



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

ESTUDIO DE ÍNDICES GEOMORFOLÓGICOS PARA LA
CARACTERIZACIÓN DE LA ACTIVIDAD NEOTECTÓNICA DE LA
FALLA LA MERCED DE JONDACHI EN EL PIEDEMONT
AMAZÓNICO, ECUADOR

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

AUTORA: MARÍA FERNANDA PUETATE PRECIADO
TUTOR: OSWALDO JOSÉ GUZMÁN GUTIÉRREZ

Napo – Ecuador
2024

DECLARACIÓN DE DERECHO DE AUTOR, AUTENTICIDAD Y RESPONSABILIDAD

Tena, 16 de febrero de 2024

De mi consideración:

Yo, María Fernanda Puetate Preciado con documento de identidad 2200516074, declaro que los resultados obtenidos en la investigación que presento en este documento final, previo a la obtención del título Ingeniera 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.

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

Atentamente,



María Fernanda Puetate Preciado

CI: 2200516074

AUTORIZACIÓN DE PUBLICIDAD EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Yo, María Fernanda Puetate Preciado, con documento de identidad N° 2200516074, en calidad de autora y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación: Estudio de índices geomorfológicos para la caracterización de la actividad neotectónica de la Falla La Merced de Jondachi en el piedemonte amazónico, 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, 16 de febrero de 2024



María Fernanda Puetate Preciado
2200516074

CERTIFICACIÓN DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Certifico que el Trabajo de Integración Curricular Titulado: Estudio de índices geomorfológicos para la caracterización de la actividad neotectónica de la Falla La Merced de Jondachi en el piedemonte amazónico, Ecuador, en la modalidad: artículo original, fue realizado por: María Fernanda Puetate Preciado, 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, 16 de febrero de 2024



Oswaldo José Guzmán Gutiérrez

C.I: 1759458613

AGRADECIMIENTO

A mis padres por darme la oportunidad de ir a estudiar en otra ciudad y ayudarme económicamente, a mis hermanas mayores que siempre me apoyaron para que siguiera estudiando, a mi hermana gemela que me acompañó durante mucho tiempo en la universidad, a mi amigo Daniel porque nos cuidó a mi hermana y a mi durante mucho tiempo en la universidad. A mis hermanos porque siempre me apoyaron con lo que podían. A mis amigos de la universidad que los considero como familia porque siempre me daban consejos para seguir y no rendirme cuando todo parecía ir mal, me animaban y hacían mis días más alegres. A mis profesores de geociencias que me apoyaron y me tomaron en cuenta, al profesor Moisés porque siempre confió en mí desde nivelación y me dio ánimos para seguir adelante.

DEDICATORIA

A mi mamá porque siempre me acompaño en todo momento desde pequeña siempre se dio el tiempo para ver por mi salud. A mi Hermana Marianela porque siempre estuvo apoyándome a pesar de todo los momentos malos. Y a mi tutor Oswaldo Guzmán por la paciencia y el tiempo dedicado para poder explicar mis dudas y porque es un excelente profesor que pone mucho empeño en enseñarnos y volver sus clases muy interesantes.

TABLA DE CONTENIDOS

DECLARACIÓN DE DERECHO DE AUTOR, AUTENTICIDAD Y RESPONSABILIDAD	ii
AUTORIZACIÓN DE PUBLICIDAD EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	iii
CERTIFICACIÓN DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	iv
AGRADECIMIENTO	v
DEDICATORIA.....	vi
ÍNDICE DE TABLAS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	x
RESUMEN.....	xi
ABSTRACT.....	xii
INTRODUCCIÓN.....	1
MARCO GEOLÓGICO.....	2
Localización del área.....	2
Geología del área	3
METODOLOGÍA	5
Cartografía de la Falla La Merced de Jondachi	7
Delimitación de la cuenca hidrográfica y definición de la red de drenajes.....	8
Índices geomorfológicos	8
Sinuosidad al frente montañoso (SMF)	9
Razón de Elongación	10
Asimetría de la cuenca del Drenaje	11
Índice de Hack.....	13
RESULTADOS.....	14
Cartografía de la Falla La Merced de Jondachi	14
Índice de sinuosidad del frente de montaña (SMF)	16

Razón de Elongación	17
Asimetría de la cuenca del drenaje.....	19
Índice de Hack.....	20
DISCUSIÓN.....	23
Cartografía y cinemática de la Falla La Merced de Jondachi	23
Análisis de los índices geomorfológicos.....	24
CONCLUSIONES	26
BIBLIOGRAFÍA	0

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resultados de la aplicación de sinuosidad.....	17
Tabla 2. Re de las 3 subcuencas de la falla “La Merced de Jondachi”	18
Tabla 3. Resultados de AF y AF normalizado de las 3 cuencas del área de estudio.....	19

