



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

**CARACTERIZACIÓN DE LA ACTIVIDAD NEOTECTÓNICA DE
FALLA CUMANDÁ A TRAVÉS DE ÍNDICES
GEOMORFOLÓGICOS EN LA ZONA SUBANDINA DEL
ECUADOR**

Proyecto de investigación previo a la obtención del Título de:
INGENIERA EN GEOCIENCIAS

AUTORA
ANDREA CAROLINA SALGADO SÁNCHEZ

Napo - Ecuador

2023



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

**CARACTERIZACIÓN DE LA ACTIVIDAD NEOTECTÓNICA DE
FALLA CUMANDÁ A TRAVÉS DE ÍNDICES
GEOMORFOLÓGICOS EN LA ZONA SUBANDINA DEL
ECUADOR**

Proyecto de investigación previo a la obtención del Título de:

INGENIERA EN GEOCIENCIAS

AUTORA: ANDREA CAROLINA SALGADO SÁNCHEZ

TUTOR: Ph.D. OSWALDO GUZMÁN

Napo - Ecuador

2023

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

Yo, ANDREA CAROLINA SALGADO SÁNCHEZ con documento de identidad 1754244778, 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 el presente documento son de mi autoría y de mi absoluta responsabilidad.

Tena, 28 de julio de 2023



Andrea Carolina Salgado Sánchez

1754244778

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Yo, ANDREA CAROLINA SALGADO SÁNCHEZ, con documento de identidad N° 1754244778, en calidad de autor/a y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación: **CARACTERIZACIÓN DE LA ACTIVIDAD NEOTECTÓNICA DE FALLA CUMANDÁ A TRAVÉS DE ÍNDICES GEOMORFOLÓGICOS EN LA ZONA SUBANDINA DEL ECUADOR**. de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN, reconozco a favor de la Universidad Regional Amazónica Ikiam una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

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

Tena, 28 de julio de 2023



Andrea Carolina Salgado Sánchez

1754244778

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación: “CARACTERIZACIÓN DE LA ACTIVIDAD NEOTECTÓNICA DE FALLA CUMANDÁ A TRAVÉS DE ÍNDICES GEOMORFOLÓGICOS EN LA ZONA SUBANDINA DEL ECUADOR”, en la modalidad de: Artículo original en español y de manera optativa en inglés, adaptado a los parámetros y normas de una revista indexada. fue realizado por, Andrea Carolina Salgado Sánchez 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, 28 de julio de 2023



Oswaldo José Guzmán Gutiérrez

C.I: 175945861

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi madre Ruth Sánchez por ser mi inspiración y apoyarme en cada proceso de mi vida, al igual que a mi tía Diana Sánchez a quien considero una segunda figura materna. A mi hermano Sebastián Salazar por estar a mi lado en todo este proceso y a mis mascotas Felipe, Frida y Freya quienes me alegraron en los días más oscuros.

A Kerly Barros y a Germán Jácome por ser mis mejores amigos y estar conmigo desde el primer momento.

A mi tutor Oswaldo Guzmán quien con mucha paciencia me guió y apoyó durante esta investigación. A todos mis profesores de Geociencias, quienes me enseñaron cómo debe ser un buen profesional y me han inspirado a seguir adelante.

DEDICATORIA

A mi familia y a todas las mujeres que sueñan con la ciencia.

TABLA DE CONTENIDO

Declaración de derecho de autor, autenticidad y responsabilidad.....	i
Autorización de publicación en el repositorio institucional.....	ii
Certificado de dirección de trabajo de titulación.....	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTO.....	v
ÍNDICE DE TABLAS.....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vii
ÍNDICE DE APÉNDICES.....	viii
Resumen.....	ix
Abstract.....	x
INTRODUCCIÓN.....	1
CONTEXTO GEODINÁMICO.....	3
METODOLOGÍA.....	6
Adquisición de datos digitales.....	6
Cartografía de la falla, extracción de la red de drenaje y delimitación de las subcuencas de drenaje.....	6
Fundamentos y cálculo de índices geomorfológicos.....	7
RESULTADOS.....	9
Traza de la Falla Cumandá, extracción de la red de drenaje y delimitación de las subcuencas.....	10
Asimetría de la Cuenca de Drenaje.....	11
Radios de elongación.....	13
Sinuosidad del frente de montaña (Smf).....	14
Índice de Hack o Stream-length gradient (SL).....	15
DISCUSIÓN.....	17
<i>Extensión y Cinemática de la Falla Cumandá.....</i>	17
<i>Neotectónica Espacial de la Falla Cumandá.....</i>	18
<i>Utilidad de los Índices geomorfológicos.....</i>	19
CONCLUSION.....	19
BIBLIOGRAFÍA.....	21
APÉNDICE.....	25

ÍNDICE DE TABLA

Tabla 1. Resultados de la caracterización de las subcuencas a través del índice AF.....	12
Tabla 2. Resultados de la caracterización de las subcuencas a través del índice Re.....	13
Tabla3. Resultados de la caracterización de los 11 tramos de cada subcuenca a través del índice SL.....	15

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Representación del área de estudio, su contexto geodinámico y sísmica del sistema de fallas Napo-Cutucú.....	5
Figura 2. Diagrama de flujo metodológico usado durante la elaboración de este trabajo.....	7
Figura 3. Mapa de las subcuencas enumeradas desde la más cercana al río Pastaza hasta la más alejada.....	11
Figura 4. Mapa del índice AF de las subcuencas, con flechas que muestran la dirección de basculamiento de cada una de ellas.....	12
Figura 5. Mapa del índice R.....	13
Figura 6. Mapa de sinuosidad del frente de montaña.....	13
Figura7a. Mapa de puntos calientes (Hotspot) y Cluster que muestra acumulaciones de valores SL anómalamente altos.....	12
Figura7b. Mapa de <i>knickpoints</i> sobre un mapa de control litológico.....	12

ÍNDICE DE APÉNDICES

Apéndice A. Extracción de la red de drenaje.....	5
Apéndice B. Extracción de las subcuencas que atraviesan la falla	6
Apéndice C. Índice de asimetría de la cuenca de drenaje AF	6
Apéndice D. Índice de radios de elongación (Re).....	7
Apéndice E. Índice de sinuosidad de frente de montaña.....	7
Apéndice F. Índice de Hack o Stream Length Gradient (SL)	7

RESUMEN

El presente estudio tiene como objetivo delinear una nueva traza de la falla Cumandá en la zona Subandina del Ecuador a través de evidencias morfotectónicas y evaluar su actividad tectónica en función de cuatro índices geomorfológicos (AF, Re, Smf, SL) mediante un modelo de elevación digital (DEM). Las evidencias morfotectónicas mostraron por primera vez un movimiento dextral y de esta manera se infiere que la estructura es una falla inversa dextral, compatible con el sistema de fallas inversas de la región Subandina. El estudio de los índices geomorfológicos mostró que la tectónica local tuvo una gran influencia en el sistema de drenaje dando como resultado subcuencas con una asimetría heterogénea y con formas primordialmente elongadas. La traza de la falla presenta valores uniformemente bajos de Smf y zonas con valores anormalmente altos del índice SL sugiriendo deformación activa.

Palabras clave: Índices geomorfológicos, zona Subandina, evidencias morfotectónicas.

ABSTRACT

The present study aims to outline a new trace of the Cumandá fault in the Subandean zone of Ecuador through morphotectonic evidence and assess its tectonic activity based on four geomorphological indices (AF, Re, Smf, SL) using a digital elevation model (DEM). The morphotectonic evidence showed for first time a dextral movement, and it is inferred that the structure is a dextral reverse fault, compatible with the reverse fault system in the Subandean region. The study of the geomorphological indices showed that local tectonics had a significant influence on the drainage system, resulting in sub-basins with heterogeneous asymmetry and primarily elongated shapes. The fault trace exhibits uniformly low values of Smf and areas with abnormally high values of the SL index, suggesting active deformation.

Keywords: Geomorphological indices, Subandean zone, morphotectonic evidence.

CARACTERIZACIÓN DE LA ACTIVIDAD NEOTECTÓNICA DE FALLA CUMANDÁ A TRAVÉS DE ÍNDICES GEOMORFOLÓGICOS EN LA ZONA SUBANDINA DEL ECUADOR

INTRODUCCIÓN

La sismicidad de los Andes Ecuatorianos se caracteriza por terremotos de magnitudes mayores a $M_w=5$ (Yepes et al., Baby et al., 2002) relacionados a un contexto de subducción (Bès de Berc et al., 2005). Al oriente de los Andes se localiza la zona Subandina, porción deformada de la Cuenca Oriente (Baby et al., 2004), limitada por sistemas de fallas inversas que muestran una actividad neógena (Egüez et al., 2003). Estas fallas generalmente se distinguen por un alto ángulo y una orientación N-S a NNE-NNO (Baby et al., 2004). En este marco se ubica el sistema de fallas y pliegues Napo-Cutucú que está activo desde su parte norte en el Levantamiento Napo hasta la región de la cordillera de Cutucú (Figura 1a) (Bès de Berc, 2003).

En la zona Subandina ecuatoriana se han desarrollado estudios de tectónica activa en cuencas individuales (Guarderas & Egüez, 2019) o a nivel regional (eg. Bès de Berc, 2003; Bès de Berc et al., 2005; (SARA) Costa et al., 2020). No obstante, los estudios puntuales de fallas permiten entender la actividad de las mismas. Por ejemplo, la actividad de la falla Cumandá, la cual es parte del sistema de fallas Napo-Cutucú.

La recopilación de información de la Falla Cumandá es compleja y controversial debido a que varias investigaciones la reconocen por diferentes longitudes, trazas y denominaciones. Por ejemplo, Egüez et al. (2003) nombran a esta estructura como falla Mera e indican que tiene una longitud de alrededor de 12,5 km y la relacionan con el abanico aluvial de Pastaza y la Meseta de Mera. Por otro lado, Bès de Berc et al., (2005) la establecen como falla Cosanga, reportando que tiene una longitud desde el levantamiento Napo hasta las regiones cercanas al Abanico de Pastaza, y la vinculan con velocidades de levantamiento de $0,12 \frac{cm}{año}^{-1}$. El proyecto SARA (Costa et al., 2020) es otro caso de estas discrepancias, señalando la presencia de una falla conocida como Cumandá frente al granito de Abitagua que tiene una longitud aproximada de 18 km. A pesar de que los estudios difieren en el nombre de la estructura, estos coinciden

en determinarla como una falla inversa. En este contexto, se tomará el nombre reportado en el estudio más reciente para su alusión.

