizontales y verticales de la curva. El punto de inflexión es el punto de equilibrio entre el eje Y que muestra la media cuadrática con sus siglas en inglés RMS y el eje X que representa la norma. El resultado óptimo se obtuvo en los valores de suavizado 0.6 tanto el horizontal como el vertical (Figura 8).



**Figura 7:** Convergencia del RMS (root mean square) a lo largo de 8 iteraciones.

**Elaborado por:** Erika Rojas

Los colores muestran los diferentes valores de suavizado vertical manteniendo constante el suavizado horizontal en 0.6.

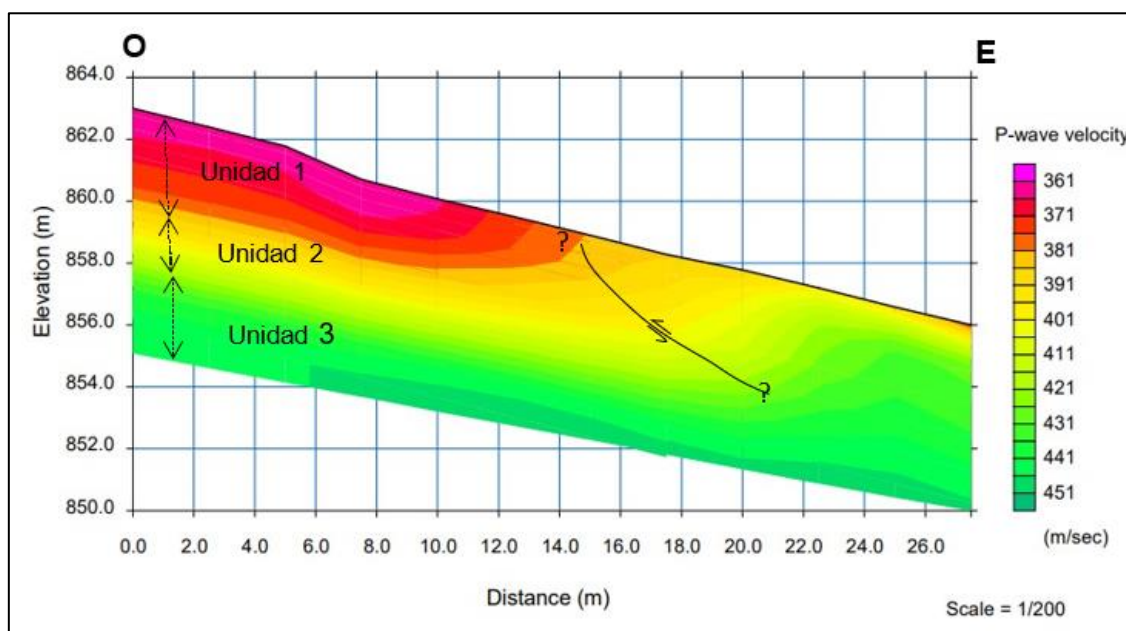


**Figura 8:** Gráfico de las curvas L.

**Elaborado por:** Erika Rojas

Las curvas muestran el proceso de inversión y permite seleccionar el valor óptimo. En el eje vertical se expresa el ajuste del modelo del error RMS. En el eje horizontal muestra los tres tipos de normas entre el modelo a priori y el modelo resultante: L2, L1 y Linf. El parámetro de suavizado horizontal es 0.6 y el parámetro vertical se muestran en la escala de color. El vértice de la curva L se encuentra en valor 0.6 vertical, siendo este el valor óptimo.

Con los parámetros óptimos  $\lambda$  para la curva "L" se generó el modelo de tomografía sísmica que se muestra en la figura 9.