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. Ubicación general y específica de la zona de estudio.....	3
FIGURA 2. Mapa geológico de la zona de estudio a escala 1:44000 (adaptado de Eguez et al. (2003)).	4
FIGURA 3. Diagrama de flujo secuencia de la metodología aplicada.....	5
FIGURA 4. Esquema de red de drenaje en Model Build.....	6
FIGURA 5. Esquema de la limitación de las cuencas hidrográficas en <i>Model Buid</i>	7
FIGURA 6. Método para calcular el SMF.....	9
FIGURA 7. Método para calcular el Re.....	11
FIGURA 8. Método para el cálculo del AF.....	12
FIGURA 9. Mapa de evidencia con marcadores morfológicos de la Falla La Merced de Jondachi	14
FIGURA 10. Mapa de evidencia de la presencia de tres subcuencas significativas y límites de los ríos que se trazan en la Falla La Merced de Jondachi.....	15
FIGURA 11. Ubicación espacial de 10 segmentos utilizados para el cálculo de SMF	16
FIGURA 12. Índice de circularidad de la Falla La Merced de Jondachi	18
FIGURA 13. Mapa de distribución de asimetría de las subcuencas de la Falla La Merced de Jondachi	20
FIGURA 14. Mapa de distribución del Índice de Hack de la Falla La Merced de Jondachi	21
FIGURA 15. Mapa de la densidad de Kernel de la Falla La Merced de Jondachi.....	22

RESUMEN

Con la finalidad de evaluar la actividad tectónica de la Falla La Merced de Jondachi ubicado al piedemonte amazónico de Ecuador, se realizó cuatro índices geomorfológicos (Radio de elongación - Re, Índice de Hack - SL, Asimetría de la cuenca - AF, Sinuosidad del frente montañoso - SMF) en el sector ubicado en la provincia de Napo, cantón Archidona, a partir del modelo digital de elevaciones en un ambiente SIG, se dibujó marcadores geomorfológicos para trazar donde se suscita la grieta. De ahí se identificó el recorrido de la abertura de 23,24 km. La cual, se soporta por facetas triangulares, abanicos aluviales; a su vez drenajes desplazados que ayudaron a identificar por primera vez el movimiento horizontal. Por lo tanto, se propone un movimiento transcurrete-inverso. Los resultados de los diferentes índices analizados indican que el conjunto de procesos es heterogéneo a lo largo de la exposición como acumulación de actividad tectónica activa, que se acumula hacia la parte Norte y Sur de la abertura.

Palabras clave: tectónica, índices geomorfológicos, propiedades de la corteza. desplazamiento, deformación

ABSTRACT

In order to evaluate the tectonic activity of the La Merced de Jondachi fault located in the Amazon foothills of Ecuador, four geomorphological indices were carried out (Elongation radius - Re, Hack Index - SL, Basin asymmetry - AF, Sinuosity of the front mountainous - SMF) in the sector located in the province of Napo, Archidona canton, based on the digital elevation model in a GIS environment, geomorphological markers were drawn to trace where the crack occurs. From there, the route of the 23.24 km opening was identified. Which is supported by triangular facets, alluvial fans; in turn displaced drainages that helped identify horizontal movement for the first time. Therefore, a transverse-inverse movement is proposed. The results of the different indices analyzed indicate that the set of processes is heterogeneous throughout the exposure as an accumulation of active tectonic activity, which accumulates towards the North and South part of the opening.

Keywords: tectonics, geomorphological indices, crustal properties. displacement, deformation

INTRODUCCIÓN

Más del 80% de los terremotos de alta magnitud se registran en los países que se encuentran ubicados en la Cordillera de los Andes (Salazar, 2018). La singularidad de tales eventos en la región se atribuye a la presencia de dinámicas geológicas marcadas por la subducción de la placa tectónica bajo otra y la presencia de volcanes activos (Ayala, 2022). En el caso de Ecuador, ubicado en la Cordillera de los Andes, ocasiona según Quinde y Reinoso (2016) varios sismos, donde se destaca como el más grande de la historia del país, el registrado en 1906, que alcanzó 8,8 Mw. En este contexto, el peligro sísmico se encuentra latente en el Ecuador, por dos fuentes: subducción y de tipo corticales.

En efecto, parte del territorio ecuatoriano se encuentra en una astilla conocida como bloque andino, que forma parte de la placa sudamericana, inmersa en una compleja interacción con las placas de Nazca, Cocos y Caribe (Taipe, 2013). Desde estos antecedentes, para Lavenu (2006) la convergencia de las placas tectónicas causa deformación en la corteza terrestre que tiene componente oblicuo. Tal condición entre las placas de Nazca y Sudamericana ocasiona distribución compleja de fallas en la superficie terrestre, dando lugar a diferentes tipos de grietas como las normales, inversas, transcurrentes o de desgarre, oblicuas y combinadas.

