



UNIVERSIDAD REGIONAL AMAZÓNICA IKIAM
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA DE AGUA
CARRERA DE GEOCIENCIAS

CLASIFICACIÓN SÍSMICA DE SITIO EN DEPÓSITOS ALUVIALES Y ROCA
MADRE SOMERA, CASO DE ESTUDIO COMUNIDAD SAN PEDRO DE
MUYUNA

Proyecto de investigación previo a la obtención de Título de:

INGENIERO EN GEOCIENCIAS

AUTOR: DAVID MANUEL PORTILLO RIVERA

TUTOR: Mgs. JORGE RONNY ESPIN CAMPOS

Tena – Ecuador

2024

Carrera de geociencias

Autorización de publicación en el repositorio institucional

Tena, 16 de agosto de 2024

Yo, David Manuel Portillo Rivera, con documento de identidad 0106097579 en calidad de autor/a y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación “Clasificación sísmica de sitio en depósitos aluviales y roca madre somera, caso de estudio Comunidad San Pedro de Muyuna”, de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN, reconozco a favor de la Universidad Regional Amazónica Ikiam una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

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



David Manuel Portillo Rivera

CI: 0106097579

Carrera de geociencias

Declaración de derecho de autor, autenticidad y responsabilidad

Tena, 16 de agosto de 2024

Yo, David Manuel Portillo Rivera con documento de identidad 0106097579, declaro que los resultados obtenidos en la investigación que presento en este documento final, previo a la obtención del título de 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 el presente documento, son de mi autoría y de mi absoluta responsabilidad.



David Manuel Portillo Rivera

CI: 0106097579

Carrera de geociencias

Certificado de dirección de trabajo de titulación

Tena, 16 de agosto de 2024

Certifico que el trabajo de titulación “Clasificación sísmica de sitio en depósitos aluviales y roca madre somera, caso de estudio Comunidad San Pedro de Muyuna”, aprobado bajo el mecanismo de titulación de: artículo, fue realizado por David Manuel Portillo 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.



Firmado electrónicamente por:
JORGE RONNY ESPIN
CAMPOS

Jorge Ronny Espin Campos

C.I: 1600488207

Tutor

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, quiero agradecer a Dios por brindarme la fortaleza, salud y sabiduría necesarias para completar mis estudios universitarios.

A mi tutor de tesis, Jorge Ronny Espín, le expreso mi más profundo agradecimiento por su paciencia, orientación y valiosos consejos a lo largo de este proceso. Su guía ha sido indispensable para el desarrollo de este trabajo.

También quiero agradecer a José Sebastián Araujo, quien me ayudó a obtener y procesar mis datos geofísicos en campo. Su paciencia y experiencia fueron cruciales para el correcto procesamiento de los datos, y su colaboración ha sido invaluable para este trabajo.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres y hermanos, quienes han sido un pilar fundamental en mi vida, les doy las gracias por su amor incondicional y sus sacrificios. Su confianza en mí y su apoyo inquebrantable me han dado la motivación para seguir adelante en los momentos de dificultad.

También dedico este trabajo a todos aquellos que, de una u otra manera han contribuido a mi formación y desarrollo personal. Este logro es también de ustedes.

CONTENIDO

Declaración de derecho de autor, autenticidad y responsabilidad	ii
Autorización de publicación en el repositorio institucional	iii
Certificado de dirección de trabajo de titulación	iv
AGRADECIMIENTO	v
DEDICATORIA	vi
ÍNDICE DE TABLAS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
RESUMEN	x
ABSTRACT	xi
INTRODUCCIÓN	1
Área de estudio	2
Configuración geológica.....	3
METODOLOGÍA	5
Adquisición y procesamiento de datos geofísicos.....	6
Muestreo y análisis geológicos – geotécnicos del suelo	9
RESULTADOS	10
Combinación de los métodos geofísicos MASW y ReMi	10
Tomografía sísmica de refracción	11
Descripción estratigráfica	12
DISCUSIÓN	17
CONCLUSIONES	20
BIBLIOGRAFÍA	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de suelos normativa NEHRP.....	6
Tabla 2. Coordenadas UTM de la línea sísmica.	7

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación regional y local de la zona de estudio.	3
Figura 2. Mapa geológico de Tena entre Muyuna y Ongota.	4
Figura 3. Adquisición de datos geofísicos en campo.	7
Figura 4. Curva de dispersión del modelo 2D de velocidad de onda S.	8
Figura 5. Sección transversal de la velocidad de onda S, 2D MASW-ReMi.	10
Figura 6. Convergencia RMS de los datos sísmicos.	11
Figura 7. Modelo de tomografía sísmica.	12
Figura 8. Calicata y columna estratigráfica P1.	14
Figura 9. Calicata y columna estratigráfica P2.	15
Figura 10. Afloramiento de la Formación Tena.	16

RESUMEN

Los depósitos superficiales debido a sus características geotécnicas suelen amplificar la señal sísmica. El lugar en donde se llevo a cabo el presente estudio está ubicado en la comunidad San Pedro de muyuna, parroquia San Juan de Muyuna, cantón Tena, provincia de Napo. Estos materiales son los que sustentan las construcciones existentes en el lugar. Este trabajo está enfocado en la realización de una clasificación sísmica de los suelos de acuerdo al Programa de Reducción de Riesgos Sísmicos sus siglas en inglés (NEHRP), utilizando métodos geofísicos y geológicos – geotécnicos. Para determinar los parámetros geofísicos del subsuelo, se obtuvieron velocidades de onda de corte (V_s) mediante la combinación de datos MASW-ReMi, y velocidades de onda de compresión (V_p) mediante tomografía sísmica. Para la obtención de información geológica, se hizo dos calicatas de la cuales se describieron los perfiles de suelo y se tomaron muestras para hacer ensayos SUCS. Los resultados de los modelos de V_s y V_p en conjunto con la información geológica permitió, identificar dos unidades claramente diferenciadas, la unidad A como depósitos aluviales y la unidad B como Formación Tena. La comunidad San Pedro de Muyuna se clasificó como suelo tipo D según la normativa NEHRP, con un V_{s30} de 347 m/s. Estos hallazgos proporcionan información como punto de partida para el diseño sismorresistente y planificación urbana.

Palabras clave: Clasificación sísmica; MASW-ReMi; San Pedro de Muyuna; SUCS; tomografía sísmica; V_{s30} .

ABSTRACT

Surface deposits, due to their geotechnical characteristics, tend to amplify seismic signals. The study area is located in the community of San Pedro de Muyuna, San Juan de Muyuna parish, Tena canton, Napo province. These materials support the existing constructions in the area. This work focuses on conducting a seismic classification of soils according to the National Earthquake Hazards Reduction Program (NEHRP), using geophysical and geological – geotechnical methods. To determine the geophysical parameters of the subsurface, shear wave velocities (V_s) were obtained through the combination of MASW – ReMi data, and compression wave velocities (V_p) were obtained through seismic tomography. For geological information, two test pits were excavated, from which soil profiles were described and samples were taken for SUCS testing. The results of the V_s and V_p models, along with the geological information, allowed the identification of two clearly differentiated units: unit A as alluvial deposits and unit B as the Tena Formation. The community of San Pedro de Muyuna was classified as type D soil according to NEHRP regulations, with a V_{s30} of 347 m/s. These findings provide essential information as a starting point for earthquake – resistant design and urban planning.

Keywords: MASW-ReMi; San Pedro de Muyuna; Seismic classification; Seismic tomography; SUCS; V_{s30} .

Clasificación sísmica de sitio en depósitos aluviales y roca madre somera, caso de estudio comunidad San Pedro de Muyuna

INTRODUCCIÓN

Ecuador se encuentra en una zona de subducción debido a su ubicación en el límite convergente entre dos placas tectónicas: la placa de Nazca y la placa Sudamericana a razón de 56 mm/año (Collot et al., 2009). Debido a esta ubicación geográfica, Ecuador está en constante riesgo de fenómenos naturales como sismos, inundaciones y erupciones volcánicas (Toulkeridis et al., 2015). A lo largo de la historia, estos eventos han causado grandes pérdidas de vidas humanas y daños económicos significativos (Vera et al., 2017).