**Figura 9:** Resultado de la tomografía sísmica e interpretación sismoestratigráfico en tres unidades.

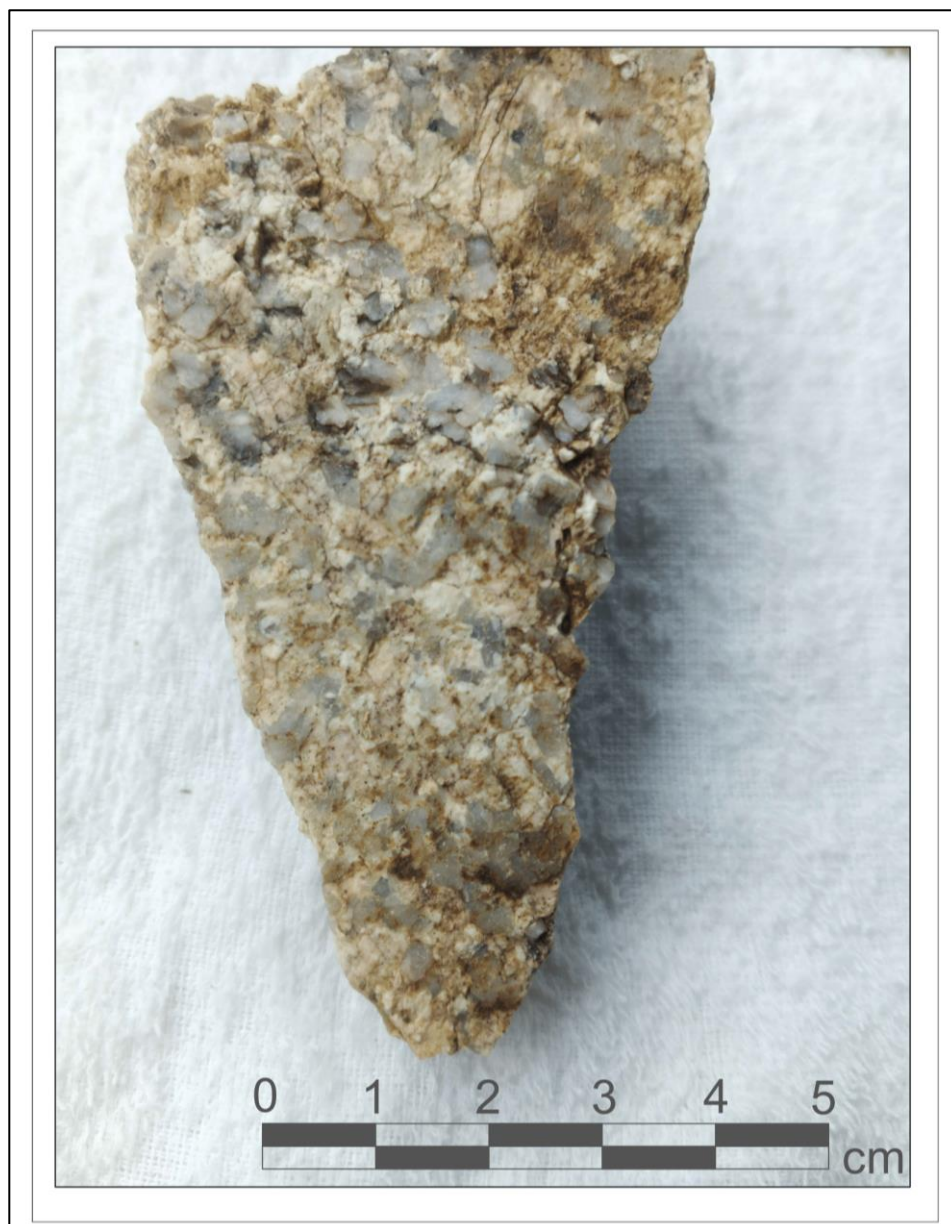
**Elaborado por:** Erika Rojas

Se grafica una posible falla inversa. La escala vertical es la elevación del terreno en metros. Las velocidades de la onda P están en m/s.

La unidad 1 es la más superficial, se ubica entre los 860 m a 863 m de elevación y comprende velocidades de onda entre los 361m/s a 381 m/s. Se presenta en superficie desde los 0 hasta los 15 metros de distancia. Tiene un espesor casi constante de 3 metros que disminuye en dirección este a los 10 metros de distancia, formando una concavidad hacia arriba en esa distancia. La unidad 2 se posiciona a 858 m a 860 m de elevación aproximadamente, donde las velocidades de onda varían entre 391m/s a 421 m/s. Tiene un espesor constante de 2 metros hasta los 10 metros de distancia, donde aumenta a más de 4 metros desde los 14 m a 20 metros de distancia, presentando una deformación que hace disminuir la unidad a 1 metro a los 22 metros de distancia. La Unidad 3, es la más profunda y se ubica a partir de los 858 m de profundidad, con velocidades de 431 m/s a 451 m/s. El contacto entre la unidad 2 y 3 es concordante con la geometría de la unidad 2. Se identificó la presencia de una falla geológica inclinada que afecta la base de la unidad 1, unidad 2 y los primeros metros de la unidad 3.

### **Clasificación de las muestras de roca**

De acuerdo a la clasificación petrográfica empleando el diagrama de Streckeisen, las muestras de rocas corresponden a monzogranitos con 44% de cuarzo, 21% de feldespatos alcalinos y 34% de plagioclasas (Figura 10).



