



UNIVERSIDAD REGIONAL AMAZÓNICA IKIAM

Facultad de Ciencias de la Tierra y Agua

Carrera de Geociencias

**ESTUDIO TOMOGRÁFICO DE LA CORTEZA DEL
CINTURÓN SUBANDINO ORIENTAL ECUATORIANO
ALREDEDOR DE LA ZONA DE LA CASCADA SAN
RAFAEL USANDO DATOS DE LA RENSIG.**

Proyecto de investigación previo a la obtención del Título de:

INGENIERO EN GEOCIENCIAS

AUTOR: ALEX RODRIGO ANZULEZ RIVERA

TUTOR: JOSÉ SEBASTIÁN ARAUJO

Napo-Ecuador

2022

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

Tena, 20 de Julio de 2022

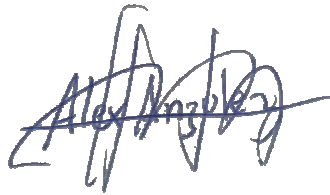
Yo, Alex Rodrigo Anzulez Rivera con documento de identidad N° 1315292563, declaro que los resultados obtenidos en la investigación que presento en este documento final, previo a la obtención del título Ingeniero en Geociencias son absolutamente inéditos, originales, auténticos y personales.

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.

Por la favorable atención a la presente, suscribo de usted,

Atentamente,

Firma:

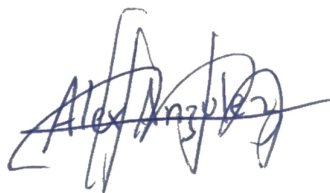
A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Alex Anzulez Rivera', with a horizontal line drawn through the middle of the signature.

Alex Rodrigo Anzulez Rivera

AUTORIZACION DE PUBLICACION EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Yo, ALEX RODRIGO ANZULEZ RIVERA, con documento de identidad N°1315292563, en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación: “Estudio tomográfico de la corteza del Cinturón Subandino Oriental Ecuatoriano alrededor de la zona de la cascada San Rafael usando datos de la RENSIG”, de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ÒRGANICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÒN, 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, 20 de julio de 2022

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Alex Anzulez', with a horizontal line drawn through it.

Alex Rodrigo Anzulez Rivera

131529256

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Certifico que el trabajo de integración curricular titulado: “Estudio tomográfico de la corteza del Cinturón Subandino Oriental Ecuatoriano alrededor de la zona de la cascada San Rafael usando datos de la RENSIG”, en la modalidad de: artículo original, fue realizado por: Alex Rodrigo Anzulez Rivera, 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, 20 de julio de 2022

Firma:

.....

José Sebastián Araujo Soria

C.I: 1802672871

Agradecimientos.

Agradezco a todas las personas que me apoyaron en este proceso educativo, especialmente a mis padres Dimas Anzulez y Silvia Rivera, que incansablemente y de principio a fin, apoyaron mi decisión de estudio, a mis hermanos y hermana, que, entre peleas y consejos, sabemos llevar nuestras vidas. También agradezco al docente investigador José Luis Sánchez Cortez, que fue mi guía vocacional y a Wayra Urku amigo y docente en gran parte de la carrera. Finalmente agradezco a mi tutor de tesis, Sebastián Araujo, quién fue como un padre y guía en el proceso de conocimiento sobre las geociencias, con énfasis en la geofísica. Al igual que Ronny Espín en la geotecnia y aplicaciones.

Dedicatoria

Dedico este trabajo a la vida, que me ha dado tanto, me dio el sonido y el abecedario, con las palabras que pienso y declaro Madre, padre, amigo, hermano y luz alumbrando. También va dedicada para mis padres, hermanos, amigos, docentes y en general a la sociedad, para motivar la investigación y el desarrollo científico, solventando los problemas. Dedico esta investigación a los lectores, para que descubran que fue muy mala idea realizar oleoductos e infraestructuras estratégicas en un lugar con alta sismicidad, y suelos con material volcánico y sedimentos, ya que estas zonas son vulnerables a la erosión según calidad del suelo.

Índice General.

Portada	i
Declaración de derecho de autor, autenticidad y responsabilidad	ii
AUTORIZACION DE PUBLICACION EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	iii
Certificado de dirección de trabajo de integración curricular	iv
Agradecimientos.	v
Dedicatoria	vi
RESUMEN	ix
Palabras claves	ix
ABSTRACT	x
Keywords	x
1. INTRODUCCIÓN	1
2. SITIO DE ESTUDIO: PIEDEMONTE AMAZÓNICO EN LA CASCADA SAN RAFAEL.	2
2.1 La cascada San Rafael y el río Coca.	3
2.2 Volcán El Reventador.	3
3. GEOLOGÍA EN LA ZONA DE ESTUDIO.	4
3.1 Mapa Geológico.	4
3.2 Fallas Subandinas.	4
3.3 Levantamiento Napo.	4
3.4 Unidades Metamórficas.	5
3.5 Intrusiones magmáticas.	5
3.5 Formaciones Sedimentarias y Depósitos Volcánicos.	6
4. MÉTODOS GEOFÍSICOS	7
4.1 Tomografía Sísmica.	7
4.2 Modelo Matemático.	7
4.3 Cortes Tomográficos.	8
5. RESULTADOS	9
6. DISCUSIÓN.	14
6.1 Modelo de la v_P y la sismicidad.	14
6.2 Modelo de la Δv_P	16
6.3 Modelo de v_P/v_S	17
7. CONCLUSIONES.	18

Índice de Figuras

Figura 1. Localización del área de estudio	2
Figura 2. Mapa geológico del lugar de estudio	7
Figura 3. Modelo vP de la sección transversal A. 3.1 Sin sismicidad y 3.2 Con sismicidad.	10
Figura 4. Modelo ΔvP en la sección transversal de los cortes A, B y C	13
Figura 5. Modelo vP/vS de la sección transversal A.....	14

RESUMEN

Las características litológicas y estructurales del subsuelo, son conocimientos importantes al construir una infraestructura estratégica. Por ejemplo, los oleoductos colapsaron a causa de la erosión regresiva que se vio afectada por la sismicidad, litología y fallas, al noreste del Ecuador, esto causó problemas sociales y económicos en el país. La tomografía sísmica permitió inferir las características litológicas del subsuelo, donde, las rocas son correlacionadas con las velocidades de ondas sísmicas. El estudio tuvo como objetivos: determinar las características sismolitológicas, intrusiones magmáticas, estructuras del sistema volcánico y fallas, en la corteza del cinturón Subandino Oriental ecuatoriano alrededor de la cascada San Rafael, por medio de la tomografía sísmica. Las velocidades de ondas sísmica de la Red Nacional de Sismógrafos (RENSIG) se usaron para los modelos de velocidades de ondas sísmica P (vP), la variación de las ondas sísmicas P (ΔvP) y el modelo vP/vS. El modelo vP ayudó a determinar la sismicidad en el área de estudio, encontrando que, la cámara magmática activa del Volcán Reventador causó mayor sismicidad. Además, el modelo vP permitió definir a las fallas de Salado, Baeza, Chaco y Cosanga. El modelo ΔvP ayudó a conocer las geometrías de la Granodiorita y la cámara magmática del Reventador, así mismo con el Levantamiento Napo y los terrenos Loja y Salado. El modelo de vP/vS registró a la cámara magmática del volcán Reventador, definiendo las estructuras volcánicas del subsuelo, afirmando la presencia magma que migran hacia la superficie.

Palabras claves

Tomografía sísmica, Cinturón Subandino Oriental, Volcán Reventador, Cascada San Rafael, granodiorita

ABSTRACT

The lithological and structural characteristics of the crust are important information when building strategic infrastructure. For example, oil pipelines collapsed due to retrogressive erosion, this was affected by seismicity, lithology and faults, northeast of Ecuador, and this caused social and economic problems in the country. The seismic tomography allowed inferring the lithological characteristics of the crust, where, the rocks are link with seismic wave velocities. The study had as objectives: determine the seismolithological characteristics, magmatic intrusions, structures of the volcanic system and faults, in the crust of the Ecuadorian Eastern Subandean belt around the San Rafael waterfall, through seismic tomography. Seismic wave velocities from the National Seismograph Network (RENSIG) were used for the seismic P-wave velocity (v_P) models, the seismic P-wave variation (Δv_P), and the v_P/v_S model. The v_P model helped determine the seismicity in the study area, finding that, the active magmatic chamber of the Reventador Volcano caused greater seismicity. In addition, the v_P model allowed defining the Salado, Baeza, Chaco and Cosanga faults. The Δv_P model helped to understand the geometries of the Granodiorite and the Reventador magmatic chamber, as well as the Napo Uplift and the Loja and Salado terranes. The v_P/v_S model recorded the magmatic chamber of the Reventador volcano, defining the subsurface volcanic structures, confirming the presence of magma migrating to the surface.