El 5 de marzo de 1987, la región amazónica del Ecuador, específicamente la provincia de Napo, fue testigo de dos sismos históricos de magnitudes 6.1 y 6.7. Estos sismos causaron deslizamientos de roca y tierra, flujos y avalanchas de escombros, así como inundaciones (National Research Council, 1991). De acuerdo a los valores de Aceleración Máxima de Suelo (PGA), Napo se categoriza como una zona de alto potencial de peligro sísmico ya que tiene valores de PGA que van de 0.21 g a 0.60 g (NEC, 2014).

Desde los años 80, la geofísica se ha utilizado para resolver problemas ambientales en áreas urbanas y desempeña un papel importante en las investigaciones geotécnicas, proporciona información detallada para solucionar problemas geotécnicos (Ozcep and Ozcep, 2011; Allo et al., 2019). Cabe mencionar que estas técnicas son no invasivas y

tienen costos mucho más bajos en comparación a técnicas invasivas, que pueden causar daños al medio ambiente circundante (Álvarez and Aceves, 2003; Sieron et al., 2021). De acuerdo con el estado y tipo de suelo, el análisis de las velocidades de propagación de las ondas sísmicas es fundamental para evaluar las propiedades geotécnicas y la estructura del subsuelo. Este análisis proporciona información fundamental para evaluar la capacidad del suelo para soportar cargas y tomar decisiones efectivas en la construcción de infraestructuras (Sato and Fehler, 2009; Kennett, 2009).

La construcción de viviendas sin la realización previa de estudios geotécnicos puede acarrear consecuencias significativas y perjudiciales. Existe un alto riesgo de asentamientos no uniformes causando daños estructurales, como fisuras en paredes y cimientos, agrietamientos del terreno, pérdidas financieras y de tiempo (Everett, 2023; Ozdemir and Nalbantcilar, 2016). A pesar de estos riesgos, las obras en general, y específicamente la construcción de viviendas en la comunidad San Pedro de Muyuna, se llevan a cabo sin la realización de estudios geotécnicos, lo que ocasiona un escaso conocimiento sobre las condiciones del subsuelo para el diseño sismorresistente.

La clasificación sísmica de suelos es esencial para evaluar los peligros sísmicos en diferentes tipos de suelos, ya que proporciona información valiosa para identificar áreas con mayor vulnerabilidad a sufrir daños significativos durante eventos sísmicos (Karabulut, 2018). Aunque la presente investigación no sustituye un estudio geotécnico, además proporciona datos sobre la rigidez del suelo. El presente trabajo, tiene como objetivo caracterizar los suelos de la comunidad San Pedro de Muyuna, empleando técnicas geofísicas y geológicas para determinar la clase de suelo de acuerdo al Programa Nacional de Reducción de Riesgos Sísmicos (NEHRP).

Área de estudio

San Pedro de Muyuna, comunidad perteneciente a la parroquia San Juan de Muyuna, cantón Tena, provincia de Napo (Ecuador), se encuentra a 4 km de la ciudad de Tena (Figura 1). Según los datos proporcionados por el (INEC, 2022), el crecimiento

poblacional en las parroquias Tena y San Juan de Muyuna ha mostrado una tendencia muy significativa, aumentando aproximadamente en 11,907 habitantes desde el censo de 2010. En los últimos años, la comunidad de San Pedro de Muyuna también ha registrado un incremento notable de su población. De acuerdo con el (GAD Parroquial San Juan de Muyuna, 2020), la comunidad San Pedro de Muyuna cuenta con una población aproximada de 312 habitantes y una tasa de crecimiento anual de 4.34 %.

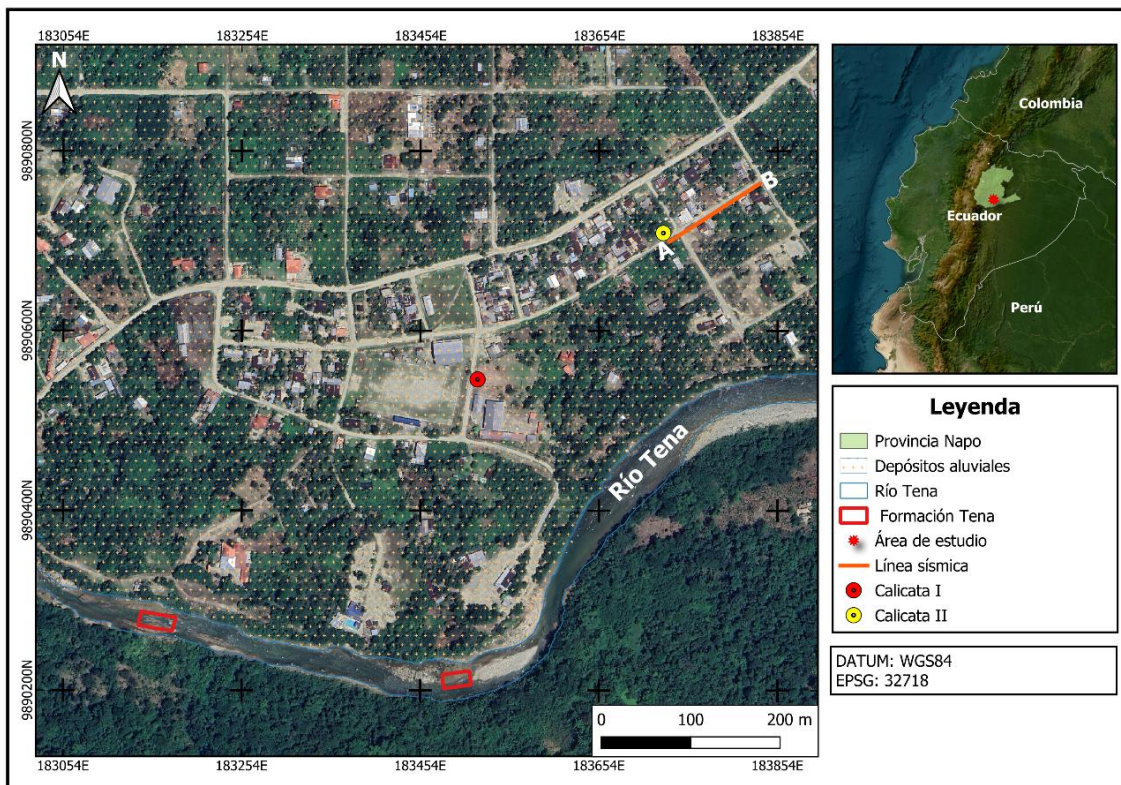


Figura 1. Ubicación regional y local de la zona de estudio (Imagen de Google Earth, 2023). Los puntos amarillo y rojo representan las calicatas, y la línea sísmica AB se muestra de color naranja. Realizado por: Portillo, 2024.

Configuración geológica

El área de estudio geológicamente se encuentra en una región caracterizada por depósitos superficiales y la roca madre somera (Figura 2). La zona está influenciada por la tectónica activa, con presencia de fallas y estructuras plegadas (Chunga, 2012; Abarca, 2022).

Los depósitos superficiales se encuentran en superficies topográficas planas, tienen un espesor significativo y forman terrazas en los márgenes de valles fluviales (Pazzaglia, 2013; Mather et al., 2017). (Abarca, 2022) caracterizó el área de estudio como sedimentos aluviales, basándose en los análisis estratigráficos y sedimentológicos realizados por (Ortiz, 2022). En su investigación caracterizo los depósitos superficiales en la parte alta del río Tena, al oeste del área de estudio. Estos depósitos comienzan con una base de gravas, seguidas por una serie de sedimentos finos en la parte superior.

La roca madre somera denominada en el presente estudio está compuesta por rocas sedimentarias pertenecientes a la Formación Tena. Aunque esta formación está poco documentada, se sabe que consiste en una intercalación de areniscas y lodolitas (Jaillard, 1997; Baby et al., 2014). Los sedimentos de la Formación Tena se han derivaron de la Cordillera Oriental (Ruiz et al., 2004; Martin-Gombojav and Winkler, 2008).