**Figura 10:** Muestra de roca para el análisis petrográfico mediante el triángulo de Streckeisen.  
**Fuente:** Erika Rojas

## **DISCUSIÓN**

Según la Guía de Estándares para el uso de refracción sísmica (ASTM 2011) la unidad 1 corresponde a suelo con material superficial desgastado con velocidades de onda P de 361 m/s a 381 m/s, y CNA (1993) otorga valores de velocidad que corresponden a suelos arenosos (Tabla 2).

**Tabla 2:** Valores comparativos.

**Elaborado por:** Erika Rojas

Valores de velocidad y materiales geológicos entre la Guía de Estándares para el uso de refracción sísmica (ASTM 2011, CNA 1993) y nuestros resultados de tomografía sísmica.

<b>ASTM-D5777</b>		<b>CNA 1993 (Bernal y Tavera 2020)</b>		<b>Resultados de tomografía sísmica in situ</b>	
<b>Descripción</b>	<b>Velocidad vp (m/s)</b>	<b>Descripción</b>	<b>Velocidad vp (m/s)</b>	<b>Descripción</b>	<b>Velocidad vp (m/s)</b>
<b>Material de la superficie desgastada</b>	240-610	<b>Suelos arenosos</b>	170-450	<b>Unidad 1</b>	361-381
<b>Grava o arena seca</b>	460-915	<b>Suelos con finos</b>	300-650	<b>Unidad 2</b>	391-421
<b>Arena saturada</b>	1220-1830	<b>Suelos gruesos</b>	500-900	<b>Unidad 3</b>	431-451
<b>Arcilla saturada</b>	915-2750	<b>Depósitos de talud</b>	800-1400		
<b>Agua</b>	1430-1665	<b>Materiales saturados</b>	1450-1550		
<b>Agua de mar</b>	1460-1525	<b>Roca blanda</b>	1400-2000		
<b>Arenisca</b>	1830-3960	<b>Roca muy fracturada</b>	1800-2500		
<b>Esquisto-arcilla</b>	2750-4270	<b>Roca fracturada</b>	2000-3000		
<b>Esquistosa</b>					
<b>Tiza</b>	1830-3960	<b>Roca intacta</b>	3000-5000		
<b>Caliza</b>	2134-6100	<b>Granito sano</b>	4500-6500		

<b>Granito</b>	4575- 5800	<b>Rocas metamórficas</b>	6000- 7500
<b>Roca metamórfica</b>	3050- 7000	<b>Caliza intacta</b>	5500- 8000

Por lo tanto, con la tomografía de refracción sísmica (Figura 9) se pueden visualizar que la unidad 1 se trataría de suelo arenoso producto de la meteorización del intrusivo ígneo. Además, esta unidad contiene un alto contenido de materia orgánica debido a la abundante vegetación en la zona. Las unidades 2 y 3 serían materiales geológicos semejantes, según la ASTM y la CNA, como suelos con finos y material de la superficie desgastada ya que oscilan velocidades en orden creciente en cuanto a su profundidad. La unidad 2 comprende un rango de velocidad de 391 m/s a 421m/s, mientras que la unidad 3 oscila valores de velocidad de 431m/s a 451 m/s. De acuerdo a los resultados de la tomografía *in situ* podríamos decir que dichas unidades estarían compuestas de roca granítica meteorizada. Hay que señalar que los rangos de velocidad para el granito no meteorizado se encuentran entre 4500 m/s a 6500 m/s (ASTM 2011; CNA 1993). La imagen de tomografía sísmica muestra capas de diferentes velocidades. Dado que suponemos una estructura homogénea del granito de Abitagua, las diferentes velocidades pueden estar asociadas a distintas etapas de meteorización del granito en profundidad.

A los 15 metros de distancia, existe una deformación en el contacto de la unidad 1 y 2, la cual pierde su continuidad lateral para aflorar en superficie. Además, el espesor de la unidad 1, disminuye hasta en un metro desde los 0 hasta los 15 metros de distancia. De la misma forma, la unidad 2 experimenta una ligera deformación a los 18 metros de distancia, en correspondencia con la unidad 1. Así mismo, el contacto entre la unidad 2 y 3 presenta una deformación, elevándose desde los 854 m hasta los 857 metros de elevación, a partir de los 18 metros de distancia. Por estas razones, se propone la existencia de una falla geológica de 42 grados de buzamiento, que divide las unidades 1, 2 y los primeros metros de la unidad 3 en dos bloques, a los 14 metros de distancia. El bloque derecho se está levantando por encima del bloque izquierdo. En principio, esta falla presenta una cinemática contraria a la regional de la falla Tena (inversa), pues las unidades se inclinan en dirección opuesta al levantamiento del Batolito de Abitagua. De este modo, podríamos asumir que se trata de una falla secundaria antitética (Griem