Keywords

Seismic Tomography, Eastern Subandean Belt, Reventador Volcano, San Rafael Waterfall, granodiorite

Estudio tomográfico de la corteza del Cinturón Subandino Oriental Ecuatoriano alrededor de la zona de la cascada San Rafael usando datos de la RENSIG

1. INTRODUCCIÓN

Las características litológicas y estructurales del subsuelo, deben ser consideradas, por seguridad, al construir una infraestructura estratégica, especialmente en una zona con alta sismicidad y presencia de volcanes activos. El Noreste del Ecuador fue afectado por dos sismos en el año 1987, específicamente afectaron a las provincias de Sucumbíos y Napo. El terremoto de 1987 tuvo consecuencias como desprendimientos de tierra, inundación en diferentes áreas a causa del taponamiento de ríos y cambios en los caudales (Schuster *et al.*, 1996).

El subsuelo del área del cinturón Subandino Oriental ecuatoriano, alrededor de la cascada San Rafael se ve afectado por la actividad volcánica y sísmica a causa del volcán El Reventador, ya que los terremotos y erupciones volcánicas afectan a las características estructurales de la corteza, debido a que, generalmente producen rupturas superficiales, formación de grietas y fracturamiento en el subsuelo (Gómez *et al.*, 2001).

Las caracterizaciones de la litología y estructuras del subsuelo, debido a su importancia, se estudian por medio de la geofísica. Esta herramienta aporta al conocimiento sobre estructuras corticales en el subsuelo. La tomografía sísmica es parte de la geofísica, donde, las velocidades de ondas sísmicas son correlacionadas con las propiedades mecánicas de las rocas (Rinaldi *et al.*, 2016).

Las velocidades de ondas sísmicas permiten presentar modelos tridimensionales o bidimensionales del subsuelo (Otero, 2008; Tavakoli *et al.*, 2018). Los modelos pueden realizarse a escala de metros (Heincke *et al.*, 2006) o kilómetros (Rinaldi *et al.*, 2016). Estos modelos de velocidades de ondas permiten conocer las características sismolíticas y estructurales a lo largo de un corte sísmico (Castillo-López, González and Duitama, 2019). Estudios tomográficos a escala de metros muestran correlación con el perfil geológico encontrados por perforaciones (Rinaldi *et al.*, 2016).

La cascada San Rafael se localiza en el piedemonte amazónico, esta se encuentra en el sistema volcánico activo del Reventador y un sistema de fallas, esto afecta al subsuelo

del área. Por esta razón, los objetivos de este estudio fueron conocer por medio de la tomografía sísmica, las características sismolitológicas, las intrusiones magmáticas, las estructuras del sistema volcánico y las fallas en el área de estudio, al Noreste del Ecuador en el Cinturón Subandino Oriental, a lo largo de 50 km en la zona alrededor a la desaparecida cascada de San Rafael.

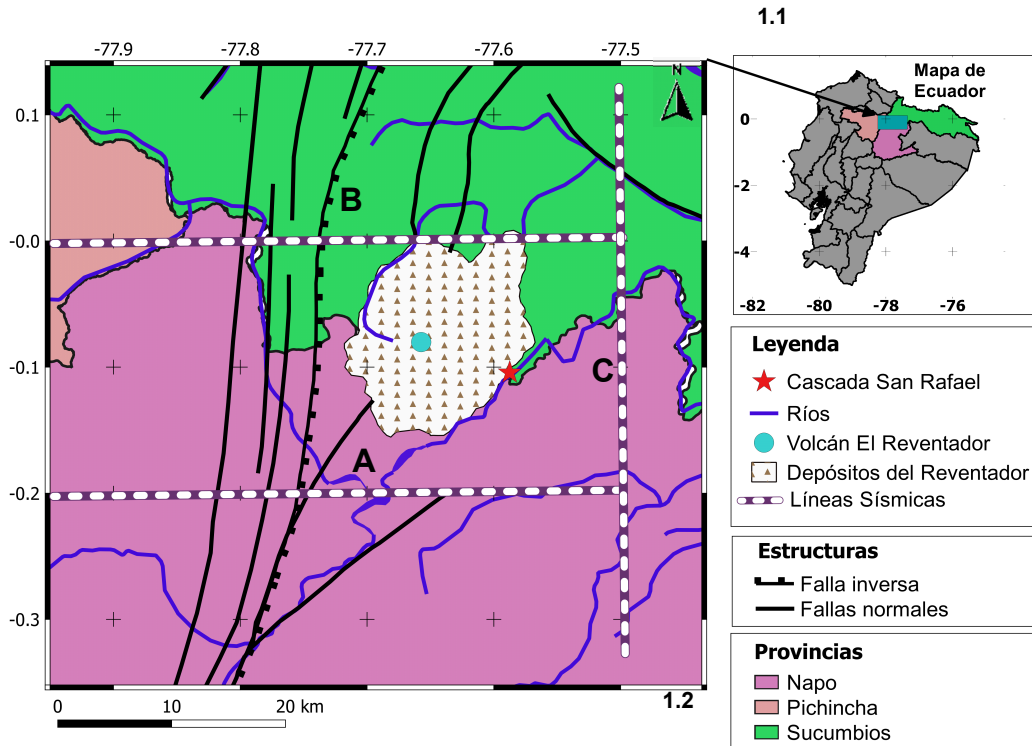


Figura 1. Localización del área de estudio.

1.1. Mapa del Ecuador según división política del INEC (2012). **1.2** Características estructurales del lugar de basado de Pérez et al (2019). Las letras A, B, C son los cortes tomográficos de cada línea sísmica. Las zonas blancas son representan áreas no definidas entre provincias.

2. SITIO DE ESTUDIO: PIEDEMORTE AMAZÓNICO EN LA CASCADA SAN RAFAEL.

La corteza del Cinturón Subandino Oriental Ecuatoriano alrededor de la zona de la cascada San Rafael fue el lugar de referencia del estudio. El área de estudio abarcó a las provincias de Sucumbíos, Napo y Pichincha, al noreste del Ecuador (Figura 1.1). Las líneas sísmicas A y B delimitaron la parte lateral de la cascada San Rafael en el piedemonte amazónico. Mientras, la línea sísmica C definió el límite frontal a la cascada San Rafael. El volcán El Reventador y el río Coca se localizaron en el área de estudio (Figura 1.2).

2.1 La cascada San Rafael y el río Coca.

La cascada San Rafael se localizó en el área de estudio aunque en 2020 colapsó (Reyes *et al.*, 2021), es importante conocer la estructura del subsuelo alrededor de la cascada. Debido a que, la erosión regresiva registrada río arriba después del colapso de la cascada San Rafael, afectó a infraestructuras estratégicas como oleoductos y carreteras a lo largo del río Coca (Reyes *et al.*, 2021). La cuenca hidrológica del río Coca aparece en el piedemonte amazónico, las características de esta cuenca hidrológica permiten la construcción de las hidroeléctricas más importantes del país (Luis and Asensio, 2015).

2.2 Volcán El Reventador.

El volcán Reventador se localiza al noreste del Ecuador en el piedemonte amazónico (Lees *et al.*, 2008), es un volcán activo del país (Figura 1). El volcán es de tipo subpliniano (Samaniego *et al.*, 2008). La altura del Reventador es 3562 m.s.n.m, la última erupción registrada fue en el año 2002 que tuvo un Índice de Explosividad Volcánica (VEI) igual a 4 (Ridolfi *et al.*, 2008). La erupción fue de tipo estromboliana con crecimiento de domos y flujo de lavas (Arnold *et al.*, 2017, 2019), con rocas de tipo andesitas basálticas, andesitas, dacitas y riolitas, de tipo calcoalcalina con concentraciones de medio a alto de Potasio (Tibaldi, 2008).

El cono actual del Reventador tiene un diámetro de 4 km de N-S y 6 km de NO-SE (Hall *et al.*, 2004). La edificación del volcán se ve afectada por fallas inversas (Arnold *et al.*, 2017). El cono volcánico está formado por dos antiguos estratovolcanes conocidos como Paleo Reventador I y II (Schuster *et al.*, 1996). El paleo Reventador I se formó en el Plioceno y la actividad volcánica en el holoceno constituyó el cono volcánico del paleo Reventador II (Nieto, 2000). Gran parte del área cerca al volcán Reventador está conformada por rocas sedimentaria del Jurásico al Cretácico (Schuster *et al.*, 1996).