El principal sistema de fallas activas se observa a lo largo de los Andes denominado Chingual – Cosanga – Pallatanga – Puná (Alvarado et al., 2014). 1) La falla Chingual esta acoplada en la placa Suramericana. 2) Cosanga se ubica entre el bloque Nor-Andino y la zona Sub Andina, reporta un movimiento inverso. 3) La falla de Pallatanga se ubica en la parte sur oriental del bloque Nor-Andino, cruza el valle interandino de Ambato (Castro, 2021).

Una de las fallas geológicas activas que se evidencia es La Merced de Jondachi, se ubicada en las llanuras en los flancos orientales de la cordillera oriental de los Andes, se caracteriza por diversos tipos de movimientos, como fallas normales, inversas o transcurrentes (Yépez et al., 2022). Dichos movimientos causan deformaciones en la corteza terrestre, dando lugar a cambios en la topografía y la generación de sismicidad. Al respecto, los estudios sobre la Falla La Merced de Jondachi presentan contradicciones significativas. La investigación de Eguez et al. (2003) la integran a la

falla de Tena, el proyecto de Evaluación de Riesgos de América del Sur la reconoce como independiente, interpretándola como una falla inversa con incertidumbre (UNDRR, 2013). Aunque se informa sobre desplazamientos en los últimos 1.6 millones de años, la falta de datos detallados genera incertidumbre adicional sobre su cinemática y actividad.

De ahí, la importancia de realizar estudios de la actividad tectónica en la Falla La Merced de Jondachi para comprender el comportamiento, evaluar riesgos sísmicos para la prevención y mitigación. Con ello, surge la necesidad analizar la geomorfología que permite conocer el nivel de riesgo sísmico, como la posible amenaza a la población. En particular con indicadores geomorfológicos que desempeñan roles fundamentales en la caracterización de las actividades tectónicas, debido a la capacidad para observar rupturas, cambios en la topografía o desplazamiento (Toural y Moreiras, 2018).

En virtud de lo expuesto surge la presente investigación que tiene como objetivo analizar cuatro indicadores geomorfológicos para la caracterización de la actividad neotectónica de la Falla La Merced de Jondachi en el piedemonte amazónico, específicamente en las cercanías de la ciudad de Archidona.

MARCO GEOLÓGICO

Localización del área

La Falla La Merced de Jondachi se ubica en Ecuador, específicamente en la Provincia de Napo, cantón Archidona, en las cercanías de la ciudad de Archidona, como se muestra en la figura 1.

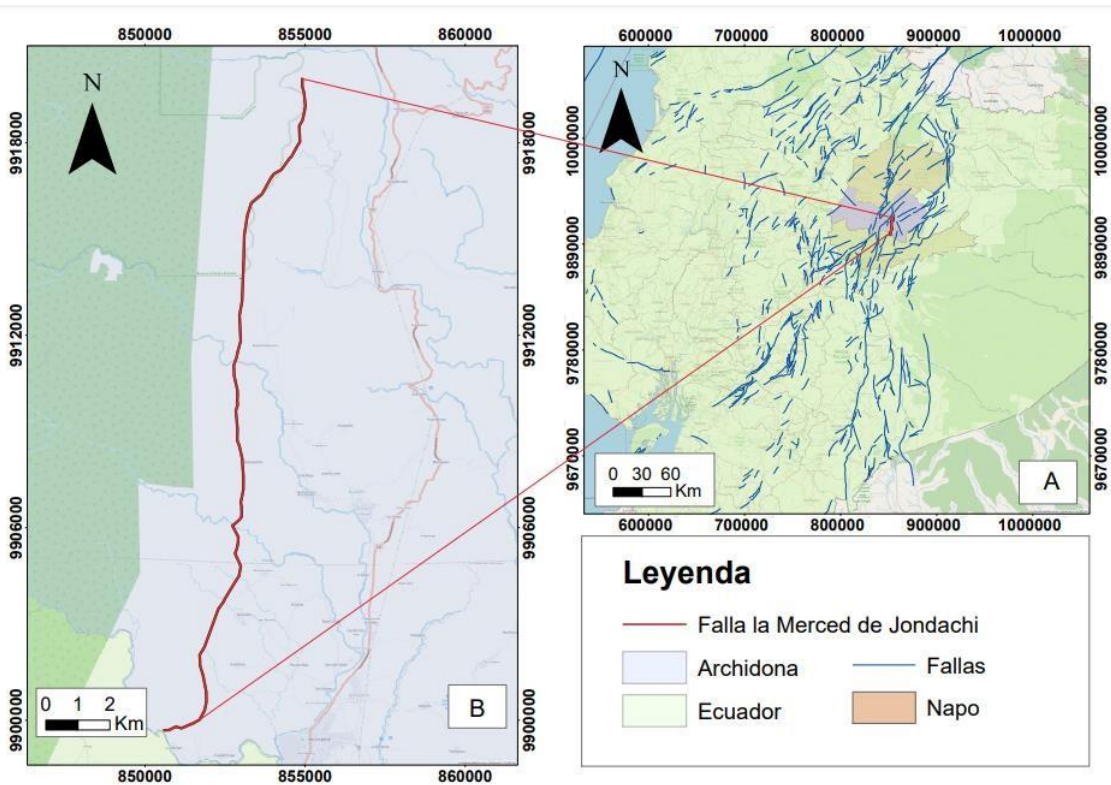


FIGURA 1. Ubicación general y específica de la zona de estudio. El mapa A esta a escala 1:1.000.000 y el B a 1:30.000.