La geomorfología tectónica evalúa la actividad tectónica de fallas y pliegues con tasas de deformación bajas a medias, especialmente cuando no existe una datación cuaternaria (Azañón et al., 2012). En las regiones con deformación activa, los procesos de plegamiento y fallamiento pueden tener un impacto significativo en el patrón de drenaje; estos procesos provocan cambios en la geometría y complejidad de los ríos, así como asimetría en las cuencas, incisión acelerada de los ríos y deflexiones en el flujo del agua (Cox, 1994). Estos procesos se analizan través de la cuantificación de índices geomorfológicos (Ahmad et al., 2018; Gao et al., 2013).

La disponibilidad de modelos de elevación digital y softwares basados en SIG, han facilitado la caracterización del paisaje a través de los índices geomorfológicos (Gao et al., 2013). Keller (1986) indica que los índices más exitosos son los que están relacionados con procesos de erosión y deposición asociados con los sistemas fluviales. Entre ellos están; el índice de Hack (SL) (Hack, 1973), sinuosidad del frente de montaña (Smf) (Bull & McFadden, 1980) y la relación entre el ancho del fondo del valle y la altura del valle (Vf) (Bull, 2007). Además, actualmente también se destaca el uso del índice de asimetría de la cuenca (AF) (E. Keller & Pinter, 2001) y radio de elongación (Re) (Schumm, 1986). El uso de estos índices y una cartografía precisa ayudan a esclarecer zonas de deformación activa. La cartografía de fallas activas requiere el uso de varios métodos y análisis debido a su complejidad y a la presencia frecuente de múltiples rupturas. (Kerr et al., 2003). Existen diferentes marcadores morfotectónicos que pueden indicar la presencia de una falla, por ejemplo: escarpes de falla, facetas triangulares, drenajes desplazados y abanicos aluviales.

La falla Cumandá atraviesa el cantón Mera en Ecuador (*figura 1a*) y ha registrado sismos de hasta 5,6 Mw según el catálogo homogeneizado de 1900-2009 (Beauval et al., 2013; IGEPN, 2023a). Se usan los datos de este catálogo ya que están revisados y estandarizados.

Debido a la cercanía de esta estructura con áreas pobladas, es imperativo evaluar su actividad para comprender los riesgos sísmicos asociados a ella. El estudio de la falla Cumandá mediante índices geomorfológicos ayuda a comprender dicha actividad y tomar medidas adecuadas de mitigación. Además, proporciona una base para estudiar

el sistema de fallas de la zona Subandina, lo que contribuye a un mejor entendimiento de la dinámica tectónica y la gestión de riesgos en la región.

En esta investigación se usarán los índices geomorfológicos: AF, Smf, Re y SL; obtenidos a través de un modelo de elevación digital (DEM), para la caracterización cuantitativa de la actividad neotectónica de la Falla Cumandá y se cartografiará a esta estructura a una escala local mediante el estudio de drenajes desplazados y facetas triangulares y trapezoidales en la zona Subandina del Ecuador.

CONTEXTO GEODINÁMICO

El Ecuador se localiza en la parte Noroccidental de la placa Sudamericana (Chatelain et al., 1999) , en la zona de expansión oceánica orientada este-oeste, la cual, separa las Placas de Nazca y Cocos (Marocco & Winter, 1997). Además, se encuentra en el punto de unión de los Andes centrales y septentrionales (Marocco & Winter, 1997). A lo largo del margen ecuatoriano, la subducción oblicua de la placa de Nazca genera deformación y fragmentación de la placa continental que se superpone, lo que resulta en un desplazamiento hacia el noreste de la Astilla Norandina (North Andean Sliver, NAS) (Nocquet et al., 2014) . Particularmente en Ecuador, la deformación asociada se acomoda a lo largo del sistema de fallas Chigual-Cosanga-Pallatanga-Puná (CCPP) (Marconato et al., 2023; Nocquet et al., 2014). Estos desplazamientos han ocasionado que el Ecuador se divida en diferentes regiones morfotectónicas: la planicie costera, la Cordillera Occidental, la Cordillera Real, la zona Subandina y finalmente la Cuenca amazónica (Figura 1b) (Goossens, 1969) .

La Cordillera Real ecuatoriana fue levantada a lo largo del Neógeno (Delfaud et al., 1999; Spikings et al., 2000; Hungerbühler et al., 2002; Christophoul et al., 2002; Ruiz et al., 2002), con altitudes y tasas de levantamiento similares a los Andes peruanos y bolivianos al sur, y a los Andes colombianos al norte (Bès de Berc, 2003). La región Subandina de Ecuador es el piedemonte de la Cordillera Oriental, la cual, se creó a partir de la inversión tectónica de estructuras extensivas pre-cretácicas existentes, relacionadas con el sistema de rift Tetiano del Triásico Superior y el Jurásico Inferior, el cual se orienta en dirección NNE-SSO. (Balkwill et al., 1995; Baby et al., 1998; Christophoul et al., 1999; Baby et al., 2004).

La zona Subandina se divide de norte a sur, en tres unidades morfotectónicas: el levantamiento Napo, la depresión Pastaza y la Cordillera del Cutucú (Baby et al., 2004). El levantamiento Napo corresponde a un domo alargado en orientación NNE-SSO. La depresión Pastaza está llena de un abanico aluvial del Mioceno tardío al Pleistoceno medio (Abanico de Pastaza) y la Cordillera de Cutucú aparece como una antiforma alargada con pliegues y fallas de cabalgamiento (Bès de Berc, 2003). El Abanico aluvial de Pastaza está relacionado a los eventos de avulsión que han sucedido en los últimos 100 años en el río Pastaza, como consecuencia, el abanico ha tenido procesos de agradación (Bernal et al., 2012). Estos sucesos pueden relacionarse a la actividad tectónica sobre el frente subandino, la cual crea una configuración topográfica y sedimentaria favorable para las avulsiones (Bernal et al., 2012).

El área de estudio se localiza al noroeste de la ciudad de Mera y se caracteriza por terrenos con colinas y estructuras que están influenciados en gran medida por el levantamiento Napo e incluyen geoformas como mesetas, cuevas, chevrones y restos de superficies estructurales que se han desarrollado sobre una variedad de formaciones sedimentarias, siendo la Formación Tena y la Formación Mera las más predominantes (MAGAP-PRAT & SIGTIERRAS, 2015)

Por otro lado, se observan dos principales dominios geológicos en la zona de estudio, el granito de Abitagua y la Formación Mera. El granito de Abitagua es una estructura del Jurásico- Cretáceo Inferior que está compuesta por monzonita de color rosado de grano medio a grueso, con varios xenolitos de basalto, andesita y porfirita (Núñez del Arco, 2003) y tiene una longitud aproximada de 120 km y un ancho de 15 km (Litherland et al; 1994). La Formación Mera, perteneciente al Cuaternario, se comprende tres unidades: una de flujo de detritos (conglomerados gruesos con matriz flotante) con un espesor de 50 a 80 metros, y dos niveles de lahar del volcán Tungurahua (Baby, et al; 2004). La Formación Mera sobreyace directamente sobre el granito de Abitagua (Baby, et al; 2004).

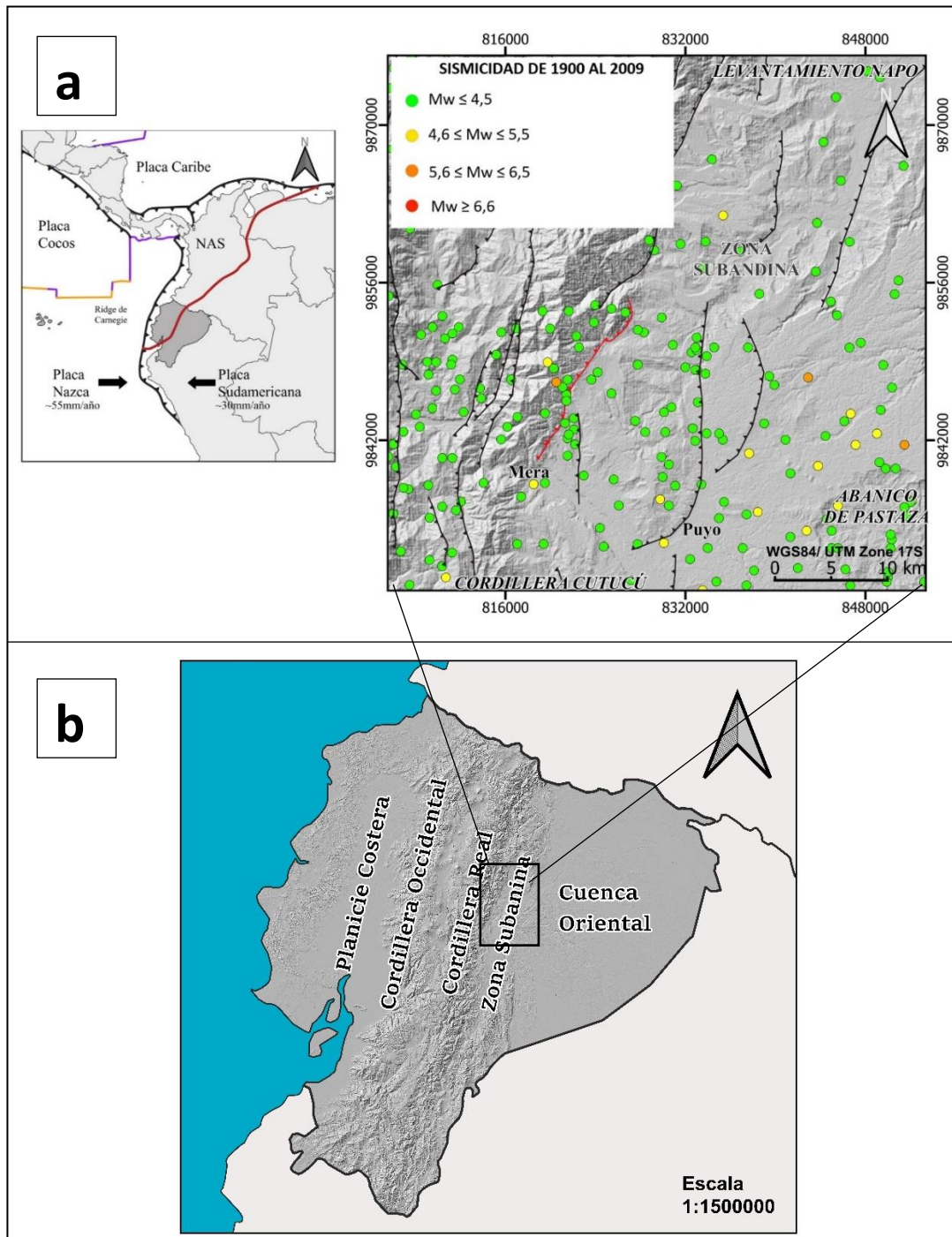


Figura 1. Representación del área de estudio, su contexto geodinámico y sismicidad del sistema de fallas Napo-Cutucú.