3. GEOLOGÍA EN LA ZONA DE ESTUDIO.

3.1 Mapa Geológico.

El estudio de la geología de la superficie del lugar de estudio fue basado del Mapa Geológico del Ecuador de Pérez et al (2019) a escala 1:1 000 000. A partir de este mapa se digitalizó el área de estudio (ver Figura 2.1). Luego se clasificó la litología según los terrenos y formaciones sedimentarias (ver figura 2.2), las formaciones sedimentarias se agruparon debido a la similitud esperada en el comportamiento de las ondas sísmicas. Los colores para las grupos litológicos de la figura 2.2, fueron elegidos según la gama propuesta por la Federal Geographic Data Committee (Federal Geographic Data Committee, 2006), donde, sugieren colores según las edades estratigráficas de las rocas sedimentarias y metamórficas.

3.2 Fallas Subandinas.

Los cortes de tomografía cruzaron por el gran sistema de fallas Chingual-Cosanga-Pallatanga-Puná (Alvarado *et al.*, 2016). Las fallas de Salado, Baeza, Chaco y Cosanga son las principales alrededor de la zona de estudio a la cascada San Rafael (Reyes *et al.*, 2021). Las fallas se localizan en el sistema subandino con periodos de deformación durante el Plioceno y el Cuaternario, el piedemonte amazónico ecuatoriano está atravesado por un sistema de fallas inversas que provienen de una tectónica compresiva con movimientos dextrales (Baby *et al.*, 1998). La mayoría de fallas son de rumbo NNE-SSW, las fallas de N-S son de ángulo alto y con buzamiento al Este (Tibaldi, 2008).

3.3 Levantamiento Napo.

El Levantamiento Napo es una cordillera que se localiza al Este de la cordillera Oriental y es parte del Cinturón Subandino Oriental (Figura 2). Este levantamiento está compuesto por las formaciones Tena, Misahuallí y Napo. El levantamiento Napo está atravesada por fallas de rumbo (Baby *et al.*, 1998). La cuenca del río Coca se encuentra en el Levantamiento (ENTRIX, 2008).

Las estructuras del Levantamiento Napo son complejas debido a la presencia de pliegues y deformaciones (Tschopp, 1953). El miembro inferior de la Formación Tena registra la etapa de formación de las estructuras en flor, el frente Subandino se formó al final del período Cretácico (Baby *et al.*, 1998; Villalva, 2006). Las deformaciones del

Levantamiento Napo se da entre los sustratos de las formaciones Misahuallí y Napo (Tschopp, 1953).

3.4 Unidades Metamórficas.

Las unidades de los terrenos Loja y Terreno Salado se localizaron en el cinturón de fuego subandino alrededor de la cascada San Rafael (Figura 2).

El Terreno Loja está constituida por Unidades del Paleozoico al Triásico, en el área de estudio se registraron a las unidades Chigüinda y Agoyán (Figura 2). La Unidad Chigüinda se localiza en la Cordillera Real, está formada por cuarcitas, filitas y semi-pelitas de alto grado de metamorfismo (Litherland, 1994), el metamorfismo se registró en el Carbonífero (Spikings *et al.*, 2021). Mientras, la Unidad Agoyán del Terreno Loja está formado por esquistos y gneis semi-pelíticos, deformados en el Paleozoico (Carranco, 2017), siendo de metamorfismo de bajo grado (Nieto, 2000).

Las unidades Upano y Cuyuja son parte del Terreno Salado. Los Napas son complejo de cabalgamientos, donde, la Unidad Cuyuja registró Napas con 10 km de ancho (Calero *et al.*, 2021), está formada de grafito con moscovita, esquistos pelíticos, intercalaciones de esquistos verde, las edades por K/Ar en moscovitas y biotitas son de 82 ± 3 Ma (Litherland, 1994).

La Unidad Upano está comprendida por meta andesitas, esquistos verdes y esquistos grafitosos (Bolaños *et al.*, 2016), fue formada aproximadamente hace 170 Ma (Spikings *et al.*, 2000). La Unidad Upano está en contacto con el Batolito de Azafrán que es calcoalcalino de tipo I y de edad Jurásica de 145-140 Ma (Paredes and Araujo, 2021), por estar en contacto, el estudio consideró al Batolito de Azafrán como parte del Terreno Salado.

3.5 Intrusiones magmáticas.

Cerca de la cascada San Rafael se encuentran dos intrusiones magmáticas, la Granodiorita del Reventador y el Batolito de Azafrán (ver Figura 2).

La Granodiorita del Reventador se localizó entre las formaciones Napo y Tena y tiene edad Terciaria (ENTRIX, 2008). Por otro lado, la Granodiorita o Batolito de Azafrán es de tipo calcoalcalino I, de edad 145-140 Ma (Paredes and Araujo, 2021), el límite Oeste del Batolito es con la falla de Cosanga en la Cordillera Real y zona subandina de la

Cuenca Oriente. Las rocas cercanas al Batolito de Azafrán son moderadamente foliadas, emplazadas en el Jurásico Superior y Cretácico Inferior (Litherland, 1994; Spikings *et al.*, 2015; Carranco, 2017).

3.5 Formaciones Sedimentarias y Depósitos Volcánicos.

Las formaciones sedimentarias Napo, Misahuallí y Tena fueron se identificaron en el área de estudio, de igual forma a los depósitos volcánicos del Cayambe y Reventador.

El espesor de la Formación Tena varía desde 250 m hasta 1000 m (Tschopp, 1953). La Formación Tena está constituida por conglomerados gruesos, lutitas, limolitas y mayor presencia de arenisca, la edad es del Maastrichiano al Paleoceno (Romero *et al.*, 2019). La arenisca fue depositada en condiciones transgresivas, sobre una superficie de erosión (Baby, Rivadeneira and Barragán, 2004).

La Formación Napo tiene espesor promedio de 500 m (Tschopp, 1953). La edad de las calizas, lutitas y areniscas de la Formación Napo es del Albiano al Maastrichiano (Jaillard, 1997). La parte superior de la Formación está constituido por lutitas y la inferior por calizas y areniscas (Baby, Rivadeneira and Barragán, 2004).

La Formación Misahuallí está compuestas de lavas basálticas y brechas, la edad registrada es del Jurásico (Baby *et al.*, 2004; Reyes *et al.*, 2021). El espesor promedio de la Formación Misahuallí es de 1 a 3 km (Tschopp, 1953).

Los depósitos volcánico del Cayambe y Reventador, están conformados por piroclastos de tipo riolítico y escombros volcánicos (Pérez *et al.*, 2019).

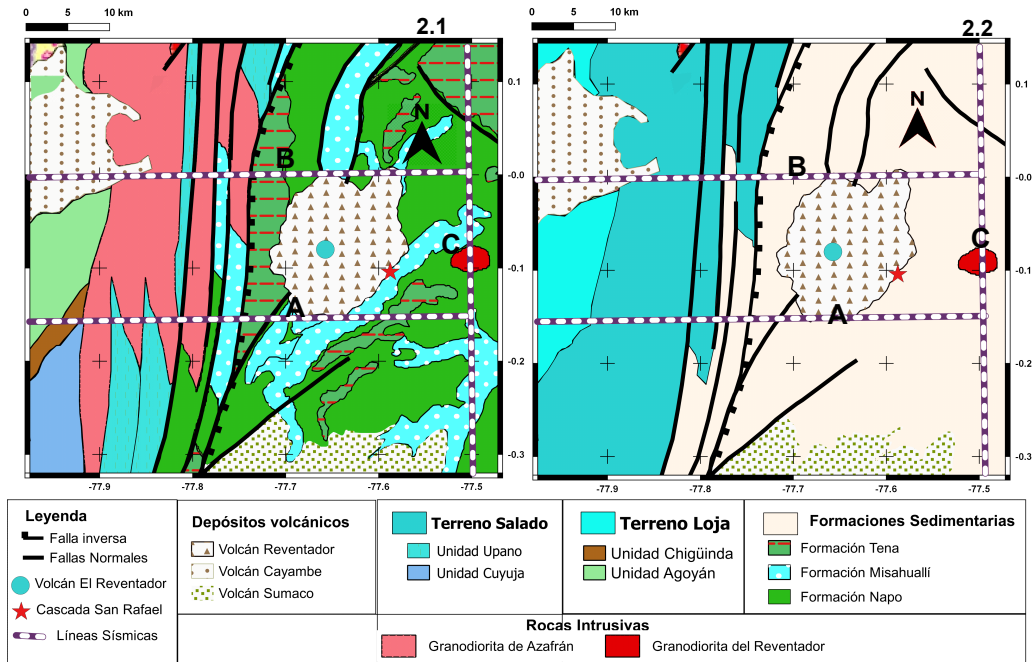


Figura 2. Mapa geológico del lugar de estudio modificado de Pérez *et al.*, 2019.