Geología del área

La información geológica previa del área de estudio no se define con detalle. Algunas de las estructuras geológicas carecen de denominaciones formales en los informes anteriores y los mapas geológicos no establecen diferencias adecuadas entre algunas estructuras. Entre la que se distingue el levantamiento geológico de Nicolaide y Brito (1967) como se muestra:

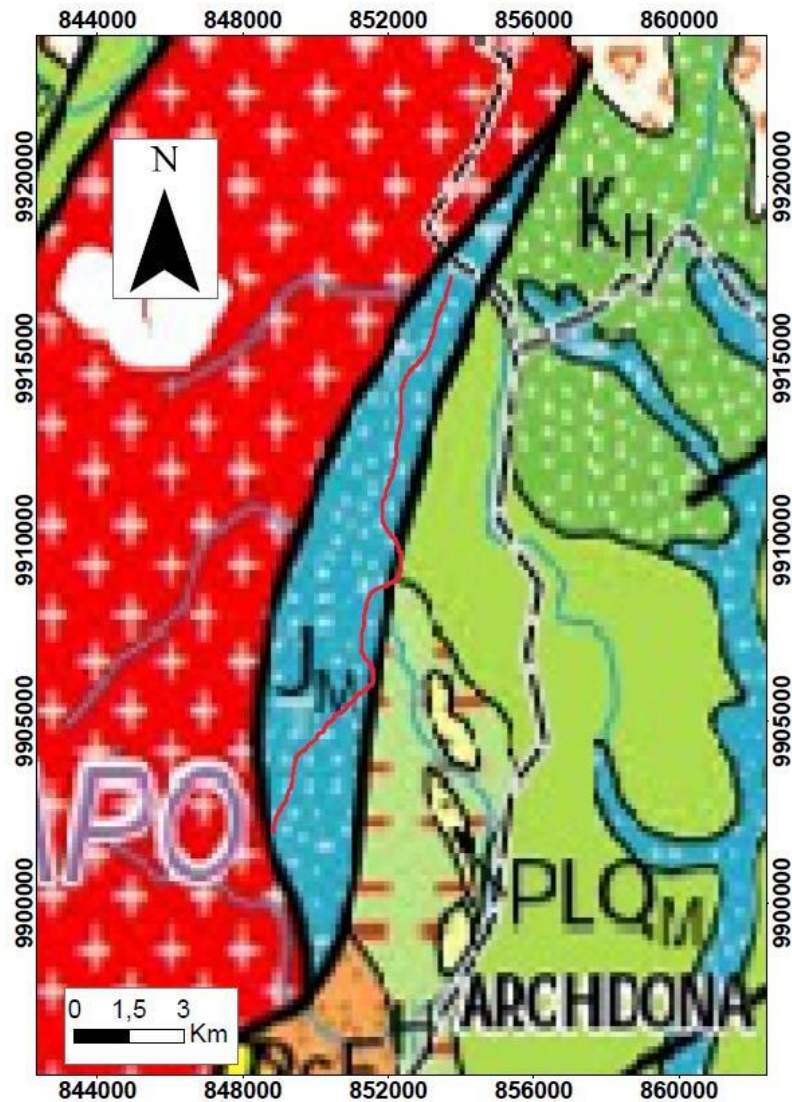


FIGURA 2. Mapa geológico de la zona de estudio a escala 1:44000 (adaptado de *Eguez et al. (2003)*).

La figura 2 muestra la geología predominante en la zona de estudio, destacando dos principales formaciones geológicas: la Formación Misahualli (Jm) y el granito de Abitagua (G) al oeste. Estas rocas abarcan desde el Jurásico hasta el Eoceno. La Formación Misahualli está compuesta por lavas, dacitas, brechas y tobas. En el suroeste, la Formación Misahualli se ve atravesada por rocas como el granito de Abitagua (G). Al noreste, se encuentra la Formación Hollín, caracterizada por areniscas y cuarcitas. Hacia el sur, la zona limita con la Formación Mera, que está compuesta por conglomerados, areniscas y volcanoclastos. Este análisis geológico proporciona una visión detallada de la diversidad litológica y cronológica de la región, evidenciando procesos geológicos y eventos que han modelado la configuración actual del área a lo largo de períodos geológicos significativos, desde el Jurásico hasta el Eoceno.