Realizado por: Andrea Salgado, 2023

(a) El recuadro superior izquierdo indica la ubicación del área de estudio y el contexto geodinámico regional, en el cual se representan los esfuerzos y los límites de la placa de Nazca y la Placa Sudamericana. Las líneas de color naranja son fallas divergentes, las líneas de color violeta fallas transformantes, las líneas de color negro representan fallas convergentes y la línea de color rojo representa la ubicación de la Astilla

Norandina (NAS, por sus siglas en inglés), modificado de (Chlieh et al., 2014). Además, se representa parte del sistema de fallas Napo-Cutucú, modificado de (Bès de Berc et al., 2005; Costa et al., 2020; Egüez et al., 2003), junto con el contexto morfotectónico y los sismos del catálogo homogeneizado del Instituto geofísico de 1900 a 2009 alrededor de la falla Cumandá, la cual está representada en rojo.
(b)Regiones del Ecuador, en el recuadro negro se ubica el sistema de fallas Napo Cutucú.

METODOLOGÍA

El estudio de la neotectónica de la falla Cumandá involucró la adquisición de datos digitales, los cuales fueron trabajados en el software de sistemas de la información geográfica ArcGis específicamente en el programa ArcMap, con el propósito de extraer e interpretar la red de drenaje, delimitar las subcuencas hidrográficas y calcular los índices geomorfológicos.



Figura 2. Diagrama de flujo metodológico usado durante la elaboración de este trabajo

Realizado por: Andrea Salgado, 2023.

Adquisición de datos digitales

Los datos usados se extrajeron de un modelo de elevación digital ALOS PALSAR de 12,5 m obtenido de la página web de la ASF (Alaska Satellite Facility).

Cartografía de la falla, extracción de la red de drenaje y delimitación de las subcuencas de drenaje.

La cartografía de la falla consistió en el estudio de facetas triangulares y trapezoidales a través de un mapa de sombras, y el análisis de corrientes/drenajes desplazados

usando la red de drenaje. La red de drenaje fue extraída mediante el modelo de elevación digital usando el set de herramientas *Hydrology* de ArcMap (Apéndice A). Las subcuencas principales fueron delimitadas usando puntos de desfogue (Apéndice B) obtenidos de la red de drenaje.

Se calcularon 4 índices geomorfológicos: *AF*, *Re*, *Smf* y *SL*; basándose en la morfología de las subcuencas.

Fundamentos y cálculo de índices geomorfológicos

- **Índice de asimetría de la cuenca de drenaje AF**

El índice o factor de asimetría (*AF*) fue desarrollado para detectar posible basculamiento tectónico a escala de cuencas de drenaje (Keller & Pinter, 2001).

El índice *AF* está definido por la siguiente ecuación:

Donde:

$$\text{Ecuación 1. } AF = 100 \left(\frac{Ar}{At} \right)$$

AF es el Factor de asimetría

Ar es el área del lado derecho

At es el área total de la subcuenca

Los resultados obtenidos de *AF* se expresaron como el valor absoluto menos 50, y estos se dividieron en cuatro intervalos: *AF*<5 (subcuencas simétricas), *AF*= 5-10 (levemente asimétricas), *AF*=10-15 (moderadamente asimétrica), y *AF*>15 (Fuertemente asimétricas) (Pedrera et al., 2009).

Para determinar el índice ***AF***, se utilizó la herramienta *Stream Order* en ArcMap (Apéndice C) para identificar los principales drenajes de cada subcuenca. Estos drenajes se usaron como divisor de la cuenca para determinar el área del lado derecho de la subcuenca (*Ar*) y el área total (*At*) (Ecuación 1).

- **Índice de radios de elongación (Re)**

El radio de elongación se define como el radio del diámetro de un círculo (R_c) que tiene la misma área que la longitud máxima de una cuenca (L) (Schumm, 1986). El radio de elongación es la representación de la forma de una subcuenca, por un lado, la erosión crea una subcuenca circular mientras que la tectónica moldea a las subcuencas en una forma más elongada (Ahmad et al., 2018).

Este índice está dado por:

$$\text{Ecuación 2. } Re = \frac{R_c}{L}$$

Donde R_c es el diámetro de un círculo con la misma área de la subcuenca y Re es el índice adimensional de circularidad.

Los resultados se clasificaron según el siguiente criterio: Circular 1-0,8; Levemente Elongada 0,79-0,6; Elongada 0,59-0,4; Altamente Elongada 0,39-0,2. (Bhat et al., 2013).

El índice Re se determinó utilizando los drenajes principales para obtener la longitud máxima de las subcuencas (L) (Ecuación 2) (Apéndice D).

- **Índice de sinuosidad de frente de montaña (S_{mf})**

El S_{mf} cuantifica los cambios tectónicos que sufren los frentes de montaña, relacionando la longitud planimétrica del frente de montaña (L_{mf}) con una línea recta de la misma sección (L_s) (Bull, 2007).

Estos valores se reemplazan en la ecuación 3:

$$\text{Ecuación 3. } S_{mf} = L_{mf}/L_s$$

Los resultados del S_{mf} se clasificaron de la siguiente forma: Frente de montaña inactivo: $S_{mf} > 3$; Frente de montaña moderadamente activo: 1,5-3; Frente de montaña altamente activo: 1-1,5 (Bull, 2007).

En el análisis del índice ***S_{mf}*** se utilizó un mapa de pendientes con valores de 0-35% para pendientes bajas a medias y >35% para pendientes altas (Apéndice E); con la finalidad de delimitar el frente de montaña (*L_{mf}*) y dividir la traza en 11 segmentos (*L_s*) (Ecuación 3).

- **Índice de Hack (Stream-length gradient)**

El índice SL se usa para evaluar la intensidad relativa de la tectónica activa, pues los valores SL son los resultados comparativos para el levantamiento tectónico y la erosión (Hack, 1973., Keller & Pinter, 2001).

$$\text{Ecuación 4. } SL = (dH/dL) L$$

Donde:

dH es la variación de elevación

DL es la longitud de segmento

L es la longitud total del canal desde el punto medio del segmento donde se calcula el índice, hasta el inicio del canal.

Los valores de ***SL*** se obtuvieron automáticamente utilizando el modelo de elevación digital con la toolbox SLiX desarrollada por Piacentini et al., 2020 en el software ArcMap. Para este caso, se utilizaron los modelos SLiX y SL-HCA (Apéndice F) de los cuales se obtuvieron un mapa de *knickpoints* y un mapa de puntos de calor respectivamente. El mapa de *knickpoints* se representó sobre un mapa de control litológico modificado del “Mapa Geológico del Ecuador” (Egüez et al., 2017). Los *knickpoints* en la literatura científica inglesa, son puntos de inflexión abruptos en la inclinación del cauce de un río, que pueden ser observados a lo largo de un perfil longitudinal (Brush & Wolman, 1960; Goudie, 2003). Se usará el término en inglés *knickpoint* a falta de una traducción adecuada de la palabra al español (Castillo & Lugo-Hubp, 2011).

RESULTADOS

Traza de la Falla Cumandá, extracción de la red de drenaje y delimitación de las subcuencas

Se logró cartografiar la falla mediante la identificación de cuatro drenajes desplazados en la parte sur de la estructura (*figura 3*). Estos drenajes muestran un ángulo de desviación de 90 grados y coinciden con el contacto entre el granito de Abitagua y la Formación Mera. Estos cuatro drenajes desplazados muestran un movimiento dextral y se encuentran coherentemente alineados. Además, se observaron facetas triangulares y trapezoidales en la parte norte de la falla, las cuales también están alineadas entre sí. Estas evidencias permitieron cartografiar con mayor precisión la traza de la falla Cumandá.

Por otro lado, se encontró un drenaje desplazado sinextral que no coincide con las demás características morfotectónicas encontradas. Se sugiere que este drenaje podría ser resultado de un contraste litológico en lugar de un desplazamiento tectónico. En el segmento negro ilustrado en la *figura 3*, no se pudo identificar ninguna de estas evidencias por lo que se realizó una proyección hacia la parte norte de la falla hasta unirla con el otro segmento ya establecido.

Las subcuencas fueron delimitadas usando la red de drenaje, enumeradas desde la subcuenca más cercana al río Pastaza (1) hasta la más alejada (6).

Las subcuencas estudiadas presentan un rango de áreas que van desde 2 km² hasta 30 km², con un promedio de aproximadamente 17 km². Para la discusión, más adelante, se considerarán principalmente aquellas subcuencas que se encuentren más cercanas al valor promedio. Por lo tanto, se tomarán en cuenta las subcuencas 2, 3, 4, 5 y 6.

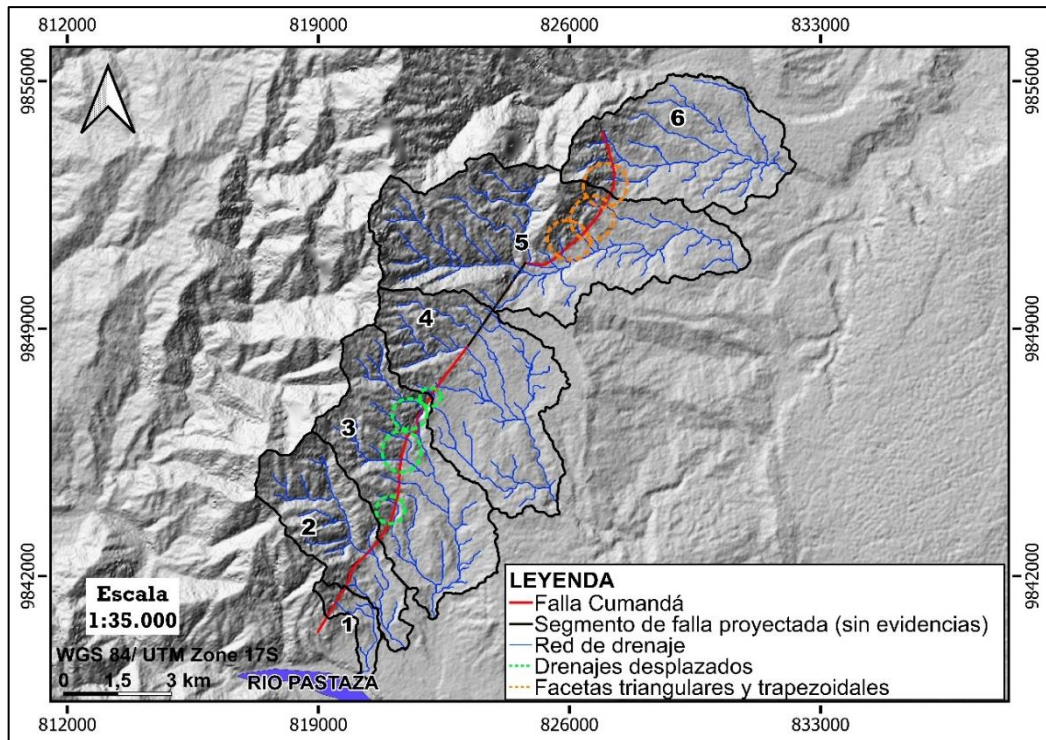


Figura 3. Mapa de las subcuencas enumeradas desde la más cercana al río Pastaza hasta la más alejada.
Realizado por: Andrea Salgado, 2023.