2.1 Formaciones, unidades y depósitos volcánicos sin clasificar. Las simbologías de las subdivisiones de grupos representan la descripción. **2.2** Clasificación por terrenos y material sedimentario. Las simbologías con letras en negrilla representan la descripción. Las simbologías de los depósitos volcánicos y rocas intrusivas son las mismas en el mapa 2.1 y 2.2.

4. MÉTODOS GEOFÍSICOS

4.1 Tomografía Sísmica.

El estudio se basó en el modelo tomográfico realizado por Araujo *et al* (2021). Los tiempos de llegada de las ondas S y P de la Red Nacional de Sismógrafos (RENSIG) fueron utilizados para obtener el modelo. Los datos del Instituto Geofísico utilizados en el modelo fueron desde 1988 hasta el 16 de abril del 2016 (Araujo *et al.*, 2021). El modelo presentado en Matlab fue procesado, seleccionado, corregido y georreferenciado, para cada corte tomográfico del estudio.

4.2 Modelo Matemático

El modelo matemático se enfocó en el problema inverso no lineales resuelto por

mínimos cuadrados (Araujo *et al.*, 2021). La solución del problema de Tikhonov se da por la inversión bayesiana, invirtiendo los tiempos de llegadas de las ondas S y P (Tarantola and Valette, 1982). El modelo es de matrices, contiene parámetros **m** y datos **d** y una relación funcional: $d = g(m)$.

La función **g** no es lineal. El vector **d** contiene el tiempo de viaje de las ondas P y la diferencia entre el tiempo de viaje de las ondas S y P. El vector de datos **m** contiene parámetros de la inversión de la velocidad onda P, la relación entre la velocidad de ondas P y S, los hipocentros de la sismicidad, el tiempo de origen de los sismos y el tiempo de retardo en las estaciones sísmicas (Paredes and Araujo, 2021).

4.3 Cortes Tomográficos

Los cortes tomográficos fueron realizados a partir de las líneas sísmica, donde, tres líneas fueron trazadas para cada corte tomográfico.

El límite del área de interés fue definida al Este de la cascada San Rafael, siendo la línea sísmica C el límite de Norte-Sur. Las líneas sísmicas (A y B) limitaron con la línea sísmica (C), los cortes tomográficos (A y B) fueron en dirección Este-Oeste, donde, se seleccionó un punto al Norte y al Sur del volcán Reventador como centro de estos cortes sísmicos (ver figura 2).

Los cortes de tomografía (A y B) tuvieron centro con coordenadas: A (-77.72 O, -0.14 S) y B (-77.72 O, 0.0 0 S). El tercer corte tomográfico (C) tuvo coordenadas de punto centro en C (-77.5 O, -0.07 S), el corte fue de Norte-Sur, como se puede observar en la Figura 2. Las líneas sísmicas tuvieron una longitud de 50 km y la profundidad de la tomografía sísmica fue de 25 km desde superficie o 30 km en la escala de la tomografía.

Los cortes de tomografía abarcaron a las Provincias de Sucumbíos, Napo y Pichincha, a lo largo del piedemonte amazónico hasta la cascada San Rafael. La tomografía buscó estudiar la sección transversal, mediante las velocidades de onda P (v_P), la variación de la velocidad de onda P (Δv_P) y el modelo v_P / v_S . Los modelos de cada corte tomográfico, se correlacionaron con la litología, intrusiones magmáticas y las estructuras del subsuelo en el sitio de estudio.

5. RESULTADOS

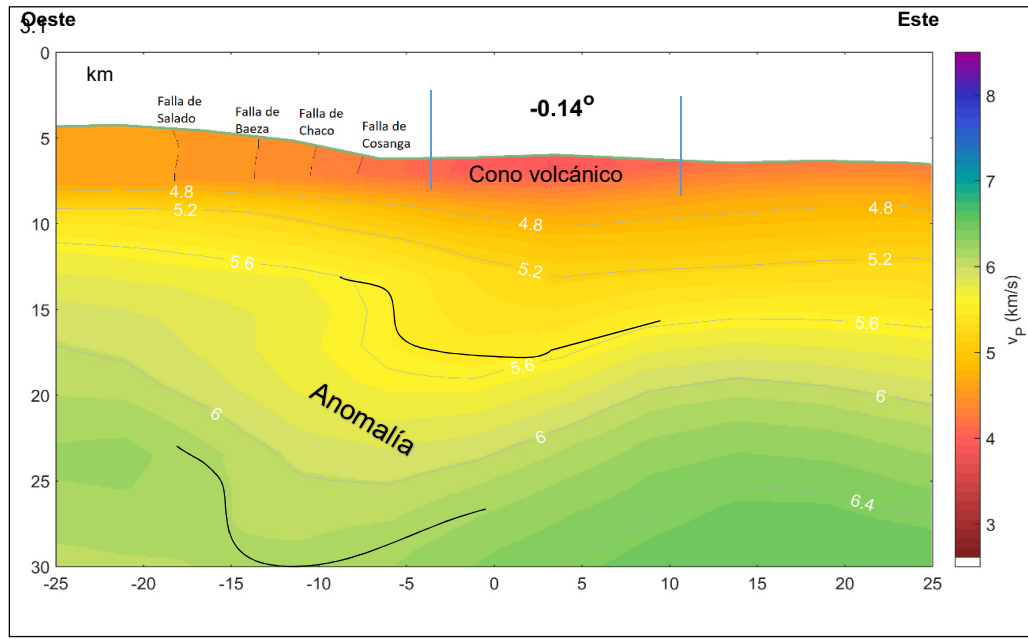
Los resultados obtenidos fueron: El modelo de las velocidades de onda P (v_P) para el perfil sísmico A (ver Figura 3). Los modelos de las variaciones de las velocidades de ondas P (Δv_P) para las líneas sísmicas A, B y C (Figura 4). El modelo v_P/v_S para el perfil sísmico A (ver figura 5).

Se obtuvo el modelo de las velocidades de onda P (v_P) solo para el perfil sísmico A, donde, por medio de líneas se presentaron las zonificaciones con diferentes v_P (ver Figura 3). El rango de valores de v_P en la tomografía presentó valores máximos de v_P de 6.4 km/s y mínimos de 3 km/s. Los valores mínimos de v_P se registraron a 5 km de la superficie en el centro de la tomografía, donde, se consideraron valores de v_P de 3 km/s a 5.2 km/s como de valores mínimos de v_P , la zona de valores mínimos de v_P presentó cambios perpendiculares en la superficie al Oeste de la tomografía sísmica. No se observó homogeneidad y continuidad lateral en las líneas de v_P a lo largo de la tomografía en superficie, como las observadas a partir de v_P de 4.8 a 5.2 km/s (ver figura 3.1).

La zona con valores medios de v_P fue definida entre 5.3 km/s a 6.1 km/s, donde, se encontró una anomalía, siendo una discontinuidad lateral con forma cóncava hacia arriba en valores de $6.1 > v_P > 5.5$ km/s. Esta anomalía se registró a una profundidad entre 10 a 25 km a la escala de la tomografía, a 15 km del Centro-Oeste de la tomografía sísmica (ver figura 3.1).

La zona con valores altos de v_P se consideró $v_P > 6.2$ km/s, estos resultados se registraron a una profundidad de entre 20 a 30 km a la escala de la tomografía. La zona de altos valores de v_P mostró ondulación en el Centro-Oeste de la tomografía (ver figura 3.1).

Los resultados de la figura 3.2, presentó la sismicidad a lo largo de la línea sísmica A, donde, se encontró las zonas con mayor de sismicidad, al centro-este de la tomografía sísmica, a 5 km de profundidad desde la superficie. Además, otro lugar con mayor concentración de sismicidad se localizó al Centro-Oeste de la tomografía sísmica entre 10 a 25 km de profundidad a la escala de la tomografía ver figura 3.2, encontrándose muy cerca de la anomalía de forma cóncava hacia arriba, en la zona de valores medios de v_P .