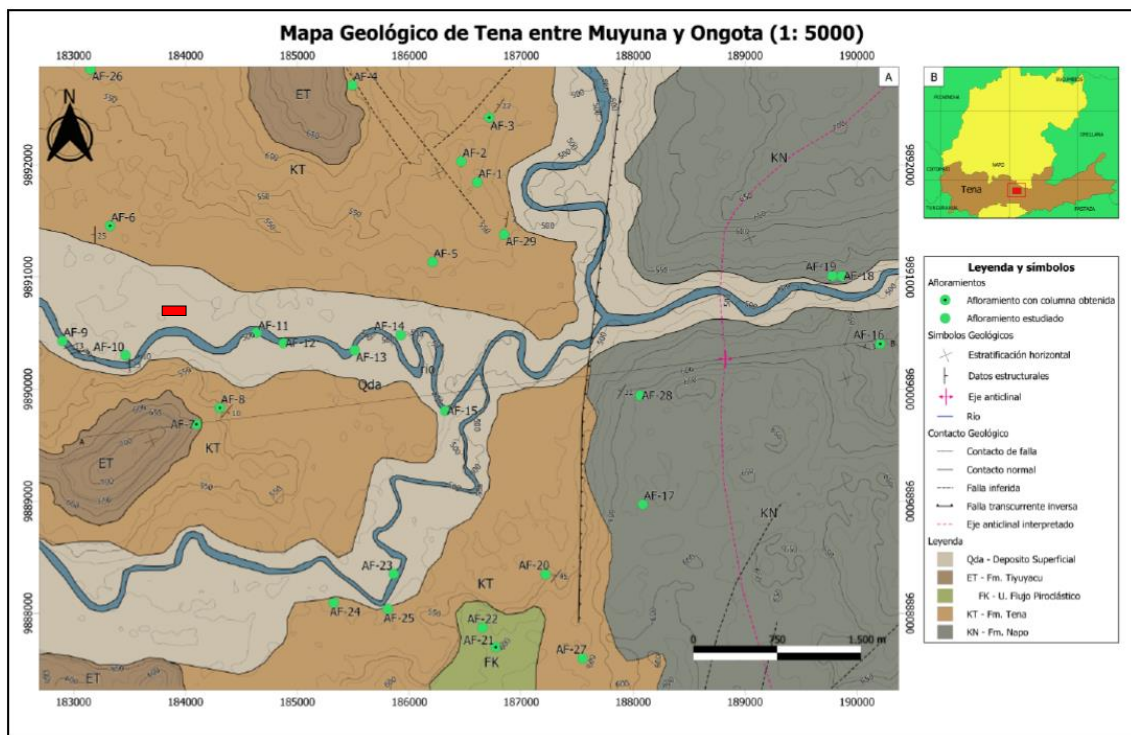


Figura 2. Mapa geológico de Tena entre Muyuna y Ongota a escala (1:5000) modificado de (Abarca, 2022) . El rectángulo de color rojo representa mi zona de estudio.

Fuente: (Abarca, 2022)

METODOLOGÍA

Se llevó a cabo una clasificación sísmica de suelos mediante la implantación de una línea sísmica en las calles de San Pedro de Muyuna, de 120 m de longitud en dirección N64°E. Para correlacionar los resultados geofísicos, se realizó dos calicatas, una ubicada junto a la línea sísmica y la otra a una distancia de 200 m de la misma, con una profundidad de 1,50 m y 1,25 m, respectivamente. De cada calicata se extrajeron muestras de suelo, las cuales fueron ensayadas según la normativa ASTM D 2487-06 (ASTM D 2487, 2011). A fin de clasificar sísmicamente el suelo, se utilizó la normativa propuesta por la normativa NEHRP, la cual clasifica los suelos en seis categorías, desde la A hasta la F basándose en el valor de V_{s30} (Tabla 1). La NEHRP ofrece recomendaciones para la construcción de edificaciones resistentes a sismos, así como para la identificación y evaluación de riesgos sísmicos. Además, promueve el desarrollo de códigos modelo destinados a regular el uso del suelo y la construcción (Street Thitimakorn and Raenak, 2016; et al., 2005; Thitimakorn and Raenak, 2016; Rowan, 2023). Para la determinación de la V_{s30} , se usaron las técnicas geofísicas MASW y ReMi de manera combinada. El MASW permite determinar la velocidad de ondas de corte (V_s) midiendo la onda de propagación de ondas superficiales de tipo Rayleigh. Las ondas superficiales pueden generarse mediante una fuente de impacto (mazo o martillo), que viajan a través del emplazamiento a una velocidad correlacionada a la rigidez del suelo (Park et al., 1999), con gamas de frecuencia de 10 Hz a 100 Hz puede proporcionar información relativa a los primeros 30 metros en función de la rigidez del emplazamiento (Roma and Tononi, 2011). El ReMi, desarrollado por (Louie, 2001), es ampliamente utilizado para determinar perfiles de velocidades de ondas de corte (V_s) a partir del ruido ambiental. Esta técnica calcula la velocidad promedio de las ondas superficiales a lo largo de una matriz de refracción. Combinando los datos adquiridos mediante las técnicas MASW y ReMi, se logra abarcar todo el espectro de frecuencias en la descripción del sitio, desde 1 Hz hasta 100 Hz. Además, con el propósito de asignar un valor V_p a cada capa y definir unidades sísmicas, se implementó el método de tomografía sísmica. Este método se basa en analizar la propagación de ondas sísmicas generadas por una fuente de impacto, evaluando las

trayectorias curvas de los rayos que se reflejan y refractan dentro del subsuelo, permitiendo definir de mejor manera la geometría de las capas, contribuyendo así una caracterización más detallada del subsuelo (Azwin et al., 2013; Thurber and Ritsema, 2015).

Tabla 1. Clasificación de suelos de acuerdo a la normativa NEHRP.

Tipo de suelo	Clasificación Roca/Suelo	V_{s30} (m/s)
A	Roca dura	> 1500
B	Roca dura	760 – 1500
C	Suelo muy denso o roca suave	360 – 760
D	Suelo duro	180 – 360
E	Suelo suave	<180
F	Suelos especiales que requieren evaluación específica de sitio	-

Fuente: (NEHRP, 2020)

Adquisición y procesamiento de datos geofísicos

Se llevaron a cabo registros de MASW, ReMi y Tomografía Sísmica utilizando geófonos verticales de frecuencia natural de 4,5 Hz, mediante el sismógrafo Geometrics ES-3000. Para los métodos activos MASW y Tomografía Sísmica la fuente de impacto se generó mediante el golpeo de un martillo de 6 kg sobre una placa metálica de aluminio de 2,5 cm de espesor, mientras que para el pasivo ReMi se utilizó el ruido ambiental.

El levantamiento geofísico consta de una línea sísmica, conformada por 24 geófonos separados por una distancia de 5 m (Figura 3). Se realizaron 25 disparos cada 2,5 m entre geófonos para cubrir toda la longitud de la línea sísmica. Los datos activos se adquirieron con una frecuencia de muestreo de 0,250 ms y una longitud de registro de 2 segundos; y para los pasivos con una longitud de registro de 30 seg y una frecuencia de muestreo cada 2.000 ms. Cabe mencionar que los geófonos se colocaron sobre un relleno

estructural debido a la conformación de la vía, debajo de este material se encuentra el suelo natural.



Figura 3. Adquisición de datos geofísicos en campo sobre un relleno estructural en la calle de la comunidad San Pedro de Muyuna. **A)** Disposición de la línea geofísica de 120,0 m de longitud en dirección N64°E. **B)** Golpeo mediante un martillo sobre una placa de aluminio para la adquisición de datos sísmicos.

Realizado por: Portillo, 2024.

Tabla 2. Coordenadas UTM de los extremos (A – B) de línea sísmica.

Línea sísmica	Coordenadas UTM	
	X	Y
Punto inicial (A)	183731.6	9890702.6
Punto final (B)	183833.5	9890766.9

Realizado por: Portillo, 2024.

Los datos MASW y ReMi adquiridos fueron procesados utilizando el paquete de software SeisImager (Geometrics, 2009b). Al ser estos dos métodos equivalentes, en el tratamiento de los datos se requirió seguir tres pasos. Primero, se extrajo la velocidad de propagación de energía de las ondas superficiales a partir de los registros de campo. Luego, se calculó la curva de dispersión mediante la transformación de series temporales en series de frecuencia. Finalmente, se derivó la velocidad de la onda S mediante la inversión de la curva de dispersión. Este modelo proporciona información sobre los valores de velocidad Vs30. Se obtuvieron mediante la inversión 2D de todos los datos, empleando el método de mínimos cuadrados con 35 iteraciones y una

regularización horizontal de 0.5, dando como resultado un valor de RMS de 41.174971 m/s.