2020), las cuales son comunes en zonas de fallamiento directo (Schlumberger 2023). Antitética significa que la falla y los estratos del perfil estratigráfico se inclinan hacia las direcciones opuestas de la falla principal (Talag) (Griem 2020). Sin embargo, no fue posible observar indicadores cinemáticos de falla en superficie debido a la densidad de la vegetación.

En la figura 10 se puede observar la decoloración de los minerales feldespato (color rosáceo), plagioclasas (color blanquecino) y micas (color marrón). En general, la superficie de roca se encuentra decolorada y con visibles signos de meteorización, indicada por los colores cobrizos a marrones. Algunos de los minerales anteriormente mencionados, han sido removidos y han dejado intersticios vacíos en la superficie rocosa. El cuarzo (color grisáceo) ha sufrido signos de meteorización y algunos gránulos minerales se encuentran fracturados.

Por otra parte, Martí et al. (2004) determinó velocidades de onda P entre 2000 a 6000 m/s para el granito de Albalá, España. De la misma manera, en la investigación de Flinchum et al. (2018) se determinó que la estructura de la zona crítica bajo una cresta de granito inferido de datos de perforación y refracción sísmica tridimensional tiene velocidades de 1200 m/s para el saprolito, el lecho rocoso meteorizado tiene velocidades de 1200 a 4000 m/s y el protolito tiene velocidades superiores a 4000 m/s. Por otro lado, Heincke et al. (2006) sugiere que las velocidades de ondas P ultra bajas a muy bajas se deben a roca altamente fracturada en el granito de los Alpes Suizos. De forma similar, Rodríguez y Ramos (2016) hallaron un corte con dos capas graníticas bien diferenciadas de un gradiente de velocidad en profundidad; la primera capa con velocidades de 1000 m/s a 3000 m/s y un espesor máximo de 30m asociada a la zona de meteorización del horizonte de dicha capa. En la segunda capa las velocidades oscilan de 1000 m/s a 1200 m/s con un espesor máximo de 10 m, lo cual corresponde a esta capa la presencia de granito no alterado. En granitos de zonas tropicales como es el caso de Indonesia, Tungka (2022) terminó velocidades de onda P menores a 1200 m/s para los granitos alterados y el suelo. El estudio más importante en rocas graníticas en el trópico es en el granito de Bukit Timah en Singapur (Zhao *et al.* 1994). En este estudio se halló roca meteorizada a una profundidad de 70 metros, con variaciones de velocidades de onda P desde los 6000 m/s hasta 1000 m/s aproximadamente. Además, los autores sugieren que los perfiles de meteorización del granito de Bukit Timah están correlacionados con el grado de meteorización. Esta meteorización es principalmente química y se relaciona con la disminución del pH con la profundidad de la roca.

En este estudio, los valores de velocidad van desde 361 m/s hasta 451 m/s, esto indica que los procesos de meteorización en el área de estudio, han disminuido notablemente la estructura y resistencia física del granito de Abitagua en la Reserva Colonso-Chalupas, en comparación con investigaciones realizadas en otras latitudes tropicales. A medida que el proceso de meteorización progresa, las rocas experimentan grandes cambios en su estructura y composición mineralógica sobre todo en zonas tropicales (Jaques *et al.* 2020). Por lo tanto, se espera que las velocidades de propagación de onda varíen en las diferentes fases de descomposición del material. En una escala del 1 al 5, donde 1 es roca inalterada y 5 es una roca totalmente meteorizada, Jaques *et al.* (2020) demuestra que la transformación de minerales primarios a secundarios debido a la meteorización química, disminuye hasta 13 veces los valores de  $V_p$ . Además, varios estudios demuestran que  $V_p$  disminuye a medida que el grado de meteorización incrementa. Usualmente, los valores de  $V_p$  en rocas graníticas son menores a 1000 m/s en el máximo grado de meteorización (grado 5). En este estudio, el máximo valor de  $V_p$  fue de 451 m/s.