3.2 km

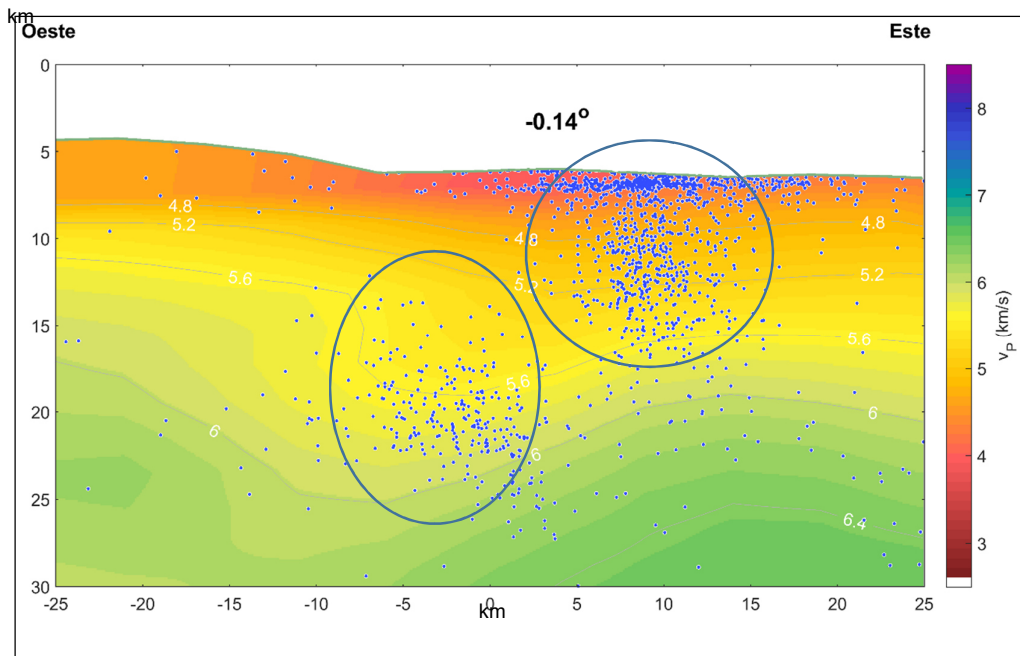


Figura 3. Modelo v_P de la sección transversal A.

3.1 Modelo sin sismicidad. **3.2** Modelo con sismicidad. El cero de la escala horizontal corresponde al centro del corte. Las geometrías ovaladas representan las zonas con mayor concentración de sismicidad. Las líneas negras representan la zona anómala en las v_P .

Los modelos de las variaciones de las velocidades de ondas P (Δv_P) de la figura 4, muestran la tomografía sísmica para las líneas sísmicas A, B y C. Los resultados indican la tomografía frontal a la cascada San Rafael (C) y las tomografías laterales (A y B) a lo

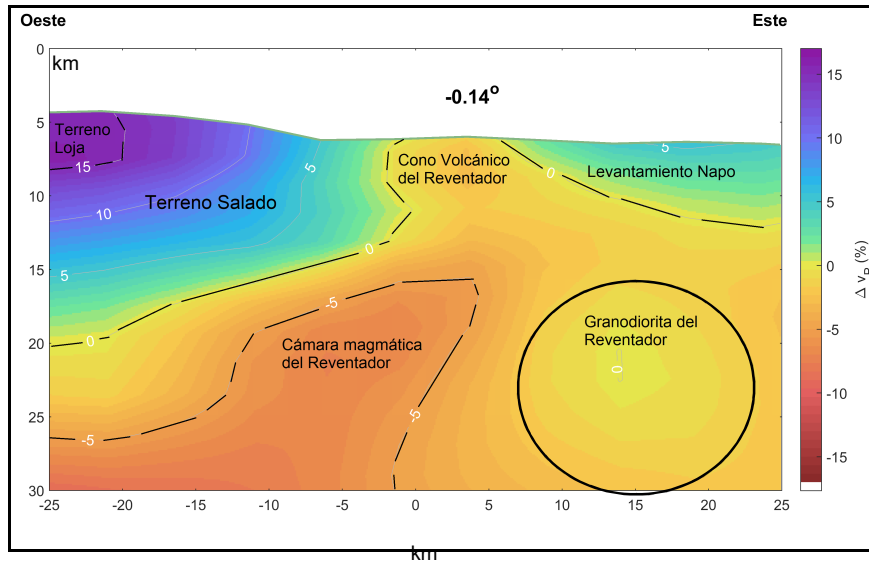
largo del Cinturón Subandino en el piedemonte amazónico. Los modelos tomográficos de los cortes A, B y C tuvieron un rango entre 17% y -17% en las ΔvP , donde, por medio de líneas se mostraron las zonificaciones de las diferentes ΔvP .

Los modelos tomográficos revelaron diversas formas y geometrías. Las ΔvP en la tomografía A mostró una geometría circular localizada 10 km al Centro-Este, a una profundidad de 15 a 30 km a la escala de la tomografía, con valores de $-5 > \Delta vP > 0$ (ver figura 3A). Esta geometría no apareció en el corte sísmico B. Por otro lado, en el corte sísmico C, esta geometría fue observada con los mismos valores de ΔvP , que fue localizada al Norte a 17 km de profundidad a la escala de la tomografía (ver figura 3C).

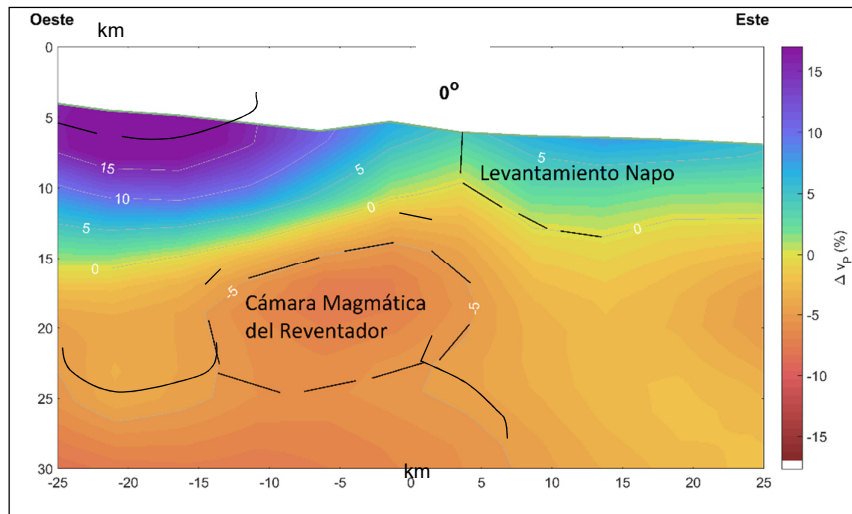
Una geometría con forma campana de forma cóncava hacia abajo fue observada en la tomografía de la línea sísmica A, con $\Delta vP < -5$, se localizó al Centro-Este de la tomografía a 15 km de profundidad (ver Figura 4A). Esta geometría también se observó en la tomografía B, aunque, la geometría se presentó más ancha a mayor profundidad (ver Figura 4B). Por otro lado, en la figura 4C con $\Delta vP < -5\%$ mostró una geometría ovalada al Sur de la tomografía, a una profundidad de 15 km con 5 km de potencia.

Las formas ovaladas fueron otras geometrías observadas en los resultados de los modelos tomográficos. Estos óvalos fueron localizados al Oeste, con ΔvP de 0 a 17% y 15 km de potencia (ver figura 4A). Por otro lado, la zona Este de la misma tomografía también presentó formas ovaladas, con $6\% > \Delta vP > 0\%$ y 5 km de potencia (ver figura 4B). Estas diferentes geometrías se repiten en la figura 4B, con diferente potencia y longitud sobre superficie. Pero, la superficie al centro de la tomografía en la figura 4B, no muestra discontinuidad con valores de 0 a -5% de ΔvP como los registrados en la en la figura 4A. También, la figura 4C presentó una geometría cóncava hacia arriba con una longitud en superficie de 30 km y 5 km de potencia, con $6\% > \Delta vP > 0\%$, estas características son similares a las observadas en al lado Este en las tomografías de figura 4A y 4B.

A



B



C

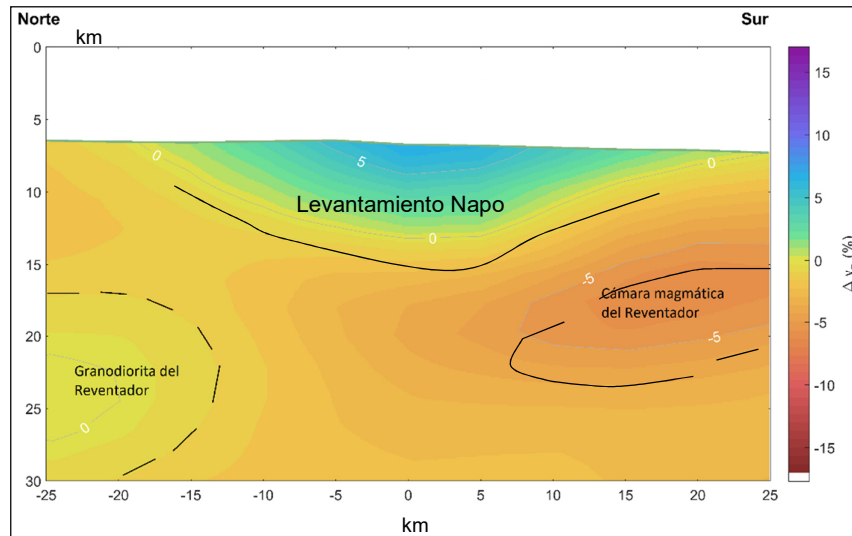


Figura 4. Modelo ΔvP en la sección transversal de los cortes A, B y C. El cero de la escala horizontal corresponde al centro del corte. Las líneas negras corresponden a las geometrías de interés.