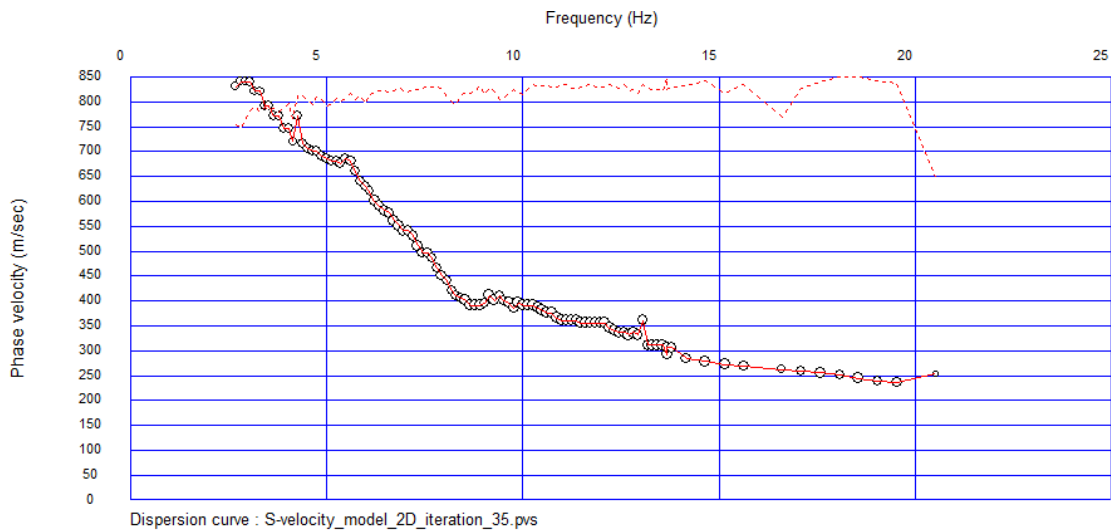


Figura 4. Curva de dispersión del modelo 2D de velocidad de onda S.
Realizado por: Portillo, 2024.

Para resolver el problema de la tomografía sísmica se utilizó el software SeisImager que emplea el método de mínimos cuadrados (Geometrics, 2009a). Inicialmente, se identificaron las primeras llegadas de las señales mediante la herramienta Pickwin (Pick First Breaks or Dispersion Curves), corrigiendo errores a través de la revisión de las curvas de tiempo de viaje. Aquellos datos que mostraban desviaciones aparentes fueron eliminados, y posteriormente se estableció el modelo a priori.

Una vez propuesto el modelo a priori, se necesita resolver el problema inverso de la tomografía sísmica, dado que este problema no tiene solución única (Araujo et al., 2023), se usó el criterio de la curva-L para implementar la regularización de Tikhovov de manera práctica (Heansen, 1992; Zhidanov, 2014). Se probó la convergencia del algoritmo hasta el número máximo de iteraciones soportadas por el software. Se puede ver la convergencia del RMS para línea sísmica en la (Figura 6), con el parámetro de suavizado horizontal fijado en 0.7 y variando el parámetro vertical de 0.3 a 1.0. Las curvas-L con las tres normas están a la derecha de la (Figura 6), donde se puede ver el parámetro de regularización vertical en la esquina es de 0.7.

El vértice de la curva-L representa el equilibrio ideal entre el ajuste mínimo de error de los datos y un modelo que incorpora adecuadamente las irregularidades desde el modelo inicial de capas planas. Además, la curva-L sirve como un método para evaluar la calidad del modelo de tomografía, ya que, si hay demasiados errores en los experimentos y en el procesamiento de datos, no se obtendría el gráfico de la curva-L (Araujo et al., 2024).

Muestreo y análisis geológicos – geotécnicos del suelo

Para obtener información detallada del subsuelo, se realizaron dos calicatas cuyas dimensiones fueron 1.5 m x 1.5 m x 1.5 m. Posteriormente, se obtuvieron muestras inalteradas utilizando un tubo PVC de 3" de diámetro y 1.5 m de longitud, cortados por la mitad longitudinalmente. El tubo se fijó a las paredes de las calicatas y se extrajeron los testigos utilizando hilo de nailon. Los testigos fueron embalados con plástico stretch film para su protección.

Una vez obtenidos los testigos desde las calicatas, se llevó a cabo una descripción detallada de las capas de suelo, registrando el espesor y el color de cada una. Además de la inspección visual en campo, las muestras se enviaron al laboratorio "GEO Ingeniería" en la ciudad de Macas. Allí, se realizaron ensayos de clasificación del suelo según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), siguiendo la norma ASTM D2487-06.

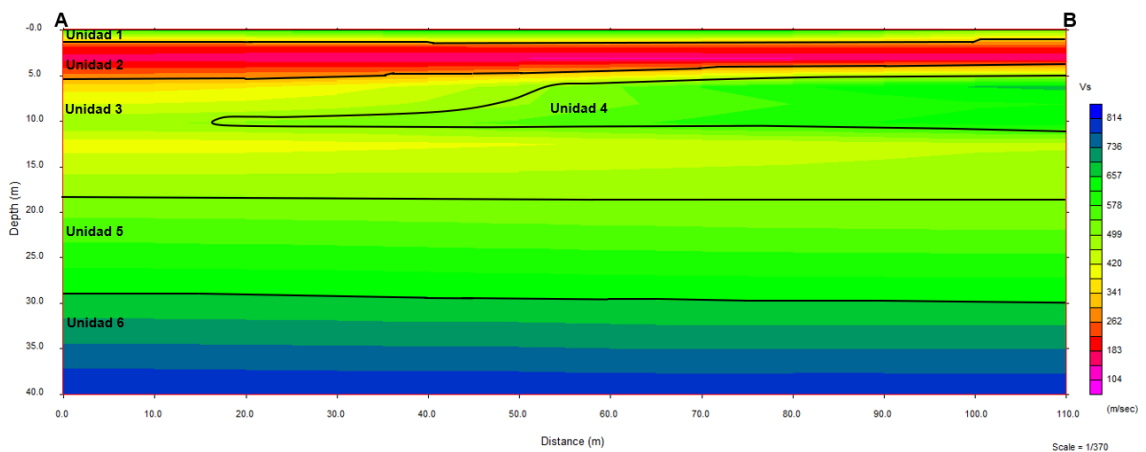
RESULTADOS

Combinación de los métodos geofísicos MASW y ReMi

Al analizar los resultados de la sección transversal de la velocidad de la onda S (Figura 5), se observa una variación en las velocidades a lo largo de los 40 metros de profundidad. En la unidad 1, las velocidades registradas oscilan entre 350 m/s y 450 m/s.

A partir de aproximadamente 5 m de profundidad, se encuentra la unidad 2, cuya característica principal es la notable disminución de la velocidad, con valores que se encuentran entre 141 m/s y 280 m/s. La unidad 3 presenta velocidades que varían entre 330 m/s y 500 m/s. Dentro de esta capa, se aprecia una zona en forma de cuña denominada unidad 4, la cual posee velocidades entre 530 m/s y 650 m/s. Las unidades más profundas corresponden a la unidad 5 y unidad 6, con velocidades en el rango de 520 m/s a 675 m/s y 700 m/s a 814 m/s, respectivamente.

El cálculo de V_{s30} obtenido fue 347 m/s, lo que corresponde a un suelo tipo D "Suelo duro" de acuerdo a la (NEHRP, 2020).



Tomografía sísmica de refracción

En la (Figura 6), a la izquierda se muestran los resultados de convergencia RMS y en la derecha están las curvas L con las tres normas, donde indica el parámetro de regularización vertical establecido en 0.7 como señala la flecha negra en los tres casos.

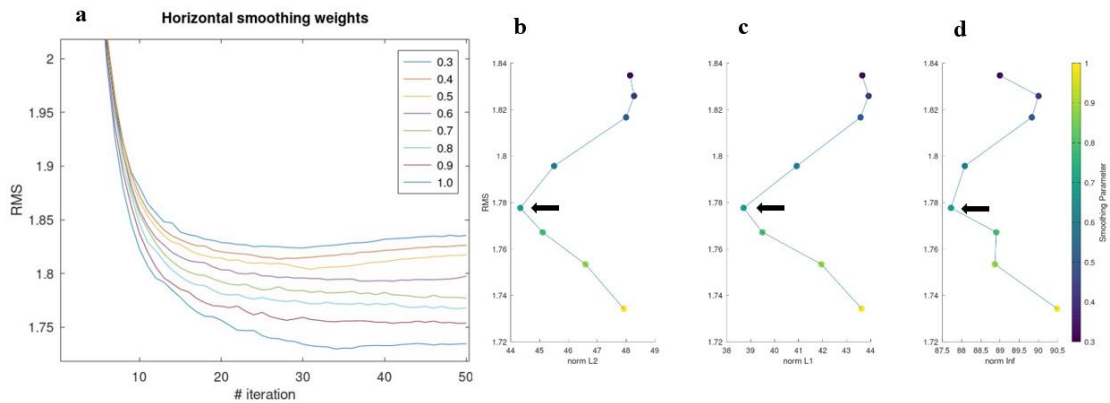


Figura 6. a) Convergencia RMS de los datos para los parámetros verticales y horizontales igual a 0.7. Curvas L con las tres normas: b) ℓ_2 , c) ℓ_1 y d) ℓ_∞ en el eje horizontal.