METODOLOGÍA

El desarrollo metodológico para el artículo contempló el análisis e interpretación de datos recolectados sobre la actividad tectónica cuaternaria de la Falla La Merced de Jondachi. Para ello se utilizó Sistemas de Información Geográfica (SIG) y los datos se obtuvieron de las siguientes fuentes:

- Modelo de elevación digital (DEM) con datos de resolución de 30 m (modelo SRTM)
- Fallas del Ecuador del proyecto de Evaluación de Riesgos de América del Sur (SARA, 2016) 1:15000
- Base topográfica de GIS 1:10000
- Mapa de geopedología del cantón Archidona. 1:50000

En este sentido el estudio cumplió ciertas fases de forma sistémica que llevo a cumplir el propósito planteado de la investigación. El que se detalla:

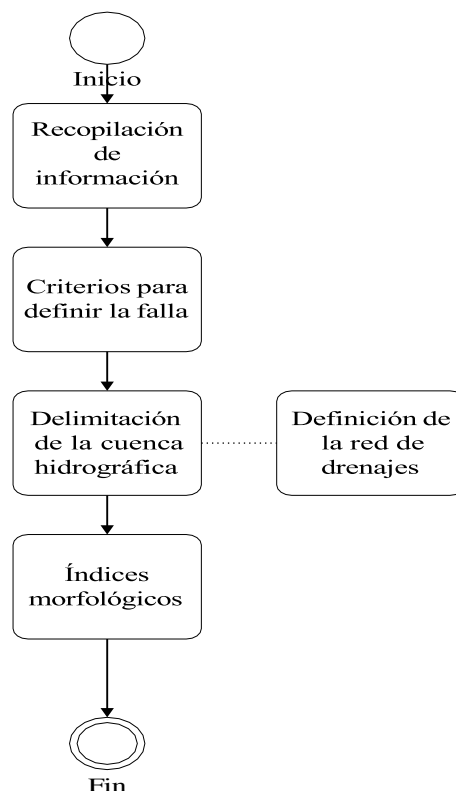


FIGURA 3. Diagrama de flujo secuencia de la metodología aplicada.

En la Figura 3 se describen los pasos seguidos de forma ordenada y que llevaron a la cartografía de la falla.

- **Recopilación de información**

Se recopiló información bibliográfica con base a investigaciones relacionadas a índices geomorfológicos en fallas. Para lo cual, se utilizó el modelo de elevación digital (DEM) con resolución de 30 m. Con base al tratamiento del DEM se cuantificó las características morfométricas derivadas de los sistemas de información geográficas.

- **Criterios para definir una falla**

Se consideró marcadores geomorfológicos como: facetas triangulares, drenajes desplazados, abánicos aluviales, *knipoints* entre otros, para definir y mapear la grieta objeto de estudio

- **Delimitación de la cuenca hidrográfica y definición de la red de drenajes**

Por medio de la caja de herramientas (*model build*), se estructuró el esquema (Figura 4) para modelar la red hídrica de la zona de estudio.

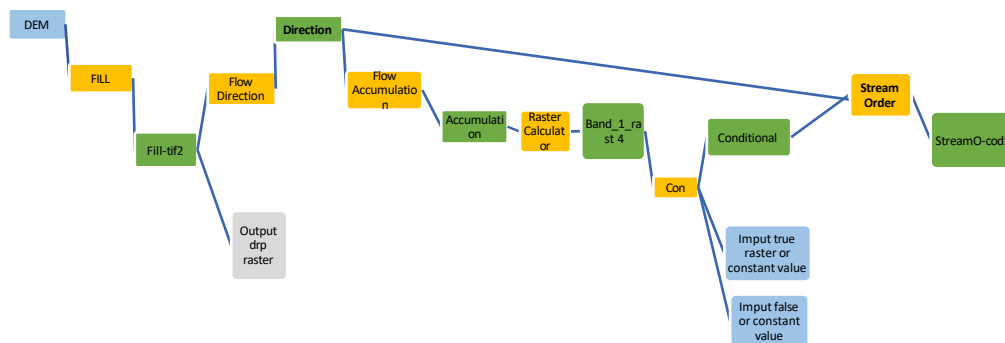


FIGURA 4. Esquema de red de drenaje en Model Build para la extracción de las subcuencas

Para extraer las subcuencas, con la red hídrica definida, se calcularon los puntos de fluidez y determinar el área, por la que, se distribuye como delimitan las cuencas conforme se establece en la Figura 5.

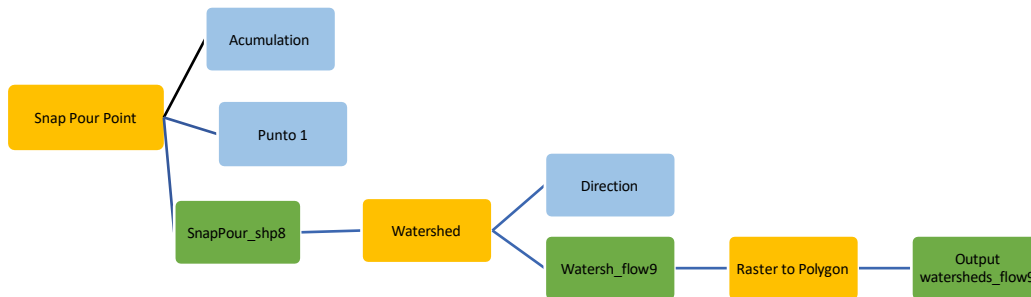


FIGURA 5. Esquema de la limitación de las cuencas hidrográficas en *Model Buid*.