El resultado de la figura 5 muestra el modelo vP/vS solo para el perfil sísmico A. El modelo presentó valores mínimos de 1.55 y máximo de 1.75 de vP/vS . Los valores mínimos de vP/vS se registraron en el centro de la tomografía a 15 km de profundidad desde la superficie. Además, los resultados mostraron una geometría cóncava hacia arriba con potencia de ~15 km y una longitud de ~40 km en superficie, esta geometría tiene valores de $vP/vS < 1.64$. Además, los resultados mostraron continuidad lateral a partir de 20 km de profundidad a la escala de la tomografía con $vP/vS > 1.69$.

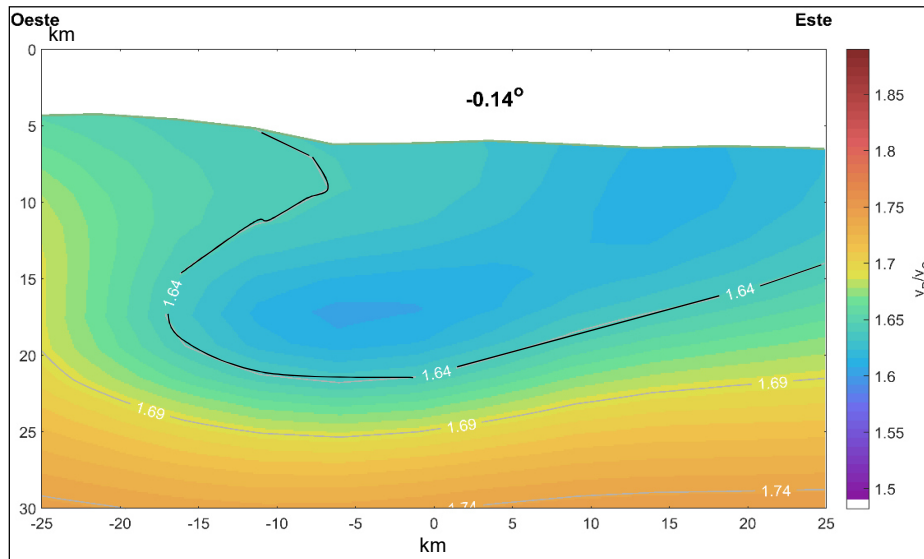


Figura 5. Modelo v_P/v_S de la sección transversal A. El cero de la escala horizontal corresponde al centro del corte. Las líneas negras corresponden a la geometría de interés.

6. DISCUSIÓN.

Los resultados de los modelos de velocidades de ondas sísmica permitieron generar tomografías que podrían ser comparadas con el mapa geológico para cada línea sísmica, por medio de las tomografías sísmicas se podría identificar los estratos, intrusiones magmáticas, la geometría del sistema volcánico y de las fallas, en la región del piedemonte amazónico alrededor de la cascada San Rafael. Los resultados fueron modelos v_P , Δv_P y v_P/v_S y en esta sección se discutirán sobre estos modelos.

6.1 Modelo de la v_P y la sismicidad.

Las discontinuidades laterales y la no homogeneidad de las v_P en las zonas de bajas velocidades (figura 2.1), podrían estar asociadas a fallas o rupturas superficiales. Conociendo que, por medio de la tomografía sísmica se puede determinar los límites de las estructuras geológicas y presencias de fallas (Araujo *et al.*, 2021), y los cambios perpendiculares se deben a la disminución de las v_P , generalmente por presencia de fallas (Heincke *et al.*, 2006). Estas afirmaciones, los cambios perpendiculares desde superficie fueron comparados con la localización de las fallas del Mapa geológico de la figura 1. Encontrando que, las fallas del mapa geológico y los cambios perpendiculares

de vP, tienen la misma geolocalización, indicando que el modelo vP permitió localizar a las fallas del Cinturón Subandino, estando al Oeste de la tomografía sísmica las fallas de Salado, Baeza, Chaco y Cosanga. Algunas fallas alcanzan hasta 5 km de profundidad en el subsuelo (ver figura 3.1).

Las vP no homogéneas de la superficie en los resultados de la tomografía A (ver figura 3.1), podrían deberse a las diferentes características litológicas del subsuelo. Conociendo que, las vP ayudan a la correlación de la litología con calidad de roca baja (Heincke *et al.*, 2006). Donde, las $vP \sim 4.8$ km/s afirman la presencia de rocas de tipo andesítica e intrusivas (Molina *et al.*, 2005) y las $vP < 4.8$ km/s indican rocas con alta porosidad, como tobas y depósitos piroclásticos (Lira, 2011). Además, las $vP < 4$ km/s obtenidas en estudios tomográficos a escala de 5 km, afirman la presencia de sedimentos, material volcánico y edificios volcánicos relativamente más jóvenes (Tanaka *et al.*, 2002).

Las zonas más rígidas fueron definidas cuando existían $vP > 4.8$ km/s, las rocas de tipo metamórfica fueron localizadas al Oeste de la tomografía sísmica (ver figura 3.1), donde debería estar las unidades de Cuyuja, Chigüinda, Agoyán y Upano, limitada con la Granodiorita de Azafrán. Sin embargo, no se determinó con exactitud de forma individual cada Unidad según la figura 2.1. Aunque, las características sismolíticas de la tomografía sísmica (figura 3) generaban mejor correlación con la clasificación litológica propuesta en el mapa de la figura 2.2. El modelo vP mostró la subdivisión entre zonas con litología tipo metamórfica, material volcánico y sedimentos. Por otro lado, el cono volcánico del Reventador, los materiales de los procesos eruptivos de los volcanes Reventador y Sumaco, y las formaciones sedimentarias de Napo, Tena y Misahuallí, se encontraron en el área con $vP < 4.8$ km/s a partir de la falla del Cosanga (ver figura 3.1).

La anomalía localizada en la zona media de vP (figura 3.1) afectó a la zona de altas velocidades, la zona de altas velocidades de vP se encontraron en la corteza inferior debajo de los 25 km. Las anomalías podrían indicar la presencia de estructura relacionada con el volcán El Reventador. Las anomalías en las zonas de altas vP se interpretaron como intrusiones relacionados con la presencia de magma (Yaroshenko *et al.*, 2022) pero se necesita del modelo ΔvP para discutir con exactitud sobre esta anomalía. Los resultados de la Figura 3 permitieron conocer la sismicidad del área alrededor de la cascada San Rafael. El modelo vP con sismicidad (figura 3.2) fue comparado con el modelo sin sismicidad (figura 3.1), encontrando que: la sección transversal A de la tomografía registró la mayor concentración de puntos de sismicidad

debajo del cono del volcán El Reventador, afirmando que: la sismicidad del área de estudio está asociada con la actividad volcánica del Reventador.

6.2 Modelo de la ΔvP .

Los modelos de las ΔvP de la figura 4, presentaron una geometría circular localizada 10 km al Centro-Este, a una profundidad de 15 km a la escala de la tomografía, con 15 km de potencia y valores de $-5 > \Delta vP > 0$ (ver figura 4A), este cuerpo podría tratarse de material intrusivo. Conociendo que, el ΔvP de una granodiorita o material intrusivo se encuentra entre 1% a -4% según Luan *et al* (2021). Los modelos de la ΔvP al compararlos con el mapa geológico (figura 2.2) determinamos que: El corte sísmico A registró a la granodiorita del Reventador con la geometría circular, en la figura 4A de radio ~ 7 km. Por otro lado, el corte sísmico no registró a esta geometría. Mientras, el corte sísmico C documentó la parte lateral de la granodiorita de Reventador en la figura 4C.

La geometría ovalada de la figura 4C y la forma cóncava hacia abajo de la figura 4A y 4B, identificadas en el modelo con $\Delta vP < -5\%$, podrían representar una estructura asociada al volcán El Reventador, esta estructura se localizó en el mismo sitio que la anomalía del modelo vP (figura 3A). Conociendo que: para valores de $\Delta vP < -5\%$ es indicativo de presencia de una cámara magmática (Londoño y Kumagai, 2018). También, Paredes y Araujo (2021) indican la presencia de fluidos magmáticos para $\Delta vP < -5\%$. Entonces, se corroboró la existencia de una cámara magmática con geometría ovalada con de eje mayor ~ 10 km (ver figura 4A, 4B y 4C).