Realizado por: Portillo, 2024.

Una vez establecido un parámetro de regularización aceptable, se obtuvo el modelo óptimo de la tomografía sísmica, como se muestra en la (Figura 7). Es importante mencionar que los valores de profundidad del modelo son válidos hasta los primeros 30 m, ya que los rayos sísmicos trazados alcanzaron esa profundidad.

La unidad 1 presenta un espesor relativamente uniforme a lo largo del modelo, con velocidades comprendidas entre 325 m/s a 1200 m/s. La unidad 2 muestra una mayor variación en su geometría, con una forma convexa predominante en la zona central de la línea sísmica y velocidades que varían entre 1250 m/s y 2250 m/s.

La unidad 3 tiene velocidades que oscilan entre 2300 m/s a 2450 m/s. Esta unidad presenta una inclinación que se va tornando horizontal a medida que la distancia en el eje x aumenta. La unidad 4 mantiene la misma inclinación que la unidad 3, con velocidades comprendidas entre 2600 m/s y 2956 m/s.

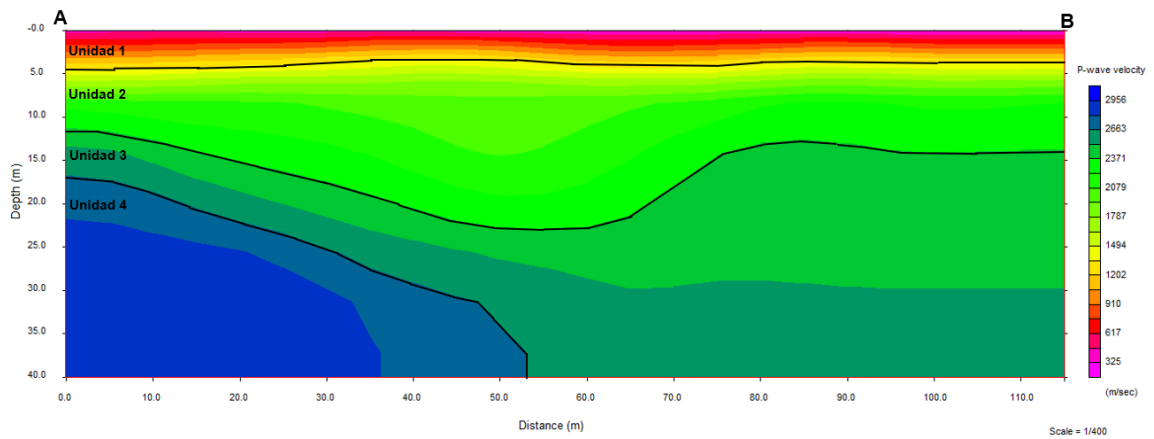


Figura 7. Modelo de tomografía sísmica: resultado de la regularización con parámetros horizontales y verticales de 0.7.
Realizado por: Portillo, 2024.

Descripción estratigráfica

Se presenta los materiales geológicos encontrados en las calicatas denominados P1 y P2. De manera general, se tiene gravas en la base y una sucesión de depósitos finos hacia el tope. También se muestra una columna estratigráfica de estos materiales y su símbolo de grupo en base a la clasificación SUCS (ASTMD 2487, 2011).

La calicata P1 está constituida por nueve capas, como se visualiza en la (Figura 8). La descripción de cada capa es la siguiente:

- P1-C1: Capa superficial de material de relleno antrópico con un espesor de 42 cm.
- P1-C2: Limos inorgánicos de baja plasticidad, con un espesor de 47 cm y coloración gris verdoso.
- P1-C3: Limos orgánicos de baja plasticidad, con un espesor de 19 cm y coloración café grisoso.
- P1-C4: Limos inorgánicos de alta plasticidad, con un espesor de 4 cm y coloración gris.
- P1-C5: Materia orgánica con un espesor de 12 cm, se destaca la presencia de troncos de hasta 8 cm de diámetro y coloración.

- P1-C6: Limos orgánicos de alta plasticidad, con un espesor de 6 cm y coloración gris negroso.
- P1-C7: Otra capa de materia orgánica con un espesor de 6 cm, también se destaca la presencia de troncos de aproximadamente 8 cm y coloración negra.
- P1-C8: Limos orgánicos de alta plasticidad, con un espesor de 4 cm y coloración café grisoso.
- P1-C9: Gravas arenosas mal graduadas, cuyo espesor no se pudo determinar debido a la presencia del nivel freático, pero se logró cavar aproximadamente 10 cm.

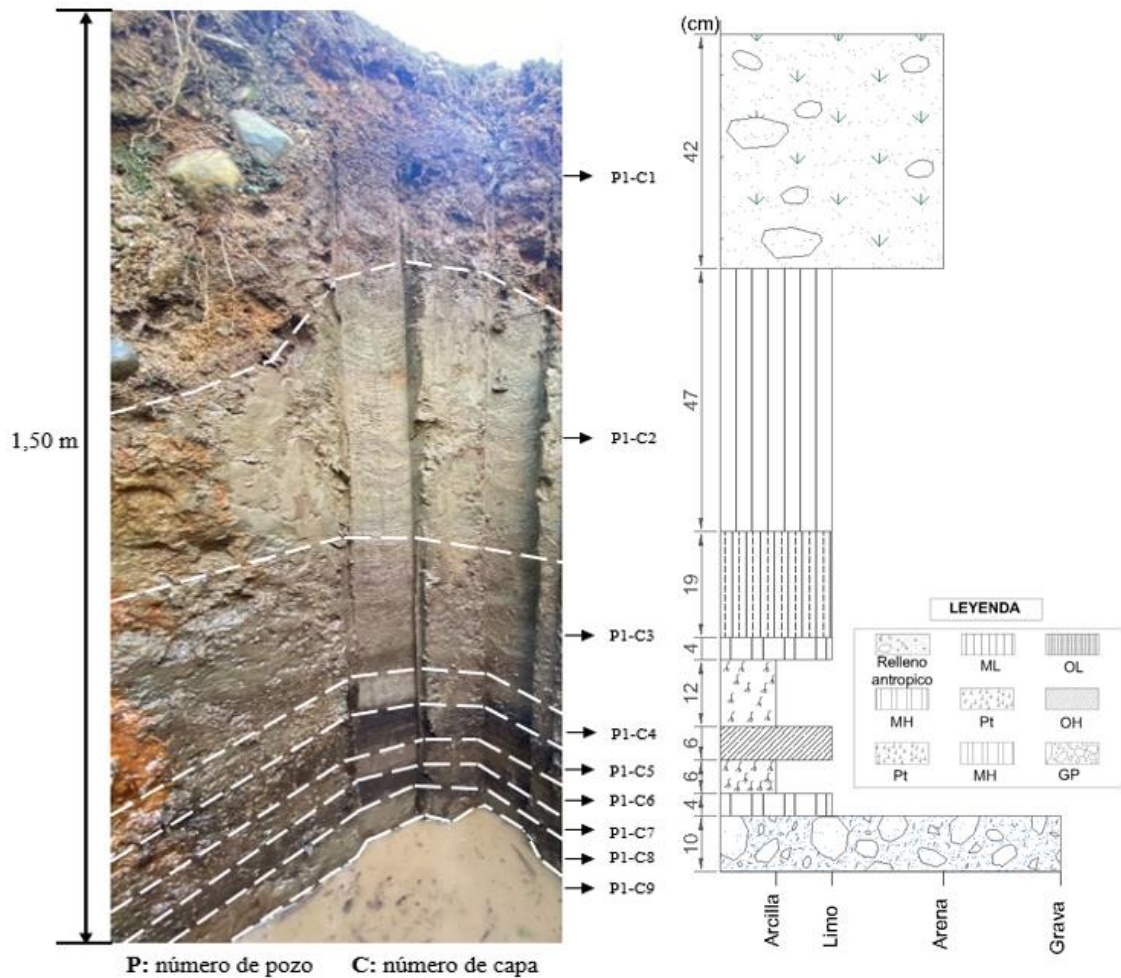


Figura 8. A) Visualización de las capas del subsuelo de la calicata P1, con líneas entrecortadas blancas indicando las diferentes capas y la profundidad alcanzada. B) Columna estratigráfica de la calicata P1 con la leyenda de cada capa según la clasificación SUCS.