La resistencia de las rocas está influenciada por los cambios micro-texturales de la roca más que por cambios en la composición mineralógica (Ersoy y Acar 2016). Al respecto, en la figura 2, podemos observar un cambio en la estructura mineralógica del granito debido a la meteorización. En este sentido, en campo se pudo comprobar que bloques de granito meteorizado se disgregaban con la punta del martillo geológico.

En cuanto a la influencia de la meteorización química sobre las rocas graníticas, el feldespato y los silicatos de hierro y magnesio se convierten en arcillas e iones como  $Ca^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Fe^{2+}$  y  $Mg^{2+}$ . Sin embargo, el cuarzo permanece intacto debido a su resistencia ante la meteorización. La arcilla se erosiona gradualmente, produciendo fracturas que terminan rompiendo la roca dejando muchos granos de cuarzo. Justamente, intersticios minerales vacíos y una desintegración parcial del cuarzo se observó en la descripción petrográfica que se muestra en la figura 10. Por lo tanto, el cuarzo, minerales arcillosos e iones disueltos son los productos más comunes de la meteorización química (Earle 2019). Además, en la campaña de campo, fue posible observar fragmentos de cuarzo y arcillas de color blanco destruidos por el suelo como se muestra en la figura 2b.

La intensidad en los procesos de meteorización está controlada por las condiciones climáticas como temperatura, humedad y precipitación (Vallejo 2002). Tomando en cuenta que estas variables climáticas son dominantes en la zona de estudio, es notorio que el macizo rocoso granítico ha experimentado una fuerte meteorización física y química, demostrado por los bajos valores de  $V_p$ , UCS, y los productos de la descomposición mineralógica de la roca. En este sentido, Jaques et al. (2020) plantea una correlación entre los parámetros  $V_p$  y UCS para rocas graníticas. Para granitos con el máximo grado de meteorización, valores de  $V_p$  menores a 500 m/s corresponden a valores de UCS menores a 10 MPa, lo que concuerda con nuestros resultados.

## **CONCLUSIONES**

La tomografía de refracción sísmica en el Sendero de los Monos ha permitido visualizar tres unidades sismoestratigráficas, la unidad 1 asociada a suelos arenosos con velocidades de 361 m/s a 381 m/s, la cual posee un espesor de 3 m.

Las unidades sismoestratigráficas 2 y 3 se interpretan como roca granítica meteorizada con velocidades de onda p de 391 m/s a 451 m/s con un espesor de hasta 4 m.

Con base en la interpretación del perfil sísmico, fue posible reconocer y proponer la existencia de una falla secundaria antitética, puesto que presenta una cinemática contraria a la regional. Esta falla divide las unidades 1, 2 y los primeros metros de la unidad 3 en dos bloques. Lo cual provoca una deformación debido al levantando el bloque derecho sobre el izquierdo.

Las velocidades de onda P reportadas en este estudio (361 a 451 m/s), denotan una gran influencia de la meteorización sobre la roca granítica, al menos en esta área. De la misma forma, los signos de decoloración en los minerales, espacios intersticiales vacíos y el grado de desintegración en la muestra de roca analizada, indican que el granito se encuentra en un estado de total o parcialmente meteorizada.