Las formas ovaladas encontradas en la superficie, al Este de las tomografías A y B, con $5 > \Delta vP > 0$ (ver figura 4A y 4B), tienen las mismas características de ΔvP que, la geometría cóncava hacia arriba de la figura 4C. Estas podrían estar relacionadas con las formaciones sedimentarias y depósitos volcánicos. Dado que, el material volcánico grueso e intrusivo está asociado a $0\% < \Delta vP < 5\%$ (Londoño y Kumagai, 2018). Al compararse con el mapa geológico de la figura 2.2, se afirmó la presencia de las formaciones sedimentarias y depósitos volcánicos, estas se agruparon y generalizaron como Levantamiento Napo debido a las características de las ΔvP . No se observó individualmente a los Depósitos Volcánicos y a las formaciones sedimentarias Napo y Tena, debido a que, tenían potencias inferiores a la escala de la tomografía sísmica.

Las discontinuidades de las ΔvP en la superficie de la corteza con ΔvP 0 a -5% de se

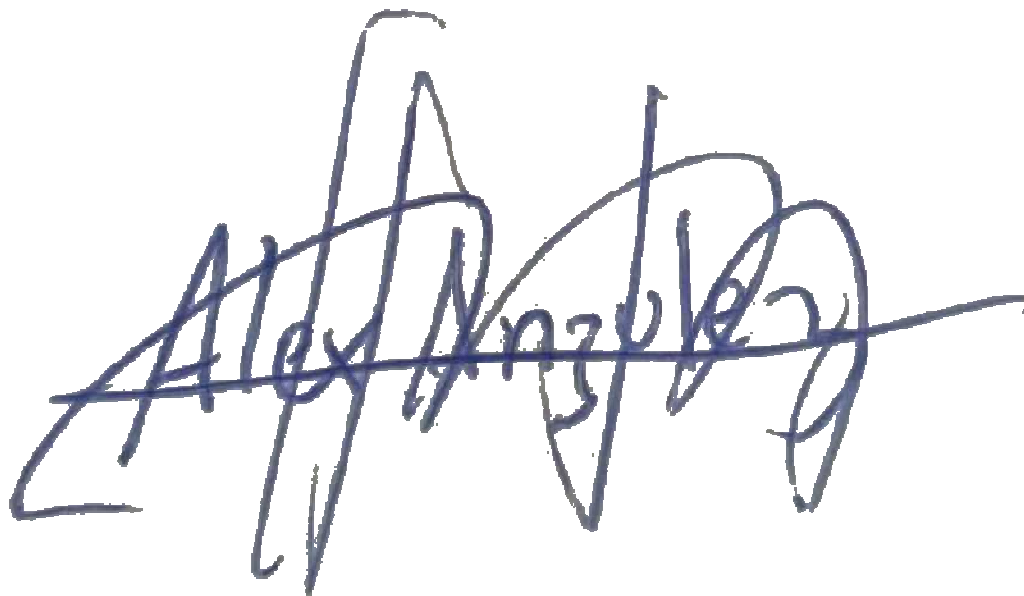
asoció directamente con la localización del cono volcánico del Reventador, identificado en el modelo vP. La discontinuidad difiere en las formas ovaladas que afloran en superficie tanto al Este como al Oeste de la tomografía sísmica A y B (Figura 4A y 4B).

Las formas ovaladas localizada en superficie al Centro-Oeste de la tomografía (figura 4A y 4B), con ΔvP de 0 a 15%, podrían ser asociadas a la granodiorita de Azafrán como parte del Terreno Salado. Dado que, las formas ovaladas tienen iguales características de: ΔvP y localización al comparar con el mapa geológico (figura 2.2). Entonces, se indicó la presencia del Terreno Salado con $15 < \Delta vP < 0$. Estos registros de ΔvP se encontraron a 3km al Oeste desde el punto centro en la superficie en la tomografía A y B. El Terreno Salado no se registró en el resultado de la tomografía sísmica C (ver figura 4C).

Los resultados de las figuras 4A y 4B mostraron estructuras ovaladas con $\Delta vP > 15\%$. Las estructuras ovaladas localizadas al Oeste de la tomografía podrían asociarse con el Terreno Loja. Las tomografías (figura 4A y 4B) al compararse con el mapa geológico (figura 2.2) mostraron las mismas localizaciones con el Terreno Loja. Con esto se afirma que: el Terreno Loja aflora en la superficie y tiene geometría en el subsuelo de forma ovalada, con un eje mayor ~ 5 (figura 4A y 4B). Este Terreno no fue identificado en la línea sísmica C.

6.3 Modelo de vP/vS.

El modelo vP/vS (Figura 5) mostró la tomografía de la sección transversal A. La tomografía reveló una geometría cóncava hacia arriba. La geometría podría estar asociado con el volcán Reventador y el sistema hidrotermal de una cámara magmática activa. Los altos valores altos de vP/vS asumen la presencia de fluidos (Pardo *et al.*, 2009; Koulakov *et al.*, 2019). Según Koulakov *et al* (2009), las vP/vS ~ 1.8 indica la existencia de cámara magmática que alimentan a un volcán. Además, las vP/vS de 1.3 a 1.6 son interpretadas como la acumulación de vapor en zonas altamente fracturadas del sistema hidrotermal (Londoño y Kumagai, 2018), con esto se afirmó la presencia de fluidos magmático que migran hacia la superficie, permitiendo conocer las estructuras del subsuelo relacionadas con el volcán Reventador.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Alex Angulo', written in a cursive style with a horizontal line crossing through the middle of the letters.

7. CONCLUSIONES

La tomografía sísmica generó modelos coherentes para conocer las características sismolitológica, intrusiones magmáticas, estructuras del sistema volcánico y fallas, al piedemonte amazónico alrededor de la desaparecida cascada de San Rafael.

Las velocidades de ondas sísmica y la localización de sismos, sirvieron para detallar la sismicidad del área alrededor de la cascada San Rafael, encontrando que: la zona tiene alta sismicidad y es producto a la actividad volcánica del Reventador.

El modelo vP permitió localizar las fallas de Salado, Baeza, Chaco y Cosanga. Las vP ayudaron a la delimitación de las características sismolitológica en el perfil tomográfico.

Los ΔvP modelos permitieron determinar las estructuras sismoestratigráficas para cada corte sísmico, permitiendo conocer la geometría de la Granodiorita del Reventador y la cámara magmática del Volcán.

Los resultados de la tomografía del modelo ΔvP caracterizaron al Levantamiento Napo, con las formaciones Napo, Tena y Misahuallí, teniendo valores de ΔvP de $0\% < \Delta vP < 5\%$. Los valores de ΔvP para los terrenos Loja y Salado fueron de $\Delta vP > 15\%$ y de 0% a 15% en ΔvP .

El mapa Geológico y las ΔvP , ayudaron a delimitar la zona según la litología alrededor

de la cascada San Rafael.

El modelo de vP/vS registró a la cámara magmática del volcán Reventador en el subsuelo, conociendo las estructuras volcánicas, afirmando la presencia de fluidos de magmas que migran hacia la superficie.

8. REFERENCIAS

- Alvarado, A. *et al.* (2016) 'Partitioning of oblique convergence in the Northern Andes subduction zone: Migration history and the present-day boundary of the North Andean Sliver in Ecuador', *Tectonics*, 35(5), pp. 1048–1065. doi: 10.1002/2016TC004117.
- Araujo, S. *et al.* (2021) 'A preliminary seismic travel time tomography beneath Ecuador from data of the national network', *Journal of South American Earth Sciences*, 111(July). doi: 10.1016/j.jsames.2021.103486.
- Arnold, D. W. . *et al.* (2017) 'Decaying Lava Extrusion Rate at El Reventador Volcano , Ecuador , Measured Using High-Resolution', *Journal of Geophysical Research: Solid Earth RESEARCH*, 122, pp. 9966–9988. doi: <https://doi.org/10.1002/2017JB014580>.
- Arnold, D. W. D. *et al.* (2019) 'Lava flow morphology at an erupting andesitic stratovolcano: A satellite perspective on El Reventador, Ecuador', *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 372, pp. 34–47. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2019.01.009.
- Baby, P. *et al.* (1998) 'Modelo estructural y ciclos tectono-sedimentarios de la Cuenca Oriente', p. 121. Available at: <http://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:010015384>.
- Baby, P., Rivadeneira, M. and Barragán, R. (2004) *LA CUENCA ORIENTE: GEOLOGÍA Y PETRÓLEO*. 1st edn. Quito.
- Bolaños, M. *et al.* (2016) 'Metodología para la determinación de lugares de interés geológico: Caso "Trayecto: Baeza - San Víctor – El Chaco"', *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, 1(1), pp. 53–58. doi: 10.29166/revfig.v1i1.46.
- Calero, K. *et al.* (2021) 'Modelos de depósitos tipo vhms para las divisiones de la cordillera real: alao y salado', in *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*. 1st edn. Quito: 2021, pp. 2–11. doi: 10.29166/revfig.v1i2.2664.
- Carranco, A. (2017) 'Breve Resumen Del Contexto Geológico-Minero Regional Del Ecuador', p. 19.
- Castillo-López, L. A., González, J. F. and Duitama, A. (2019) '2.5D Seismic tomography and geological features in the Urabá Basin (Colombia)', *Boletín de Geología*, 41(3), pp. 163–174. doi: 10.18273/revbol.v41n3-2019008.
- ENTRIX (2008) *Proyecto hidroeléctrico coca codo sinclair. ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PRELIMINAR*. Quito.
- Federal Geographic Data Committee (2006) *FGDC Digital Cartographic Standard for Geologic Map Symbolization*.
- Gómez, J. C., Audemara, F. and Quinjano, J. (2001) *Efectos Geológicos asociados al Sismo del 23 de junio del 2001 en el Sur de Perú, Centro Nacional de Datos Geofísicos-*. Perú.