Realizado por: Portillo, 2024.

La calicata P2 está constituida por cinco capas, como se visualiza en la (Figura 9). La descripción de cada capa es la siguiente:

- P2-C1: Capa superficial de material de relleno antrópico con un espesor de 55 cm.
- P2-C2: Arena limosa, con un espesor de 23 cm y coloración café azulado.
- P1-C3: Arena bien graduada, con un espesor de 29 cm y coloración café grisácea.
- P1-C4: Limos inorgánicos de baja plasticidad, con un espesor de 18 cm y coloración café.

- P1-C5: Gravas arenosas mal graduadas, cuyo espesor no se pudo determinar debido a la resistencia del material, pero se llegó a cavar aproximadamente 15 cm.

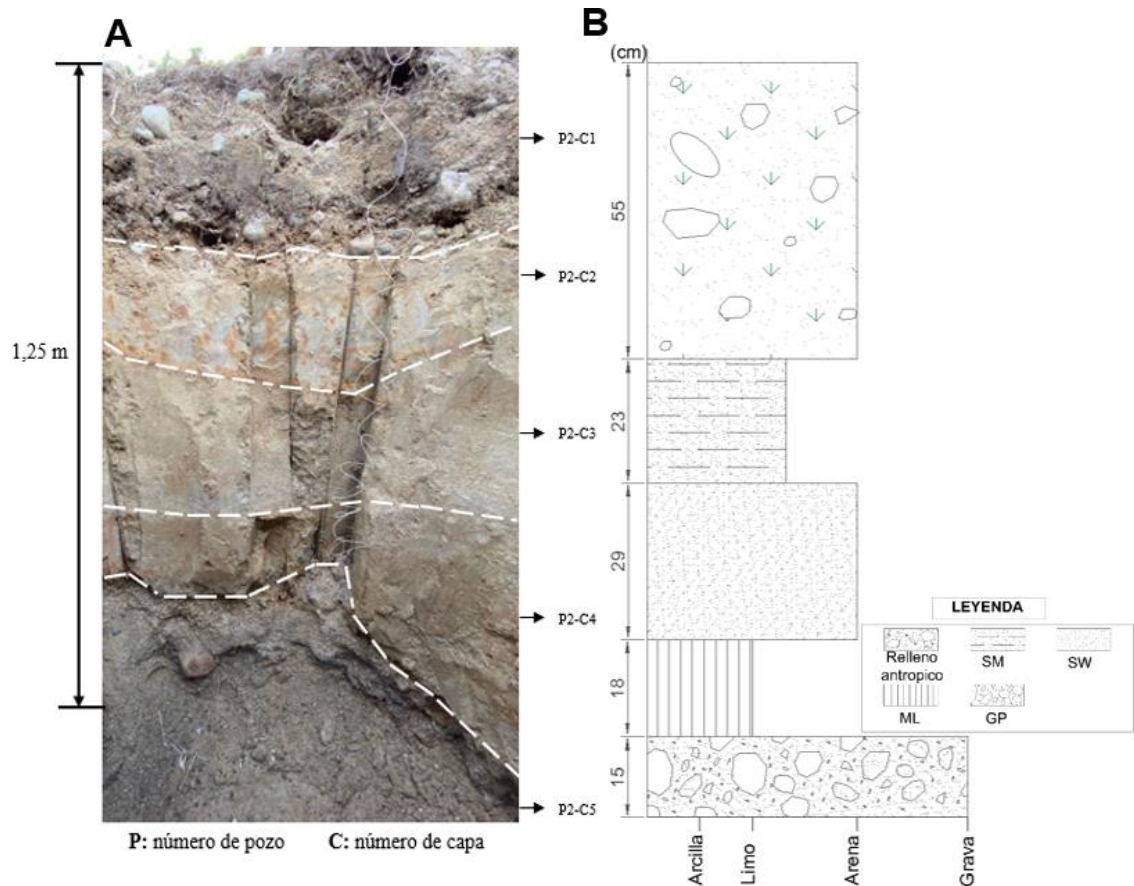


Figura 9. A) Visualización de las capas del subsuelo de la calicata P2, con líneas entrecortadas blancas indicando las diferentes capas y la profundidad alcanzada. B) Columna estratigráfica de la calicata P2 con la leyenda de cada capa según la clasificación SUCS.
Realizado por: Portillo, 2024.

De acuerdo con el mapa geológico realizado por (Abarca, 2022), el afloramiento de la Formación Tena se encuentra en el punto denominado AF-10. Las características sedimentológicas observadas confirman que efectivamente se trata de la Formación Tena. Este afloramiento está ubicado a una distancia de 340 metros de la calicata P2 ver (Figura 10).

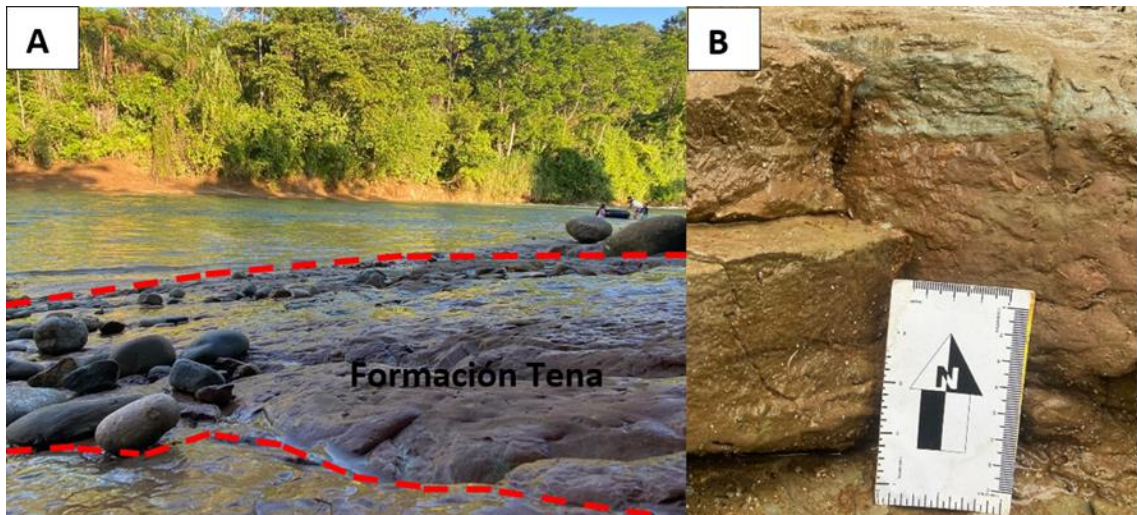


Figura 10. A) Afloramiento de la Formación Tena. Las líneas rojas entrecortadas muestran su superficie. **B)** Detalle de la estratificación y colores característicos de la Formación Tena. Coordenada UTM 183597.29 E, 9890328.73 S. **Realizado por:** Portillo, 2024.

DISCUSIÓN

Es importante destacar que la línea sísmica se realizó sobre una vía, por lo tanto, la primera unidad es un relleno estructura basada en la información in situ. La geometría de la línea sísmica se basó principalmente en la planitud de la superficie del relieve, lo cual permitió extender los 120 metros de longitud. Además, la ubicación de la línea sísmica se eligió estratégicamente en una zona central entre el río y la vía principal, lo que proporciona una representatividad adecuada del área de estudio.