- **Asimetría de la Cuenca de Drenaje**

Cuatro subcuencas (1, 2, 4, 5) presentaron valores de AF con un patrón de basculamientos contrarios en la parte sur y norte de la falla Cumandá **figura 4, tabla 1**. Las subcuencas que señalaron asimetrías fuertes (2, 3) tienen un basculamiento con orientación aproximada NEN, consistentes a la orientación de la falla. Las subcuencas 5 y 6, ubicadas al extremo norte de la falla, presentan una orientación SOS y sus basculamientos son fuerte y leve respectivamente.

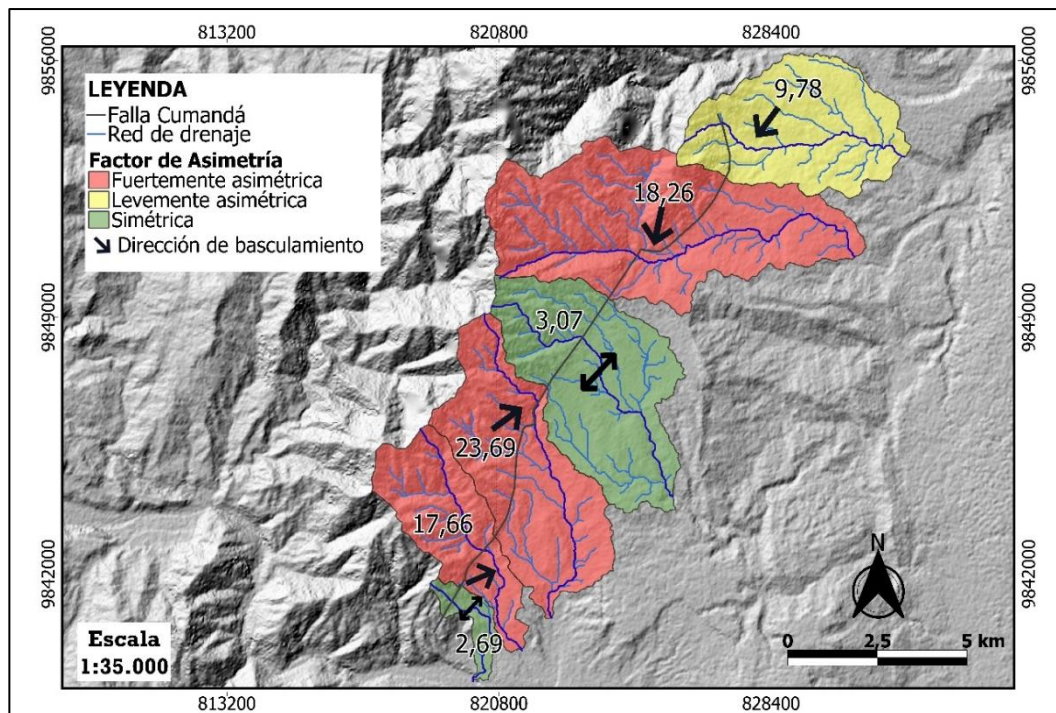


Figura 4. Mapa del índice AF de las subcuencas, con flechas que muestran la dirección de basculamiento de cada una de ellas.

Realizado por: Andrea Salgado, 2023.

Tabla 1. Resultados de la caracterización de las subcuencas a través del índice AF

<i>Subcuenca</i>	<i>Área derecha</i>	<i>Área total</i>	<i>AF (Km²)</i>	<i>AF normalizado</i>	<i>Rango</i>	<i>Asimetría</i>
1	1,08	2,05	52,69	2,69	<5	Simétrica
2	3,60	11,14	32,34	17,66	>15	Fuertemente asimétrica
3	5,19	19,73	26,31	23,69	>15	Fuertemente asimétrica
4	9,99	21,29	46,93	3,07	<5	Simétrica
5	20,84	30,52	68,26	18,26	>15	Fuertemente asimétrica
6	10,34	17,30	59,78	9,78	5--10	Levemente asimétrica

Realizado por: Andrea Salgado

- Radios de elongación

La **figura 5.** muestra un grado homogéneo de elongación en las subcuencas 2 a la 5. En este caso, las subcuencas 2, 3, 4 y 5 son elongadas mientras que la subcuenca 6 tiene un grado de elongación leve. Los resultados obtenidos se reflejan en la **tabla 2.**

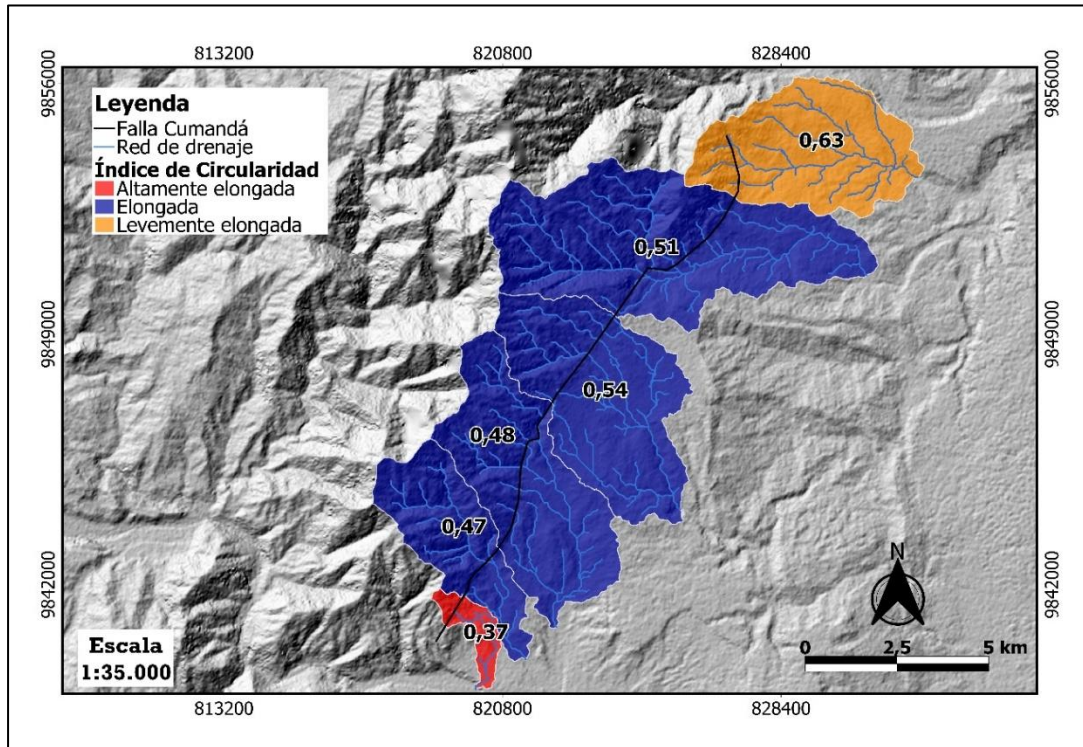


Figura 5. Mapa del índice Re
Realizado por: Andrea Salgado, 2023.

Tabla 2. Resultados de la caracterización de las subcuencas a través del índice Re.

Subcuenca	Área total (km ²)	RC	Re	Rango	Clasificación
1	2,05	1,62	0,37	0,2-0,39	Altamente elongada
2	11,14	3,77	0,47	0,4-0,59	Elongada
3	19,73	5,01	0,48	0,4-0,59	Elongada
4	21,29	5,21	0,54	0,4-0,59	Elongada
5	30,52	6,23	0,51	0,4-0,59	Elongada
6	17,30	4,69	0,63	0,6-0,79	Levemente elongada

Realizado por: Andrea Salgado, 2023.

- **Sinuosidad del frente de montaña (Smf)**

El frente de montaña a lo largo de la falla Cumandá tiene un grado de sinuosidad bastante homogéneo con un promedio de 1,62, es decir, moderadamente activo. Los tramos 1, 2, 3, 8, 10 y 11 presentan una actividad alta, mientras que los tramos 4, 5, 6, 7 presentan actividad moderada (**figura 6, tabla 3**). Los tramos de la falla fueron divididos basados en los cambios de dirección de la traza.

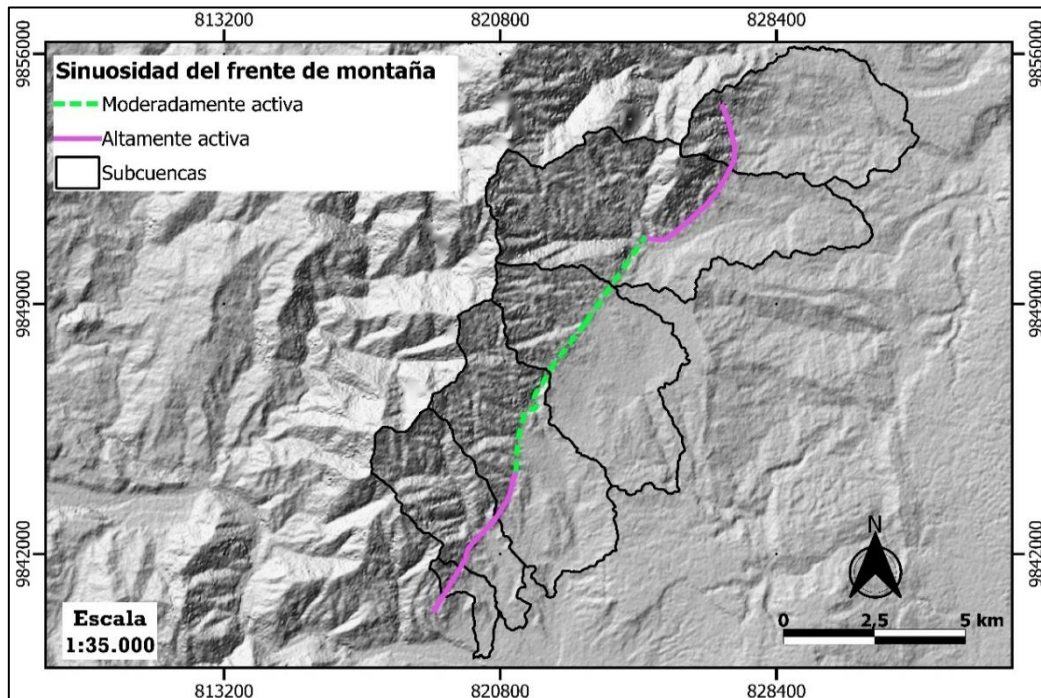


Figura 6. Mapa de sinuosidad del frente de montaña
Realizado por: Andrea Salgado, 2023