Para evaluar el grado de actividad tectónica, se aplicó una serie de índices geomorfológicos o morfométricos, a través del SIG, como herramienta para estudio, análisis y manejo de datos. Las tres subcuencas identificadas se utilizaron para calcular cuatro índices geomorfológicos: sinuosidad de frente montañoso (SMF), radio de elongación (Re), asimetría de la cuenca (AF) y gradiente longitudinal o Hack (SL), donde las subcuencas de análisis fueron de la falla para arriba.

Cartografía de la Falla La Merced de Jondachi

La cartografía evidencia marcadores morfotectónicos, que son rasgos o características geomorfológicas en la superficie terrestre asociadas con procesos tectónicos o deformaciones en la corteza terrestre (Valdivia et al., 2014). Los estudios morfotectónicos proporcionan información importante sobre ciertos aspectos de la topografía, las que se generan como consecuencia de los desplazamientos en la superficie terrestre.

El análisis de la morfología del terreno aporta para comprender los efectos de estos movimientos, manifestados a través de cambios en la forma del paisaje y en la distribución de elevaciones. Para Ollarves y Audemard (2004) se observarán ciertas formas geológicas en el paisaje de acuerdo al patrón estructural predominante y la frecuencia de actividad de la falla. Estos autores diferencian dos tipos principales de fallas y características geomorfológicas asociadas. A continuación, se describan estos dos grupos:

- **Fallas con movimiento horizontal:** incluyen elementos como valles y cursos de agua alineados, cursos de agua desplazados de su curso original, depresiones de falla que contienen agua, crestas elevadas causadas por acumulación de material en el sentido del desplazamiento

- **Fallas con movimiento inclinado:** patrones distintos en la topografía y el drenaje, como cursos de agua suspendidos en la parte superior de las pendientes, triángulos visibles en la morfología, escarpes evidentes a lo largo de la línea de falla, y otros rasgos relacionados.

Con base a lo descrito en los párrafos anteriores, en el estudio se consideraron las características geomorfológicas observables en las imágenes satelitales (OpenTopomap) y en el DEM. Estas características, tales como sistemas fluviales desplazados y las facetas triangulares, fueron utilizadas para cartografiar la Falla La Merced de Jondachi. Se efectuó la digitalización en pantalla para mapear la traza de la Falla La Merced de Jondachi. También se realizó la capacidad de acercamiento y alejamiento en la pantalla para examinar diferentes escalas y niveles de detalle, permitiendo un análisis más detallado.

Delimitación de la cuenca hidrográfica y definición de la red de drenajes

Es importante mencionar que se desarrolló un modelo generador para extraer la red de drenaje a partir del archivo DEM. Primero se completó la información faltante en el DEM e interpoló con la herramienta Fill para estimar las alturas y corregir errores. De ahí, se identificó la red de drenaje enfocándose en localizar puntos donde las corrientes de agua se manifestaban y se ramificaban en diferentes direcciones. Por consiguiente, se determinó la cantidad de ramificaciones y la continuidad entre estas. Al final, se clasificó el orden de las corrientes aquí se aplicó el método de Strahler para la clasificación jerárquica de las corrientes, proporcionando así una ordenación estructurada de la red hidrográfica.

Por otra parte, para la extracción de las cuencas hidrográficas primero se ajustó la ubicación de los puntos de descarga de flujo de agua para que coincidan con la red de drenaje existente en la Falla La Merced de Jondachi. Segundo, se identificó las cuencas individuales.

Índices geomorfológicos

En el siguiente ítem se presentan los diferentes índices geomorfológicos que se utilizaran para el análisis de la actividad tectónica cuaternaria de la Falla La Merced de Jondachi:

Sinuosidad al frente montañoso (SMF)

- **Concepto**

Indicador planteado por Bull y McFadden (1977), quienes definen la sinuosidad como la proporción entre la longitud completa del tramo del frente y la longitud medida en línea recta paralela al mismo. De acuerdo con Keller y Pinter (2002) el índice indica el equilibrio entre las fuerzas de erosión que tienden a formar bahías en el frente de la montaña y el constante proceso de elevación que genera superficies planas en dicho frente.