Los criterios para la ubicación de las calicatas fueron cuidadosamente considerados para comparar y relacionar los datos geofísicos. La primera calicata P1, se excavo cerca de la línea sísmica para tener mayor confianza al momento de correlacionar información. La segunda calicata P2, se ubicó más alejada para obtener un punto de control sobre la variabilidad de los materiales. La profundidad alcanzada en P1 estuvo limitada por la presencia del nivel freático, mientras que en P2, la resistencia del material determinó la profundidad alcanzada. Debido a que las excavaciones de las calicatas se realizaron de forma manual, no fue posible alcanzar mayores profundidades. Sin embargo, este método proporcionó información valiosa sobre las unidades superficiales. Es importante señalar que las calicatas no se efectuaron sobre el relleno estructural donde se realizó la toma de datos geofísicos, sino que se hizo a 2,0 metros aproximadamente de la vía, en un relleno antrópico.

Al correlacionar los datos obtenidos de las calicatas con la unidad 1 del modelo de velocidad de onda S (Figura 5), se observan velocidades altas debido al relleno estructural, sus velocidades de onda S van de 350 m/s hasta 450 m/s, en trabajos similares (Xu et al., 2017) y (Cheng et al., 2023) lo caracteriza de igual manera. Este relleno, compuesto principalmente de rocas ígneas y clastos redondeados, es comúnmente utilizado en la provincia de Napo y en varias provincias amazónicas para la construcción de vías y edificaciones. La unidad 2 es la de menor velocidad, y por lo tanto de menor resistencia, cuyo espesor es de 4,0 m y se encuentra a 1,0 m de

profundidad, de acuerdo a revisiones bibliográficas se le asume como sedimentos aluviales. Además, coincide de forma lógica con los resultados de las calicatas. En el modelo de velocidad de onda P (Figura 7), la unidad 1 también muestra una velocidad baja, con un espesor de 5,0 m y sin cambios en la geometría a lo largo de esta unidad. Similar a la unidad 1 y unidad 2 del modelo de velocidad de onda S, esta unidad también se le asume como sedimentos aluviales. Esta información coincide con los estudios de (Sundararajan and Seshunarayana, 2018) y (Chunga, 2021) donde reportan rangos de velocidades de V_s y V_p , de 100 m/s – 220 m/s y de 250 m/s – 450 m/s respectivamente, que también lo asumen como sedimentos aluviales.

En base a la unidad 3 del modelo de velocidad de onda S, a partir de los 5,0 m de profundidad, se observa un incremento de las velocidades a medida que aumenta la profundidad. La unidad 3 es la de mayor espesor de aproximadamente 13,0 m, dentro de esta unidad se encuentra la unidad 4, que tiene forma de cuña. Según las descripciones de campo y bibliografía, esta estructura corresponde a la Formación Tena (Figura 10). De manera similar, el modelo de velocidad de onda P (Figura 7) muestra un notable incremento de velocidad desde la unidad 2, a los 5,0 m de profundidad, lo cual también se atribuye a los materiales de la Formación Tena. Estos resultados destacan la valiosa contribución de las técnicas geofísicas en la identificación y caracterización de las unidades geológicas demostrando su eficacia y precisión. El espesor de la Formación Tena es considerable, esta entre 100 m y 300 m (Baby et al., 2014; Albariño et al., 2008).

Investigaciones geofísicas en materiales geológicos similares a la Formación Tena, como las lodolitas y areniscas en torno a valores de V_s suelen estar entre 500 m/s a 3000 m/s, mientras que las velocidades V_p suelen estar entre 1200 m/s a 4000 m/s (Domenico, 1983; Tiab and Donaldson, 2016), estos valores son análogos al presente estudio.

De acuerdo a los modelos de velocidades de onda V_s y V_p , se identificaron dos unidades claramente diferenciales: los sedimentos aluviales al que se asignó como unidad A, que se extiende desde la superficie hasta los 5,0 metros de profundidad, y la Formación Tena al que se asignó como unidad B, que abarca desde los 5,0 hasta los 40,0 metros de

profundidad. El espesor de la Formación Tena es considerable, esta entre los 100 y 300 metros (Albariño et al., 2008; Baby et al., 2014).

En este estudio, se calculó un valor de V_{s30} de 347 m/s, parámetro crucial para la clasificación sísmica de suelos. Este valor clasifica a los suelos de la Comunidad San Pedro de Muyuna en la clase D, que corresponde a suelos de tipo intermedio con buena capacidad de soporte y moderada amplificación sísmica. Comparando este valor con estudios similares en regiones adyacentes, se observa una correlación consistente con los valores reportados por (Rosser and Gosar, 2010; Karabulut, 2018) en depósitos aluviales y rocas sedimentarias, quienes encontraron valores V_{s30} en el rango de 297 m/s a 334 m/s.

CONCLUSIONES

De acuerdo a la normativa NEHRP la clase de suelo es tipo D, cuya velocidad V_{s30} es de 347 m/s. El modelo de velocidad V_s proporciona información sobre la rigidez, en el cual se identificaron 6 unidades. La unidad de menor velocidad es la unidad 2, con un rango de 141 m/s a 280 m/s, mientras que la de mayor velocidad es la unidad 6, con valores entre 700 m/s y 814 m/s. El modelo de velocidad V_p aporta con información sobre la geometría de las unidades, se identificaron 4 unidades. La unidad de menor velocidad es la unida 1, con valores entre 325 m/s y 1200 m/s, y la de mayor velocidad es la unidad 4, con rangos de 2600 m/s a 2956 m/s. Ambos modelos, V_s y V_p , reflejan claramente un cambio significativo de velocidades a partir de los 5 metros de profundidad.

En base a la interpretación de las unidades visualizadas en los modelos de V_s y V_p , se definieron e identificaron dos secciones claramente diferenciables, las cuales en base a revisión en campo y apoyada con bibliografía se les denomino como unidad A a los depósitos aluviales y como unidad B a la Formación Tena. La unidad A está conformada por limos, arenas y gravas y posee un espesor de 5 m. La unidad B corresponde a una intercalación de lodolitas y areniscas.

A pesar de que a unidad 2 tiene un valor de V_s de 185 m/s, su limitado espesor (4,0 m) hace que el valor de V_{s30} no sea castigado de manera significativa. Por lo tanto, la roca madre somera contribuye a que la clase de suelo de acuerdo a la NEHRP tienda a tener valores altos de rigidez.

Los resultados de la investigación proporcionan información acerca de la resistencia y estructura del subsuelo de la Comunidad San Pedro de Muyuna, lo cual es fundamental como información previa a aplicaciones en construcción y evaluación de riesgos sísmicos.

BIBLIOGRAFÍA

- Abarca, K. (2022). Geología de superficie en los alrededores del río Tena entre Muyuna y Ongota - Cuenca Oriente del Ecuador.
- Albariño, L., Manacorda, L., Gil, M., Salinas, A., and Bonardo, M. (2008). Las secuencias cretácicas del suroriente y el subandino sur. Un modelo secuencial, Cuenca Oriente, Ecuador. ResearchGate, 21, 1001. <https://www.researchgate.net/publication/303851436>
- Allo, O. J., Ayolabi, E. A., and Oladele, S. (2019). Investigation of near-surface structures using seismic refraction and multi-channel analysis of surface waves methods—a case study of the University of Lagos main campus. In *Arabian Journal of Geosciences* (Vol. 12, Issue 7). Springer Verlag. <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4397-x>
- Álvarez, A., and Aceves, M. (2003). Geofísica Aplicada en los proyectos básicos de Ingeniería Civil. Instituto Mexicano Del Transporte.
- Araujo, S., Guzmán, O., Guamán, A., Espín, R., García, I., and Chulde, E. (2023). Seismic refraction tomography in San Luis, headward Coca River erosion zone. *Journal of Applied Geophysics*, 212. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2023.104981>
- Araujo, S., Guzmán, O., Rubio, R., Guerrero, P., Rojas, E., Moposita, W., García, I., Puetate, M. F., and Guamán, A. (2024). Seismic surveys and inverse problems regularization. In: *The Ecuadorian Amazon Nature-based living lab (NB LAB): an undergraduate research experience at the Upper Amazonia*. ResearchGate.
- ASTMD 2487. (2011). Práctica Estándar para la Clasificación de Suelos para Propósitos de Ingeniería (Sistema de Clasificación Unificada de Suelos). INTERNACIONAL. <https://doi.org/10.1520/D2487--11>.
- Azwin, I. N., Saad, R., and Nordiana, M. (2013). Applying the Seismic Refraction Tomography for Site Characterization. *APCBEE Procedia*, 5, 227–231. <https://doi.org/10.1016/j.apcbee.2013.05.039>
- Baby, P., Rivadeneira, M., and Barragán, R. (2014). *La Cuenca Oriente: Geología y Petróleo* (3rd ed.). Travaux de Institut Francais Etudes Andines.
- Cheng, K., Wu, H., Fang, Y., and Wu, Q. (2023). Experimental study on shear wave velocity of sand-gravel mixtures considering the effect of gravel content. *Frontiers in Earth Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.1076098>
- Chunga, K. (2012). Estudios de suelos de geología y geotécnica en los terrenos destinados para la construcción de la Universidad Regional Amazónica Ikiám, Tena. ResearchGate. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.33279.71842>