Tabla 3. Resultados de la caracterización de los 11 tramos de cada subcuenca través del índice SL

N° Subcuenca	TRAMO	Lmf (m)	Ls (m)	S_{mf}= Lmf/Ls	Rango	Resultado
1	1	2029,16	1663,97	1,22	1,0-1,5	Altamente activo
2	2	893,26	893,38	1,00	1,0-1,5	Altamente activo
2	3	2703,99	2006,73	1,35	1,0-1,5	Altamente activo
3	4	4631,77	1619,51	2,86	1,5-3	Moderadamente activo
3	5	1606,32	781,57	2,06	1,5-3	Moderadamente activo
4	6	5060,77	2504,30	2,02	1,5-3	Moderadamente activo
4-5	7	5688,42	2808,61	2,03	1,5-3	Moderadamente activo
5	8	5715,05	2551,32	2,24	1,5-3	Altamente activo
5	9	927,70	929,83	1,00	1,0-1,5	Altamente activo
6	10	790,90	745,78	1,06	1,0-1,5	Altamente activo
6	11	877,89	844,21	1,04	1,0-1,5	Altamente activo

Realizado por: Andrea Salgado, 2023.

- **Índice de Hack o Stream-length gradient (SL)**

En el mapa de SL-HCA de la *toolbox SLiX (Figura 7a)* se puede apreciar que las subcuencas de la 1 a la 4 presentan puntos calientes, o un agrupamiento de valores de SL anómalamente altos, a lo largo de la traza de la falla. Los valores que encuentran más alejados y que no tienen un agrupamiento significativo se descartan.

En la subcuenca 5 se aprecia un agrupamiento muy grande que no concuerda con la traza de la falla, mientras que la subcuenca 6 no presenta ningún punto caliente relevante.

Se utiliza el mapa de *knickpoints* (**Figura 7b**) para representar los valores de SL sobre un mapa de control litológico.

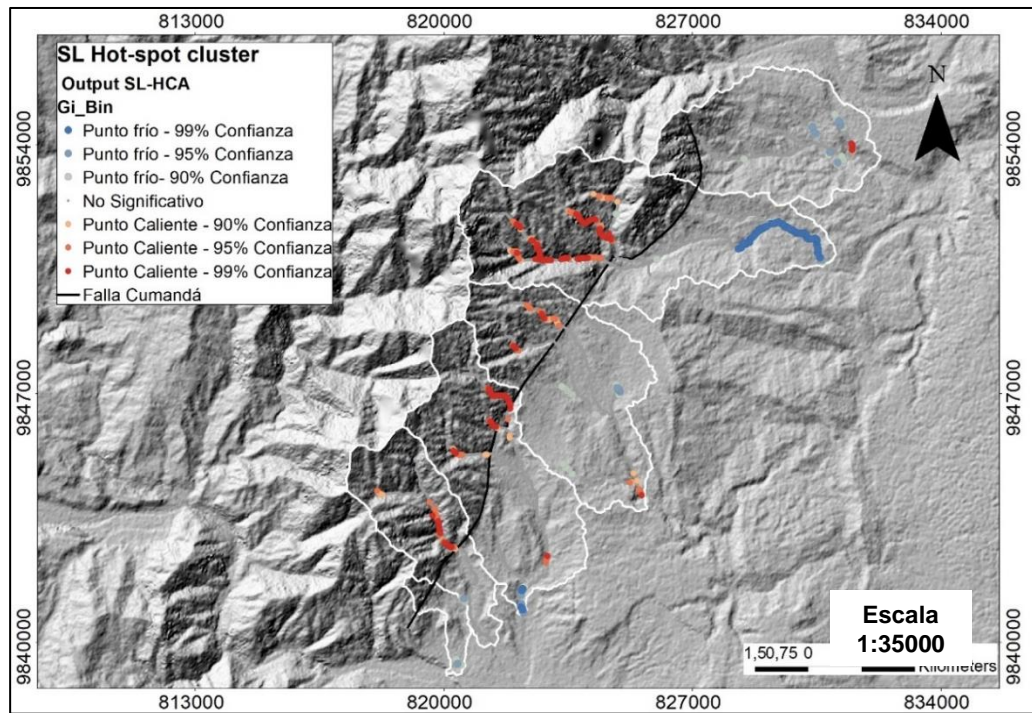


Figura 7a. Mapa de puntos calientes (Hotspot) y Cluster que muestra acumulaciones de valores SL anómalamente altos.
Realizado por: Andrea Salgado, 2023.

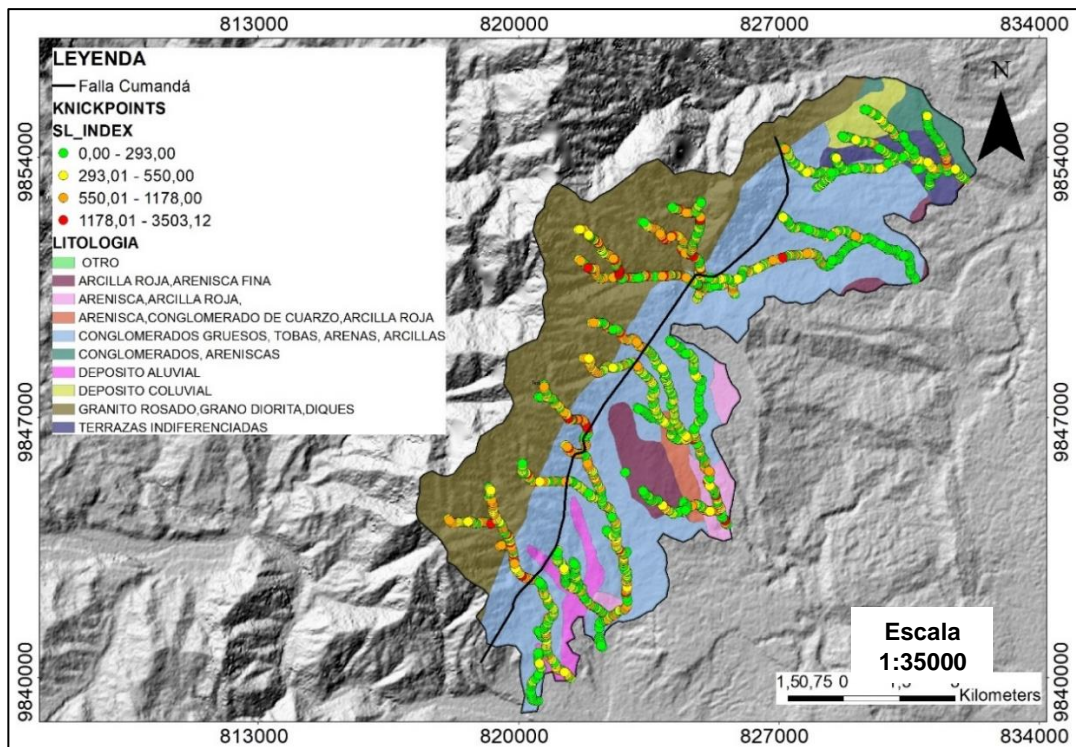


Figura 7b. Mapa de *knickpoints* sobre un mapa de control litológico modificado de: (Egúez et al., 2017)
Realizado por: Andrea Salgado, 2023.

DISCUSIÓN

Extensión y Cinemática de la Falla Cumandá

La red de drenaje en el área de estudio muestra varias corrientes desplazadas en los tramos más cercanos al río Pastaza. Las corrientes desplazadas son ampliamente usadas para identificar fallas transcurrentes (Li et al., 2021). El desplazamiento de los drenajes coincide con un movimiento dextral. Además, los mapas de sombras y topográficos indican facetas triangulares y trapezoidales, las cuales son características observadas frecuentemente en escarpes de fallas normales y de cabalgamiento (Wells et al., 1988; Bull, 2007). Se pudo estimar que la falla tiene una orientación NEN-SOS en su tramo principal, lo que la hace compatible con el sistema de fallas inversas encontradas en la zona Subandina (Baby et al., 2004). En base a los criterios mencionados se considera que la falla Cumandá exhibe características de una falla

inversa dextral, dando así por primera vez un componente horizontal a esta estructura. Por otro lado, se descubrió la presencia de un control estructural significativo en la subcuena 5, el cual coincide con el basculamiento opuesto de la misma. Este control estructural se hizo evidente al observar la fuerte asimetría existente en la subcuena y al analizar los valores anormalmente altos del índice SL. Estos hallazgos sugieren la posible presencia de una traza alterna de la falla en dicha área. La coincidencia entre el control estructural identificado y la marcada asimetría de la subcuena es un claro indicio de que la estructura subyacente ejerce influencia sobre la forma del paisaje (Azañón et al., 2012). Además, los valores altos de SL indican que el relieve en esta área en particular es más empinado o pronunciado (E. Keller & Pinter, 2001). Este patrón atípico podría ser consecuencia de la interacción de la falla y el proceso de erosión.

Neotectónica Espacial de la Falla Cumandá

La tectónica ha tenido gran influencia en la forma y evolución de las subcuenas 2, 3 y 5, las cuales presentan una fuerte asimetría, elongación, valores bajos de Smf y un agrupamiento anormalmente alto del índice SL. La actividad de la falla sobre estas subcuenas puede haber generado una estructura lineal en el frente de montaña (Bull & McFadden, 1980), deformando las subcuenas y alargándolas (Ahmad et al., 2018), además de acelerar el proceso erosivo en los cursos de agua en los drenajes dentro de ellas. Por otro lado, los basculamientos de las subcuenas 2 y 3 coinciden con el rumbo de la falla (NEN), mientras que la subcuena 5 presenta un basculamiento opuesto (SOS), posiblemente originado por control estructural que también se relaciona a la traza alterna. La presencia de evidencias morfotectónicas en las subcuenas 2 y 5 corroboran el dominio tectónico sobre estas subcuenas.