- **Cálculo**

Para el cálculo se aplica la siguiente ecuación:

$$SMF = \frac{L_{mf}}{L_s} \quad \text{(Ecuación 1)}$$

Donde:

SMF: sinuosidad del frente de montaña,

Lmf: longitud de contacto montaña y piedemonte

Ls: longitud lineal paralela al frente de montaña

Conforme se muestra, se detalla el proceso para el cálculo y clasificación de SMF utilizado en el estudio:

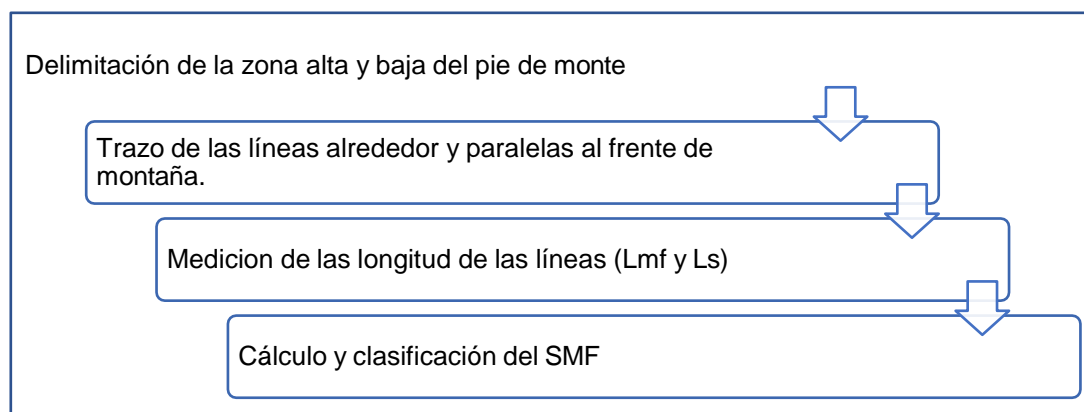


FIGURA 6. Método para calcular el SMF.

Se observa que para el cálculo y clasificación de SMF primero se desarrolló el mapa de pendientes, para diferenciar las zonas de relieves altos y bajos. Luego se trazó la línea representativa alrededor del frente de montaña. A continuación, se construyeron las líneas rectas paralelas al frente. Estas líneas rectas fueron construidas por cada tramo, donde cada tramo muestra el equilibrio de las fuerzas que erosionan y el proceso constante de elevación que genera superficies rectas en el frente de montaña. Finalmente se calculó el SMF para identificar las zonas con más actividad tectónica.

- **Interpretación**

Una vez calculado el índice, el valor se clasifica de acuerdo a las características establecidas por Bull y McFadden (1977), quienes indican que un frente montañoso recto, con SMF cercano a 1, sugiere que la región sufre una alta deformación activa, mientras que el frente con valores elevados de SMF por lo general se interpreta como una zona de tectónica inactiva.

Razón de Elongación

- **Concepto**

La Razón de Elongación (Re) fue planteada por Schumm (1956). Este autor considera la Re como el factor relevante de la deformación porque guarda estrecha conexión con la configuración de la cuenca. Se concibe como la proporción entre el diámetro del círculo que tiene el área equivalente a la cuenca y la longitud del cauce principal que la drena (Campo et al., 2012)

- **Cálculo**

La Re se calcula a través de la siguiente expresión:

$$Re = \frac{Rc}{L} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

Rc: diámetro del círculo que tiene la misma área que la cuenca

L: longitud del principio hasta el final del cauce principal de la cuenca.

Para el cálculo de la Re, en el estudio se consideró:

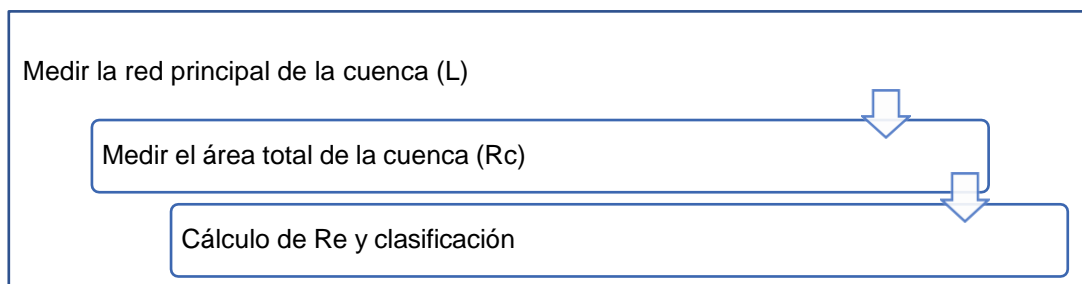


FIGURA 7. Método para calcular el Re.

Se muestra que el primer paso para el cálculo de Re implica la creación de polilíneas que corresponden a la red principal de las subcuencas, de ahí se procedió a calcular la distancia, también se determinó el área de cada subcuenca para luego cuantificar y determinar su forma.