## REFERENCIAS

- Araujo, S. 2010. Aplicación del principio de Fermat a la tomografía sísmica . Parte I : fundamentos físicos  
Application of Fermat ' s principle for seismic tomography ., 12: 13–18.
- Aster, R. C., Borchers, B., and Thurber, C. H. 2019. Tikhonov Regularization. *En* Parameter Estimation and Inverse Problems, Third, p. 93. Candice Janco.
- ASTM. 2011. Standard guide for using the seismic refraction method for subsurface investigation. 1–14 pp.
- Baby, P., Rivadeneira, M., and Barragan, R. 1999. Style and timing of deformation in the Oriente Basin of Ecuador.
- Baby, P., Rivadeneira, M., and Barragán, R. 2004. Cuenca Oriente: Geología Y petróleo. 296 pp.
- Bernal, I., and Tavera, H. 2020. Estudio Geofísico de los acantilados de la Costa Verde en el Distrito de Magdalena del Mar.
- Castro-Dorado, A. 2015. Petrografía de rocas ígneas y metamórficas. Parainfo.
- Cochrane, R. 2013. U-Pb thermochronology, geochronology and geochemistry of NW South America: rift to drift transition, active margin dynamics and implications for the volume balance of continents: 191.
- Costa, C., Alvarado, A., Audemard, F., Audin, L., Benavente, C., Bezerra, F. H., Cembrano, J., González, G., López, M., Minaya, E., Santibañez, I., Garcia, J., Arcila, M., Pagani, M., Pérez, I., Delgado, F., Paolini, M., and Garro, H. 2020. Hazardous faults of South America; compilation and overview. *Journal of South American Earth Sciences*, 104.
- Cruden, D. M. 1991. A simple definition of a landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology - Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur*, 43: 27–29.
- Duque, J., González, S., Andrade, X., and Garzón, Ó. 2015. PROYECTO: “ LEVANTAMIENTO DE CARTOGRAFÍA TEMÁTICA.
- Earle, S. 2019. The Products of Weathering and Erosion. *En* Physical Geology, 2nd Editio. BCcampus.
- Ersoy, H., and Acar, S. 2016. Influences of petrographic and textural properties on the strength of very strong granitic rocks. *Environmental Earth Sciences*, 75. Springer Berlin Heidelberg.
- Flinchum, B. A., Steven Holbrook, W., Rempe, D., Moon, S., Riebe, C. S., Carr, B. J., Hayes, J. L., Clair, J. S., and Peters, M. P. 2018. Critical zone structure under a granite ridge inferred from drilling and three-dimensional seismic refraction data. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 123: 1317–1343.
- Geometrics Inc. 2009. SeisImager/2D Manual. 257 pp.
- González de Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L., and Oteo, C. 2002. Ingeniería Geológica. Pearson Education, Madrid, España. 744 pp.
- Gracheva, R., and Urushadze, T. 2011. Landslides in a Rural Mountainous Region: Damaging and Resource-Forming Impacts (South Caucasus, Georgia). *Geography, Environment, Sustainability*, 4: 59–68.
- Griem, W. 2020. Geología Estructural Virtual.
- Hansen, C. 1998. Parameter-Choice Methods. *En* Rank-Deficient and Discrete Ill-Posed Problems, pp. 175–208.
- Heincke, B., Maurer, H., Green, A. G., Willenberg, H., Spillmann, T., and Burlini, L. 2006. Case History Characterizing an unstable mountain slope using shallow 2D and 3D seismic tomography, 71.
- Ikiam. 2022. Datos de la estación meteorológica de la Universidad Regional Amazónica Ikiam 2016-2022.

<http://meteorologia.ikiam.edu.ec:3838/meteoviewer/> . Consultado el 12/12/2022

- Jaques, D. S., Marques, E. A. G., Marcellino, L. C., Leão, M. F., Ferreira, E. P. S., and dos Santos Lemos, C. C. 2020. Changes in the Physical, Mineralogical and Geomechanical Properties of a Granitic Rock from Weathering Zones in a Tropical Climate. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 53: 5345–5370. Springer Vienna.
- Kearey, P., Brooks, M., and Hill, I. 2017. The principles and limitations of geophysical exploration methods. *En An Introduction to Geophysical Exploration*, pp. 1–2.
- Martí, D., Carbonell, R., Escuder-virue, J., and Pérez Estaún, A. 2004. Caracterización sísmica del entorno de Mina Ratones en el granito de Albalá, 6: 3–6.
- Rivera, M., Piedra, R., and Paripanca, Y. 2016. Ensayos geofísicos de refracción sísmica y medición de ondas de corte (MASW y MAM) para usos de cimentación en obras de edificaciones. *Universidad nacional de Ingeniería: 6*.
- Rodriguez, W., and Ramos, J. A. 2016. MÉTODOS GEOFÍSICOS PARA LA CARTOGRAFÍA GEOLÓGICA EN UN SECTOR DE MELO , URUGUAY . GEOPHYSICAL METHODS FOR THE GEOLOGICAL MAPPING IN THE MELO SECTOR , URUGUAY.
- Schlumberger. 2023. falla antitética.
- Spikings, R., Cochrane, R., Villagomez, D., Lelij, R. Van Der, Vallejo, C., Winkler, W., and Beate, B. 2014. The geological history of northwestern South America : from Pangaea to the early collision of the Caribbean Large Igneous Province ( 290 – 75 Ma ). *Gondwana Research*, 41. Elsevier B.V.
- Tungka, M. 2022. Determining subsurface geology with seismic refraction tomography survey. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1003.
- Vallejo, L. I. G. De. 2002. Resistencia y deformación de la Matriz rocosa. *En Ingeniería Geológica*, p. 165.
- Zhao, J., Broms, B. B., Zhou, Y., and Choa, V. 1994. A study of the weathering of the bukit timah granite part a: Review, field observations and geophysical survey. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology - Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur*, 49: 97–106.