Las subcuenas 4 y 6, a diferencia del resto de las subcuenas, presentan simetría y asimetría leve respectivamente, esto indica que la actividad tectónica asociada a la falla no es uniforme en todas las subcuenas. Es probable que estas subcuenas estén experimentando una menor actividad tectónica o que la falla no este afectando significativamente la configuración de las subcuenas. Así mismo, que estas subcuenas no presenten valores altos de índice SL en ellas puede sugerir que la actividad tectónica en estas zonas es menor que en las demás.

A pesar de que los resultados se encuentran en el contacto de una zona granítica, al comparar los valores de todos los índices se infiere que estos tienen que ver con

deformación tectónica, además, al tener una unidad litológica homogénea, cualquier anomalía en los valores de SL sería interpretada como resultado de actividad tectónica (Toural Dapoza & Moreiras, 2017). El claro contraste entre la actividad de las subcuencas exhibe una tectónica heterogénea a lo largo de la traza.

Finalmente, se puede inferir que la falla presenta mayor actividad tectónica en los extremos norte (basculamiento SOS) y sur (basculamiento NEN), mientras que muestra una actividad menor (sin basculamiento) en la porción central. Esto indica un movimiento diferencial vertical en la falla, es decir, un levantamiento en los extremos de esta estructura y quizás solo presente esfuerzos horizontales en la zona central.

Utilidad de los Índices geomorfológicos

La falla de Cumandá se encuentra en una zona conocida como piedemonte Subandino (Bès de Berc et al., 2005) , la cual cuenta con una densa vegetación. Esta abundante vegetación dificulta la observación directa de los fenómenos tectónicos asociados con la falla. Además, la falta de estaciones sísmicas cercanas (IGEPN, 2023b) complica el monitoreo y la evaluación precisa de su actividad tectónica.

Por otro lado, la caracterización de las fallas tectónicas proporciona información esencial para la evaluación de peligro sísmico en una zona determinada (U.S. Geological Survey, 2023). Así, la caracterización de la actividad tectónica de la falla Cumandá es un factor principal en el modelamiento de futuros estudios de peligrosidad sísmica en el país.

Los índices geomorfológicos resultan valiosos para cuantificar de forma remota la actividad tectónica en la falla de Cumandá. Estos índices permiten realizar estimaciones y análisis basados en la forma y topografía del terreno, sin requerir observación directa. De esta manera, se obtiene información relevante sin tener que superar las dificultades causadas por la densa vegetación y la escasez de estaciones sísmicas en la zona.

CONCLUSIÓN

El análisis morfométrico de las subcuencas a través de índices geomorfológicas provee de datos cuantificables para mejorar el entendimiento de la neotectónica de la falla Cumandá que a su vez ayudará a la evaluación del ordenamiento territorial de la zona. Las evidencias morfotectónicas revelan una nueva traza de la falla Cumandá, con una longitud aproximada de 17,8 km, y se otorga por primera vez un componente horizontal a la falla, movimiento dextral, clasificándola como una falla inversa dextral. Los índices geomorfológicos revelaron que la falla Cumandá posee una actividad heterogénea a lo largo de la traza. Las subcuencas 4 y 6 mostraron la menor actividad, con una leve asimetría y elongación, y a pesar de tener resultados bajos del índice Smf, no se encontraron valores anormalmente altos significativos de SL en ellas. Las subcuencas 2, 3 y 5 exhibieron una fuerte actividad tectónica, evidenciada por bajos valores de índice AF, Re y Smf, así como una concentración significativa de valores anormalmente altos de índice SL.

Los estudios paleosísmicos en la falla Cumandá podrán determinar la frecuencia, magnitud y la recurrencia de movimientos tectónicos alrededor de ella, lo que permitirá comprender la actividad sísmica pasada y presente en esta estructura geológica.

BIBLIOGRAFÍA

- Ahmad, S., Alam, A., Ahmad, B., Afzal, A., Bhat, M. I., Sultan Bhat, M., & Farooq Ahmad, H. (2018). Tectono-geomorphic indices of the Erin basin, NE Kashmir valley, India. *Journal of Asian Earth Sciences*, 151, 16–30. <https://doi.org/10.1016/J.JSEAES.2017.10.013>
- Azañón, J. M., Pérez-Peña, J. V., Giaconia, F., Booth-Rea, G., Martínez-Martínez, J. M., & Rodríguez-Peces, M. J. (2012). Active tectonics in the central and eastern Betic Cordillera through morphotectonic analysis: the case of Sierra Nevada and Sierra Alhamilla. *Journal of Iberian Geology*, 38(1). https://doi.org/10.5209/rev_JIGE.2012.v38.n1.39214
- Baby, P., Rivadeneira, M., & Barragán, R. (2004). *La Cuenca Oriente: Geología y petróleo* (P. Baby, M. Rivadeneira, & R. Barragán, Eds.). Institut français d'études andines. <https://doi.org/10.4000/books.ifea.2971>
- Baby, P., Rivadeneira, M., Bernal, C., Christophoul, F., Davila, C., Galarraga, M., Marocco, R., Valdez, A., Vega, J., & Barragán, R. (1998). Structural style and timing of hydrocarbon entrapments in the Ecuadorian Oriente Basin. American association of Petroleum geologist, Annual Meeting, Rio de Janeiro, Brazil. *American Association of Petroleum Geologist*.
- Balkwill, H. R., Rodrigue, G., Paredes, F. I., & Almeida, J. P. (1995). Northern Part of Oriente Basin, Ecuador. Reflection Seismic Expression of Structures. In *Petroleum Basins of South America*. American Association of Petroleum Geologists. <https://doi.org/10.1306/M62593C29>
- Beauval, C., Yepes, H., Palacios, P., Segovia, M., Alvarado, A., Font, Y., Aguilar, J., Troncoso, L., & Vaca, S. (2013). An Earthquake Catalog for Seismic Hazard Assessment in Ecuador. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 103(2A), 773–786. <https://doi.org/10.1785/0120120270>
- Bernal, C., Christophoul, F., Soula, J.-C., Darrozes, J., Bourrel, L., Laraque, A., Burgos, J., Bès de Berc, S., & Baby, P. (2012). Gradual diversions of the Rio Pastaza in the Ecuadorian piedmont of the Andes from 1906 to 2008: role of tectonics, alluvial fan aggradation, and ENSO events. *International Journal of Earth Sciences*, 101(7), 1913–1928. <https://doi.org/10.1007/s00531-012-0752-9>
- Bès de Berc, S. (2003). *Tectonique de chevauchement, surrection et incision fluviale (exemple de la zone subandine équatorienne, haut bassin amazonien)*. University of Toulouse.
- Bès de Berc, S., Soula, J. C., Baby, P., Souris, M., Christophoul, F., & Rosero, J. (2005). Geomorphic evidence of active deformation and uplift in a modern continental wedge-top–foredeep transition: Example of the eastern Ecuadorian Andes. *Tectonophysics*, 399(1–4), 351–380. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2004.12.030>
- Brush, L., & Wolman, G. (1960). Knickpoint Behavior in noncohesive material: A laboratory study. *GSA Bulletin*, 71(1), 59–74. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1960\)71\[59:KBINMA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1960)71[59:KBINMA]2.0.CO;2)
- Bull, W. B. (2007). *Tectonic Geomorphology of Mountains: A New Approach to Paleoseismology* (1st ed.). Wiley-Blackwell.
- Bull, W. B., & McFadden, L. D. (1980). Tectonic Geomorphology North and South of the Garlock Fault, California. In *Geomorphology in Arid Regions*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780429299230-5>

- Castillo, M., & Lugo-Hubp, J. (2011). Estado actual del conocimiento, clasificación y propuesta de inclusión del término knickpoint en el léxico geológico-geomorfológico del español. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 63(2), 353–364. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=94321479015>
- Chatelain, J.-L., Tucker, B., Guillier, B., Kaneko, F., Yepes, H., Fernandez, J., Valverde, J., Hoefer, G., Souris, M., Dupérier, E., Yamada, T., Bustamante, G., & Villacis, C. (1999). Earthquake risk management pilot project in Quito, Ecuador. *GeoJournal*, 49, 185–196. <https://doi.org/10.1023/A:1007079403225>
- Chlieh, M., Mothes, P. A., Nocquet, J.-M., Jarrin, P., Charvis, P., Cisneros, D., Font, Y., Collot, J.-Y., Villegas-Lanza, J.-C., Rolandone, F., Vallée, M., Regnier, M., Segovia, M., Martin, X., & Yepes, H. (2014). Distribution of discrete seismic asperities and aseismic slip along the Ecuadorian megathrust. *Earth and Planetary Science Letters*, 400, 292–301. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.05.027>
- Christophoul, F., Baby, P., & Dávila, C. (1999). *Descrimination of eustatic and tectonic influences in the Ecuadorian Oriente Basin from Aptian to Oligocene times.*
- Christophoul, F., Baby, P., Soula, J. C., Rosero, M., & Burgos, J. (2002). Les ensembles fluviatiles néogènes du bassin subandin d'Équateur et implications dynamiques. *Comptes Rendus Geoscience*, 334(14), 1029–1037. [https://doi.org/10.1016/S1631-0713\(02\)01825-4](https://doi.org/10.1016/S1631-0713(02)01825-4)
- Costa, C., Alvarado, A., Audemard, F., Audin, L., Benavente, C., Bezerra, F. H., Cembrano, J., González, G., López, M., Minaya, E., Santibañez, I., Garcia, J., Arcila, M., Pagani, M., Pérez, I., Delgado, F., Paolini, M., & Garro, H. (2020). Hazardous faults of South America; compilation and overview. *Journal of South American Earth Sciences*, 104, 102837. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102837>
- Cox, R. T. (1994). Analysis of drainage-basin symmetry as a rapid technique to identify areas of possible Quaternary tilt-block tectonics: An example from the Mississippi Embayment. *Geological Society of America Bulletin*, 106(5), 571. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1994\)106<0571:AODBSA>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1994)106<0571:AODBSA>2.3.CO;2)
- Delfaud, J., Sabrier, R., Baudino, R., Lavenu, A., & Marocco, R. (1999). Reconstitution des etapes de la surrection des Andes d'Equateur a partir de l'interpretation des mineraux argileux contenus dans les bassins intramontagneux (Miocene a actuel). *Bulletin de La Société Géologique de France*, 170(1), 13–23.
- Egüez, A., Alvarado, A., Yepes, H., Machette, N. M., Costa, C., & Dart, L. D. (2003). *Database and Map of Quaternary faults and folds of Ecuador and its offshore regions.* <https://pubs.usgs.gov/of/2003/ofr-03-289/OFr-03-289-text.pdf>
- Egüez, A., Gaona, M., & Albán, A. (2017). *Mapa Geológico del Ecuador. Escala 1: 1 000 000.* Instituto de Investigación Geológico y Energético.
- Gao, M., Zeilinger, G., Xu, X., Wang, Q., & Hao, M. (2013). DEM and GIS analysis of geomorphic indices for evaluating recent uplift of the northeastern margin of the Tibetan Plateau, China. *Geomorphology*, 190, 61–72. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.02.008>