- Hall, M. *et al.* (2004) 'Volcanic eruptions with little warning: The case of Volcán Reventador's Surprise November 3, 2002 Eruption, Ecuador', *Revista Geológica de Chile*, 31(2), pp. 349–358. doi: 10.4067/S0716-02082004000200010.
- Heincke, B. *et al.* (2006) 'Shallow 2D and 3D Seismic tomography on an unstable mountain slope', *Near Surface 2006 - 12th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*, 71(6). doi: 10.3997/2214-4609.201402665.
- INEC (2012) *División Político Administrativa del Ecuador*.
- Jaillard, E. (1997) *Síntesis estratigráfica y sedimentológica del cretáceo y paleógeno de la cuenca oriental del Ecuador, Orstom-Petroproduccion*. Quito.
- Koulakov, I. *et al.* (2009) 'P, S velocity and VP/VS ratio beneath the Toba caldera complex (Northern Sumatra) from local earthquake tomography', *Geophysical Journal International*, 177(3), pp. 1121–1139. doi: 10.1111/j.1365-246X.2009.04114.x.
- Koulakov, I. *et al.* (2019) 'Unrest of the Udina volcano in Kamchatka inferred from the analysis of seismicity and seismic tomography', *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 379, pp. 45–59. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2019.05.006.
- Lees, J. M. *et al.* (2008) 'Reventador Volcano 2005: Eruptive activity inferred from seismo-acoustic observation', *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 176(1), pp. 179–190. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2007.10.006.
- Lira, E. (2011) *Estudio de sismicidad, tomografía sísmica y modelo de física de rocas: potencial sistema geotermal asociado al complejo volcánico Tinguiririca*. UNIVERSIDAD DE CHILE.
- Litherland, M. (1994) *The Metamorphic Belts of Ecuador*. 11th edn. Edited by British Geological Survey.
- Londoño, J. M. and Kumagai, H. (2018) '4D seismic tomography of Nevado del Ruiz Volcano, Colombia, 2000–2016', *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 358(2017), pp. 105–123. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2018.02.015.
- Luan, J. P. *et al.* (2021) 'Accretion kinematics and driving mechanism of the eastern Central Asian Orogenic Belt: Insights from seismic tomography and middle Permian–Middle Triassic magmatism in central Jilin Province', *Gondwana Research*, 101, pp. 114–131. doi: 10.1016/j.gr.2021.08.002.
- Luis, J. and Asensio, F. (2015) 'Excavación de túneles en ambientes volcánicos y paleovaguadas : Proyecto hidroeléctrico Quijos (Ecuador) Tunneling in volcanic environments and paleothalwegs : Quijos hydroelectric Project (Ecuador)', pp. 81–94.
- Molina, I. *et al.* (2005) 'Three-dimensional P-wave velocity structure of Tungurahua Volcano, Ecuador', *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 147(1–2), pp. 144–156. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2005.03.011.
- Nieto, A. S. (2000) 'Geología General del Nororiente ecuatoriana', in Minard L.Hall

- (ed.) *Los terremotos del 5 de marzo de 1987*. Volumen 9. Quito, p. 144.
- Otero, D. Z. (2008) *ONDAS SÍSMICAS, su importancia para la geofísica y la humanidad*. *Diego*.
- Pardo, M. *et al.* (2009) 'Tomografía Sísmica Bajo los Andes de Chile Central (33 ° -34 . 5 ° S): Implicaciones Sismotectónicas', in *XII Congreso Geológico Chileno*. Santiago, pp. 1–4.
- Paredes, C. D. and Araujo, S. (2021) 'The use of seismic tomography to describe the upper crustal structure beneath the Chalupas Caldera, Ecuador', *Geosciences*, 74(2), pp. 189–197.
- Pérez, C., Benalcázar, F. and Cordovez, M. (2019) *Mapa Geológico de la Republica del Ecuador*. Available at: <https://www.geoenergia.gob.ec/mapas-tematicos-1-100-000/>.
- Reyes, P. *et al.* (2021) 'Exceptionally uncommon overburden collapse behind a natural lava dam: Abandonment of the San-Rafael Waterfall in northeastern Ecuador', *Journal of South American Earth Sciences*, 110(October 2020). doi: 10.1016/j.jsames.2021.103353.
- Ridolfi, F. *et al.* (2008) 'The magmatic feeding system of El Reventador volcano (Sub-Andean zone, Ecuador) constrained by texture, mineralogy and thermobarometry of the 2002 erupted products', *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 176(1), pp. 94–106. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2008.03.003.
- Rinaldi, V. A. *et al.* (2016) 'Aplicación de la tomografía sísmica para la detección de fallas estructurales en una formación terciaria', *Físicas Y Naturales*, 3(2), pp. 45–51. Available at: <https://revistas.unc.edu.ar/index.php/FCEFyN/article/view/13772>.
- Romero, C. *et al.* (2019) 'Reconstruyendo el pasado del planeta : El registro estratigráfico y sedimentológico de la Formación Tena en la carretera Tiwintza – Puerto Morona Reconstruction the past of earth : Stratigraphic and Sedimentology record of the Tena Formation , Tiwintza –', 2(3).
- Samaniego, P. *et al.* (2008) 'Pre-eruptive physical conditions of El Reventador volcano (Ecuador) inferred from the petrology of the 2002 and 2004-05 eruptions', *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 176(1), pp. 82–93. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2008.03.004.
- Schuster, R. L. *et al.* (1996) 'Mass wasting triggered by the 5 March 1987 Ecuador earthquakes', *Engineering Geology*, 42(1), pp. 1–23. doi: 10.1016/0013-7952(95)00024-0.
- Spikings, R. *et al.* (2015) 'The geological history of northwestern South America: From Pangaea to the early collision of the Caribbean Large Igneous Province (290-75 Ma)', *Gondwana Research*, 27(1), pp. 95–139. doi: 10.1016/j.gr.2014.06.004.

- Spikings, R. *et al.* (2021) 'Constraints on the ages of the crystalline basement and Palaeozoic cover exposed in the Cordillera real, Ecuador: $40\text{Ar}/39\text{Ar}$ analyses and detrital zircon U/Pb geochronology', *Gondwana Research*, 90, pp. 77–101. doi: 10.1016/j.gr.2020.10.009.
- Spikings, R. A. *et al.* (2000) 'Low-temperature thermochronology of the northern Cordillera Real, Ecuador: Tectonic insights from zircon and apatite fission track analysis', in, pp. 649–668.
- Tanaka, S. *et al.* (2002) 'Three-dimensional P-wave velocity structure of Iwate volcano, Japan from active seismic survey', *Geophysical Research Letters*, 29(10), pp. 4–7. doi: 10.1029/2002gl014983.
- Tarantola, A. and Valette, B. (1982) 'Generalized nonlinear inverse problems solved using the least squares criterion', in *Reviews of Geophysics*. Paris, France, pp. 219–232.
- Tavakoli, B. *et al.* (2018) 'Seismic tomography with traveltimes and source / receiver slopes based on Eikonal and adjoint equations', 20(April), pp. 3–4.
- Tibaldi, A. (2008) 'Contractional tectonics and magma paths in volcanoes', *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 176(2), pp. 291–301. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2008.04.008.
- Tschopp, H. J. (1953) 'OIL EXPLORATIONS IN THE ORIENTE OF ECUADOR, 1938-1950', 37(10), pp. 2303–2347.
- Villalva, R. (2006) 'Modelado Geológico de la Arenisca Tena Basal en la Cuenca Oriente', p. 143.
- Yaroshenko, G. *et al.* (2022) 'Structure of the magma plumbing system beneath Semisopchnoi Island (Aleutian Arc) inferred from seismic tomography', *Scientific Reports*, pp. 1–12. doi: 10.1038/s41598-022-14794-7.