- Chunga, K. (2021). Estudio geológico para el proyecto Mi Lote III, Guayaquil. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.24338.02248>
- Collot, J.-Y., Sallares, V., and Pazmiño, N. (2009). Geología y geofísica marina y terrestre del Ecuador.
- Domenico, S. N. (1983). Sandstone and limestone porosity determination from shear and compressional wave velocity. *Exploration Geophysics*, 81–90. <https://doi.org/https://doi.org/10.1071/EG983081>
- GAD Parroquial San Juan de Muyuna. (2020). Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de la Parroquia Rural.
- Geometrics, Inc. (2009a). SeisImager / 2D TM Manual version 3.3. https://geometrics.com/wp-content/uploads/2019/05/SeisImager2D_Manual_v3.3.pdf
- Geometrics, Inc. (2009b). SeisImager/SW TM Manual version 3.0. https://geometrics.com/wp-content/uploads/2019/04/SeisImagerSW_Manual_v3.0.pdf
- Heansen, P. C. (1992). Analysis of discrete ill-posed problems by means of the L-curve. *SIAM Review*, 34(4), 561–580. <http://www.siam.org/journals/ojsa.php>
- INEC. (2010). Censo de Población y vivienda. Instituto Nacional de Estadística y Censos.
- INEC. (2020). Censo de Población y vivienda. Instituto Nacional de Estadística y Censos.
- Jaillard, E. (1997). Síntesis estratigráfica y sedimentológica del Cretáceo y Paleógeno de la Cuenca Oriental del Ecuador. <https://www.researchgate.net/publication/46298379>
- Karabulut, S. (2018). Soil classification for seismic site effect using MASW and ReMi methods: A case study from western Anatolia (Dikili -İzmir). *Journal of Applied Geophysics*, 150, 254–266. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2018.01.011>
- Kennett, B. (2009). Seismic wave propagation in stratified media. ANU E Press. https://doi.org/10.26530/OAPEN_459524
- Louie, J. N. (2001). Faster, Better: Shear-Wave Velocity to 100 Meters Depth from Refraction Microtremor Arrays. In *Bulletin of the Seismological Society of America* (Vol. 91).
- Martin-Gombojav, N., and Winkler, W. (2008). Recycling of Proterozoic crust in the Andean Amazon Foreland of Ecuador: Implications for Orogenic development of the Northern Andes. *Terra Nova*, 20(1), 22–31. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.2007.00782.x>
- Mather, A. E., Stokes, M., and Whitfield, E. (2017). River terraces and alluvial fans: The case for an integrated Quaternary fluvial archive. *Quaternary Science Reviews*, 166, 74–90. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2016.09.022>
- NEC. (2014). PELIGRO SÍSMICO: Diseño sismo resistente. <https://www.habitatyvivienda.gob.ec/wp-content/uploads/2023/03/2.-NEC-SE-DS-Peligro-Sismico-parte-1.pdf>

- NEHRP. (2020). NEHRP (National Earthquake Hazards Reduction Program) Recommended Seismic Provisions for New Buildings and Other Structures (FEMA P-2082-1): Vol. I.
- Ortiz, M. (2022). Análisis estratigráfico y sedimentológico de los depósitos cuaternarios en la zona media del valle del río Tena.
- Ozcep, F., and Ozcep, T. (2011). Geophysical analysis of the soils for civil (Geotechnical) engineering and urban planning purposes: Some case histories from Turkey. *International Journal of the Physical Sciences*, 6(5), 1169–1195. <https://doi.org/10.5897/IJPS11.090>
- Ozdemir, A., and Nalbantçilar, T. (2016). Potential Settlement Due to Seismic Effects in the Residential Area of Ilgin (Konya, Turquía). *Earth Sciences Research Journal*, 20(2), F1–F9. <https://doi.org/10.15446/esrj.v20n2.50062>
- Park, C. B., Miller, R. D., and Xia, J. (1999). Multichannel analysis of surface waves. In *GEOPHYSICS* (Vol. 64, Issue 3). <https://doi.org/10.1190/1.1444590>
- Pazzaglia, F. J. (2013). Fluvial Terraces. In *Treatise on Geomorphology* (Vol. 9, pp. 379–412). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374739-6.00248-7>
- Roma, V., and Tononi, C. (2011). MASW-REMI method for Seismic Geotechnical Site Characterization: Importance of Higher Modes of Rayleigh Waves. <https://doi.org/10.1190/sbgf2011-263>
- Roser, J., and Gosar, A. (2010). Determination of Vs30 for seismic ground classification in the Ljubljana area, Slovenia. *ResearchGate*, 7(1), 61. <https://www.researchgate.net/publication/228954195>
- Rowan, L. R. (2023). The National Earthquake Hazards Reduction Program (NEHRP): Overview and Issues for Congress.
- Ruiz, G. M. H., Seward, D., and Winkler, W. (2004). Detrital thermochronology - A new perspective on hinterland tectonics, an example from the Andean Amazon Basin, Ecuador. *Basin Research*, 16(3), 413–430. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2117.2004.00239.x>
- Sato, H., and Fehler, M. C. (2009). SEISMIC WAVE PROPAGATION AND SCATTERING IN THE HETEROGENEOUS EARTH. www.springer.com/series/3754
- Sieron, K., Weissling, B., Gutiérrez-Anguiano, R., González-Hernández, J. C., Martínez-Báez, C., Monfil-León, E. U., and Córdoba Montiel, F. (2021). Estudios Geofísicos en el techo de México. *UVserva*, 12, 55–62. <https://doi.org/10.25009/uvs.vi12.2817>
- Stephenson, W. J., Louie, J. N., Pullammanappallil, S., Williams, R. A., and Odum, J. K. (2005). Blind shear-wave velocity comparison of ReMi and MASW results with boreholes to 200 m in Santa Clara Valley: Implications for earthquake ground-motion assessment. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95(6), 2506–2516. <https://doi.org/10.1785/0120040240>

- Street, R., Woolery, E. W., Wang, Z., and Harris, J. B. (2001). NEHRP soil classifications for estimating site-dependent seismic coefficients in the Upper Mississippi Embayment. [https://doi.org/10.1016/s0013-7952\(01\)00057-6](https://doi.org/10.1016/s0013-7952(01)00057-6)
- Sundararajan, N., and Seshunarayana, T. (2018). Shear Wave Velocities in the Estimation of Earthquake Hazard Over Alluvium in Seismically Active Region. *Journal of the Geological Society of India*, 92(3), 259–264. <https://doi.org/10.1007/s12594-018-1002-y>
- Thitimakorn, T., and Raenak, T. (2016). NEHRP Site Classification and Preliminary Soil Amplification Maps of Lamphun City, Northern Thailand. *Open Geosciences*, 8(1), 538–547. <https://doi.org/10.1515/geo-2016-0046>
- Thurber, C., and Ritsema, J. (2015). Theory and Observations - Seismic Tomography and Inverse Methods. In *Treatise on Geophysics: Second Edition (Vol. 1, pp. 307–337)*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53802-4.00009-9>
- Tiab, D., and Donaldson, E. C. (2016). Effect of Stress on Reservoir Rock Properties. In *Petrophysics (pp. 483–582)*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-803188-9.00009-7>
- Toulkeridis, T., Andrade, D., and Zavala, P. (2015). Amenazas de origen natural y gestión de riesgo en el Ecuador. www.repositorio.espe.edu.ec.
- Vera, D., Livino, A., Zurita, D., Nabernegg, M., Paredes, M., and Sempértégui, B. (2017). Reconstruyendo las cifras luego del sismo memorias. INEC.
- Xu, X. qian, Su, L. jun, Zhang, G. da, and Zhu, H. hu. (2017). Analysis on shear wave velocity structure of a gravel landslide based on dual-source surface wave method. *Landslides*, 14(3), 1127–1137. <https://doi.org/10.1007/s10346-016-0780-9>