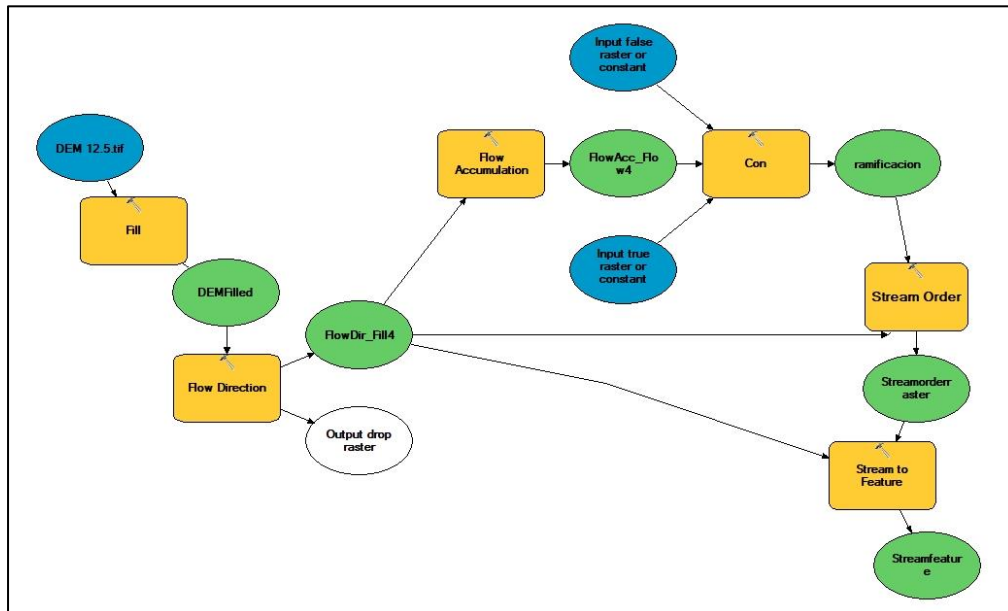
- Goossens, P. (1969). The Geology of Ecuador. In *Annales de la Société géologique de Belgique*.
- Goudie, A. (Ed.). (2003). *Encyclopedia of Geomorphology*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203381137>
- Guarderas, F., & Egüez, A. (2019). Geomorfología aplicada a la tectónica activa en la cuenca del río Nangaritza. *GEO Latitud*, 2(1).
- Hack, J. T. (1973). Stream-profile analysis and stream-gradient index. *Journal of Research of the U.S. Geological Survey*, 1(4), 421–429. <http://pubs.er.usgs.gov/publication/70161653>
- Hungerbühler, D., Steinmann, M., Winkler, W., Seward, D., Egüez, A., Peterson, D. E., Helg, U., & Hammer, C. (2002). Neogene stratigraphy and Andean geodynamics of southern Ecuador. *Earth-Science Reviews*, 57(1–2), 75–124. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(01\)00071-X](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(01)00071-X)
- Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IGEPN). (2023a). *Catálogo Homogeneizado 1900-2009*. <https://www.igepn.edu.ec/catalogos-sismicos/formulario-catalogos-sismicos>
- Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IGEPN). (2023b). *RED NACIONAL DE SISMÓGRAFOS (RENSIG)*. <https://www.igepn.edu.ec/red-nacional-de-sismografos>
- Keller, E. A. (1986). Investigation of Active Tectonics: Use of Surficial Earth Processes. In *Active Tectonics*. National Academy Press.
- Keller, E., & Pinter, N. (2001). *Active Tectonics: Earthquakes, Uplift, and Landscape* (2nd ed.). Pearson.
- Li, Y., Liu, M., Zhang, H., & Shi, Y. (2021). Stream channel offsets along strike-slip faults: Interaction between fault slip and surface processes. *Geomorphology*, 394, 107965. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107965>
- MAGAP-PRAT, & SIGTIERRAS. (2015). *Memoria Técnica Geomorfología Mera*.
- Marconato, L., Audin, L., Harrichhausen, N., Nocquet, J., Jarrin, P., & Rolandone, F. (2023). *Can we observe North Andean Sliver motion using long InSAR time-series analysis?*
- Marocco, R., & Winter, T. (1997). Bosquejo de la evolución geodinámica del Ecuador. In *Geografía básica del Ecuador: 4. Geografía física: 1. Las condiciones del medio natural: los paisajes naturales del Ecuador* (pp. 15–52). CEDIG ; IPGH. <https://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:010022382>
- Nocquet, J.-M., Villegas-Lanza, J. C., Chlieh, M., Mothes, P. A., Rolandone, F., Jarrin, P., Cisneros, D., Alvarado, A., Audin, L., Bondoux, F., Martin, X., Font, Y., Régnier, M., Vallée, M., Tran, T., Beauval, C., Maguiña Mendoza, J. M., Martínez, W., Tavera, H., & Yepes, H. (2014). Motion of continental slivers and creeping subduction in the northern Andes. *Nature Geoscience*, 7(4), 287–291. <https://doi.org/10.1038/ngeo2099>
- Núñez del Arco, A. E. (2003). *Geología del Ecuador* (1st ed.). Cámara Ecuatoriana del Libro - Núcleo de Pichincha.
- Pedraza, A., Pérez-Peña, J. V., Galindo-Zaldívar, J., Azañón, J. M., & Azor, A. (2009). Testing the sensitivity of geomorphic indices in areas of low-rate active folding (eastern Betic Cordillera, Spain). *Geomorphology*, 105(3–4), 218–231. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.09.026>

- Piacentini, D., Troiani, F., Servizi, T., Nesci, O., & Veneri, F. (2020). SLiX: A GIS Toolbox to Support Along-Stream Knickzones Detection through the Computation and Mapping of the Stream Length-Gradient (SL) Index. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(2), 69. <https://doi.org/10.3390/ijgi9020069>
- Ruiz, G., Seward, D., Winkler, W., & Spinkings, R. (2002). Detrital provenance and exhumation in the ecuadorian Sub-andean zone: A key region leading to the understanding of Andean geodynamics, Extended Abstract. *ISAG*.
- Schumm, S. A. (1986). *Active Tectonics and Alluvial Rivers*.
- Spinkings, R. A., Seward, D., Winkler, W., & Ruiz, G. M. (2000). Low-temperature thermochronology of the northern Cordillera Real, Ecuador: Tectonic insights from zircon and apatite fission track analysis. *Tectonics*, 19(4), 649–668. <https://doi.org/10.1029/2000TC900010>
- Toural Dapoza, R., & Moreiras, S. (2017). *Aplicación de índices geomorfológicos en el piedemonte neotectónicamente activo de Mendoza (32° S)*. 42, 45–63.
- U.S. Geological Survey. (2023). *Faults* . <https://www.usgs.gov/programs/earthquake-hazards/faults>
- Wells, S. G., Bullard, T. F., Menges, C. M., Drake, P. G., Karas, P. A., Kelson, K. I., Ritter, J. B., & Wesling, J. R. (1988). Regional variations in tectonic geomorphology along a segmented convergent plate boundary pacific coast of Costa Rica. *Geomorphology*, 1(3), 239–265. [https://doi.org/10.1016/0169-555X\(88\)90016-5](https://doi.org/10.1016/0169-555X(88)90016-5)

APÉNDICE

Apéndice A. Extracción de la red de drenaje

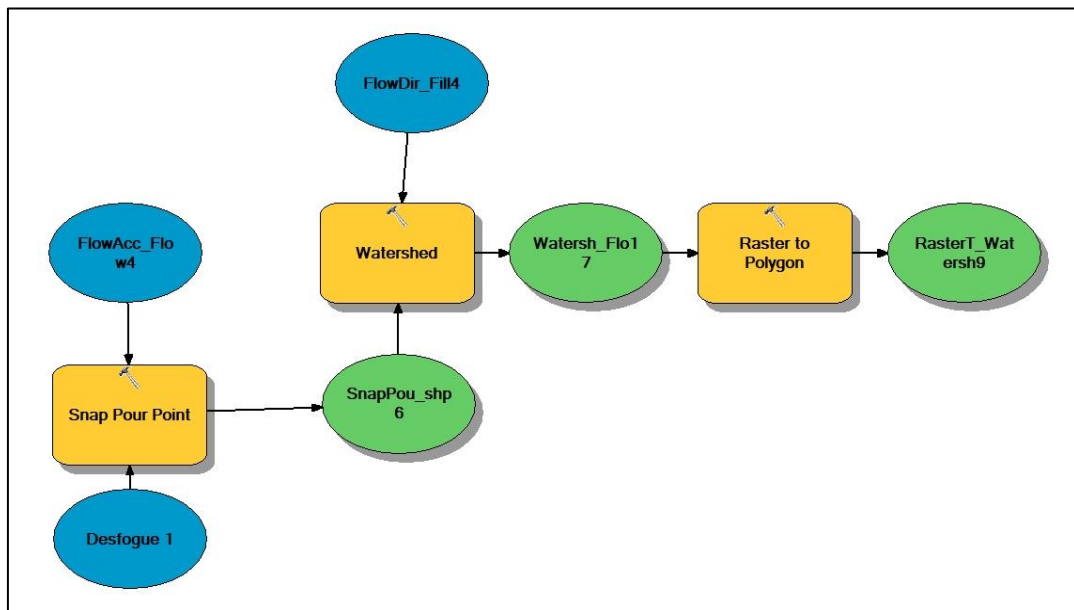
Se creó un *model builder* para la extracción de la red de drenaje en el software ArcMap. Luego, se usó el raster del DEM como base para la corrección de los espacios sin información o vacíos, seguido del cálculo de la dirección y acumulación de flujo. Se crearon las ramificaciones de la red usando *conditional* y posteriormente se utilizó *Stream Order* para asignar un orden numérico a los segmentos del raster a través del método de Strahler. Por último, se obtuvo un ráster con la red de drenaje y se lo convirtió en un archivo vectorizado a través de la herramienta *Stream to feature*.



Apéndice A. Model builder para la extracción de la red de drenaje
Realizado por: Andrea Salgado

Apéndice B. Extracción de las subcuencas que atraviesan la falla

Se asignaron puntos de desfogue en los drenajes con mayor densidad que atraviesan la Falla Cumandá, y con la capa *Flow accumulation* se alinearon los puntos a la celda de acumulación de flujo más alta con la herramienta *Snap Pour Point*. Posteriormente, se usó la capa de Flow direction para extraer la subcuenca de drenaje y se convirtió el archivo raster en un polígono mediante la herramienta *Raster to Polygon*. El proceso se repitió para determinar cada una de las subcuencas.



Apéndice B. Model builder para la extracción de las subcuencas de drenaje.
Realizado por: Andrea Salgado

Apéndice C. Índice de asimetría de la cuenca de drenaje AF

Luego de delimitar cada las seis subcuencas, se calcularon áreas totales y se delineó el río principal de cada una. Después, se calculó el área del lado derecho y se convirtieron los polígonos de las subcuencas en líneas a través de la herramienta *polygon to line*. Posteriormente, se fusionaron los archivos de líneas de subcuencas y los ríos empleando *Merge* de la caja de geoprocetos. Se transformó el archivo fusionado nuevamente en un archivo de polígono con la herramienta *feature to polygon*. Finalmente, se utilizó *Calculate geometry* para añadir un nuevo campo en la tabla de atributos que muestre el área de cada lado de las subcuencas.

Apéndice D. Índice de radios de elongación (Re)

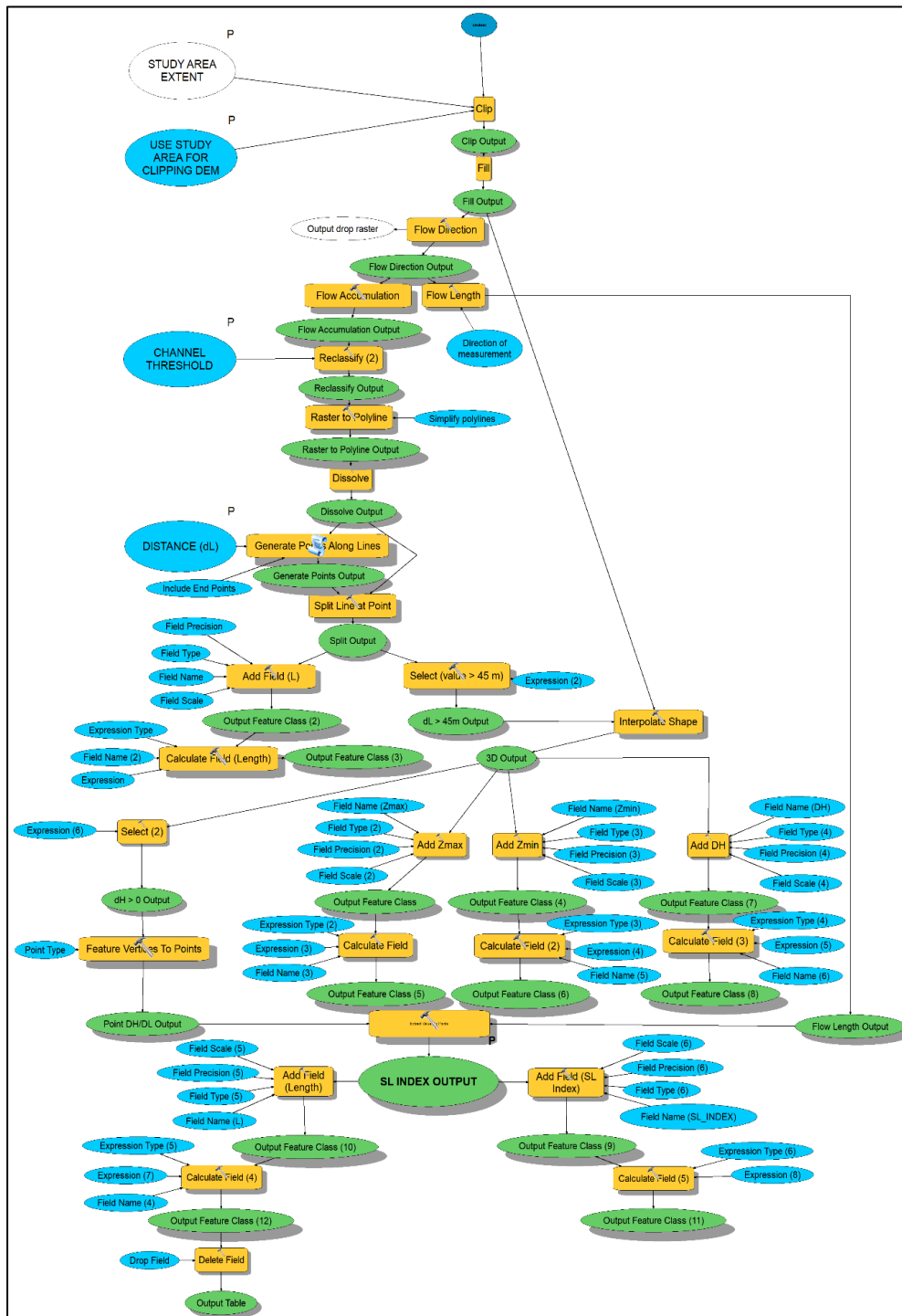
La herramienta *Calculate geometry* calculó el área (A) de cada una de las 6 subcuencas en la tabla de atributos y se usaron las longitudes de los ríos principales para obtener la máxima longitud de las subcuencas (L).

Apéndice E. Índice de sinuosidad de frente de montaña

Se diseñó un mapa de pendientes para calcular la sinuosidad de frente montaña usando el Modelo de elevación digital (DEM) y la herramienta Slope en el software ArcGis. Después, se reclasificó por porcentaje el mapa de pendientes con un rango de 0-35% para pendientes bajas a medias y >35% para pendientes altas. Además, se transformó el ráster de pendientes a polígono usando raster to polygon y se analizaron sistemas fluviales en deposición con la finalidad de delinear el frente de montaña o Lmf.

Apéndice F. Índice de Hack o Stream Length Gradient (SL)

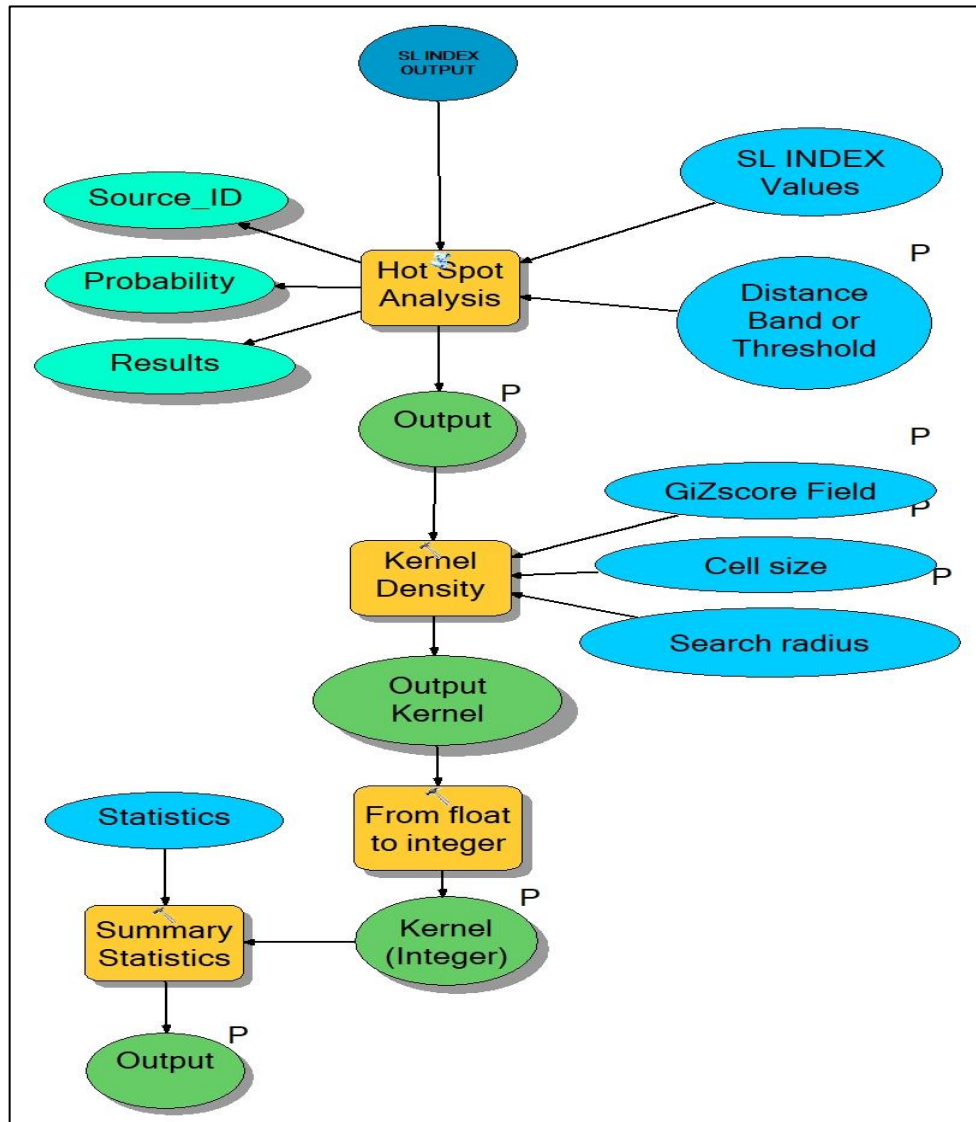
Los valores de SL se obtuvieron automáticamente con un DEM mediante la toolbox *SLiX* diseñada por Piacentini et al. (2020) en el software Arcgis. En este caso, se utilizaron los modelos *SLiX* y *SL-HCA* contenidos toolbox *SLiX*. *SLiX* permitió derivar automáticamente valores del índice SL en un shapefile de puntos a partir de datos DEM. El modelo generó 2 archivos que incluyeron la red de drenaje y los valores de SL clasificados mediante el criterio de cuartil.



Apéndice F. Modelo de SLiX, del cual se obtienen la red de drenaje y valores de SL sin clasificar.

Fuente: (Piacentini et al., 2020)

Posteriormente, se usó el modelo SL-HCA, que permitió visualizar los valores de SL anómalamente altos a través de un mapa de Hot-spot and cluster (HCA), basado en la estadística Getis-Ord Gi.



Apéndice G. Modelo SL-HCA, mapa de agrupamiento de puntos calientes (hot spots) anómalamente altos de SL y densidad de Kernel.

Fuente: (Piacentini et al., 2020)