- **Interpretación**

Una vez aplicado el índice, el valor se clasificó de acuerdo al criterio de Bhat et al. (2013), quien realizó categorizaciones de cuencas hidrográficas según la forma. Estas se clasifican en: circular si la Re es mayor a 0,90; ovalada si la Re está entre 0,80 - 0,90; en cambio es menos alargada si se encuentra entre 0,70 y 0,80 y alargada si es menor a 0,70. Por otra parte, la relación de elongación de la cuenca menor a 0,5 es característica de cuencas tectónicamente activas, mientras que valores entre 0,50 y 0,75 reflejan cuencas ligeramente activas; y valores mayores a 0,75 reflejan configuraciones de cuencas inactivas.

Asimetría de la cuenca del Drenaje

- **Concepto**

El factor de asimetría (AF) fue planteado por Hare y Gardner (1985) para evaluar cuencas hidrográficas y evidenciar si presenta inclinación tectónica. De acuerdo con Bhat et al. (2013) AF se utiliza cuando el espacio geográfico de análisis presenta terrazas no pareadas y sirve para identificar la inclinación en las cuencas.

- **Cálculo**

La AF se determina mediante la siguiente relación:

$$AF = 100 \left(\frac{Ar}{At} \right) \quad \text{(Ecuación 3)}$$

Donde:

Ar: es el área de la cuenca del lado derecho en dirección aguas abajo

At: es el área total de la cuenca.

En la figura 4 se muestra el proceso tomado en cuenta para calcular el valor de AF:

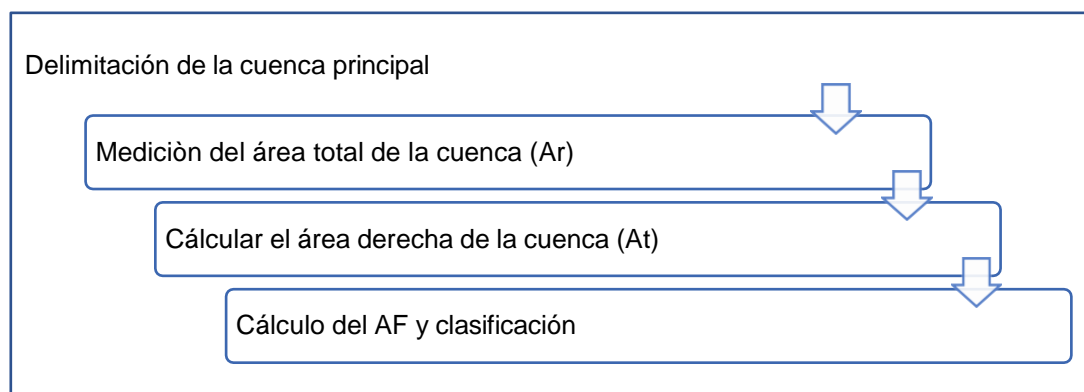


FIGURA 8. Método para el cálculo del AF.

Primero se delimitó el cause principal de las subcuencas que atraviesan la falla. Luego se calculó el área de lado derecho de una de las subcuencas y el área total, se repitió el proceso para todas las subcuencas. Para terminar, se calculó el factor de asimetría para detectar la inclinación de la subcuenca que indica movimiento tectónico reciente.

- **Interpretación**

La escala de la AF abarca valores comprendidos entre 0 y 100. Cuando los valores se encuentran cerca de 50, señala estabilidad tectónica. Sin embargo, valores superiores o inferiores sugieren inclinaciones hacia la izquierda o derecha, respectivamente (Cuéllar et al., 2014).

Índice de Hack

- **Concepto**

Establecida por Hack (1973) con el objetivo de identificar desequilibrios en el sistema fluvial, los que pueden asociarse a alteraciones en la composición de las rocas, o a las estructuras geológicas activas. El parámetro Índice de Hack (SL) resulta útil para determinar si el cambio en la pendiente de la corriente se origina por la resistencia de las rocas o a la deformación tectónica específica, en particular si involucra una componente vertical (Bhat et al., 2013).

- **Cálculo**

Se presenta la fórmula de cálculo del SL.

$$SL = \left(\frac{dh}{dl}\right) \times L \quad \text{(Ecuación 4)}$$

Donde

dh/dl: la pendiente o gradiente del canal de la corriente

dh: representa la disminución en la elevación

dl: es la longitud del tramo específico

L: es el largo total de la corriente de interés.

(Bhat et al., 2013)

Cabe mencionar que SL se calcula de forma automática en la caja de herramientas SlixX. El valor sirve para definir la densidad de Kernel (SL>400 Valor de la media, 100<SL<400 Valores adyacente superior, SL<100 Valores atípicos), a partir de los puntos SL se establece la correlación para identificar dónde se concentran o son más prominentes los puntos anómalos. Lo anterior se utiliza para identificar características geomorfológicas de interés, como zonas de fallas activas o áreas de rápida deformación.

RESULTADOS

Cartografía de la Falla La Merced de Jondachi.

La Falla La Merced de Jondachi se mapeo para evidenciar marcadores morfológicos, resultados que se muestran:

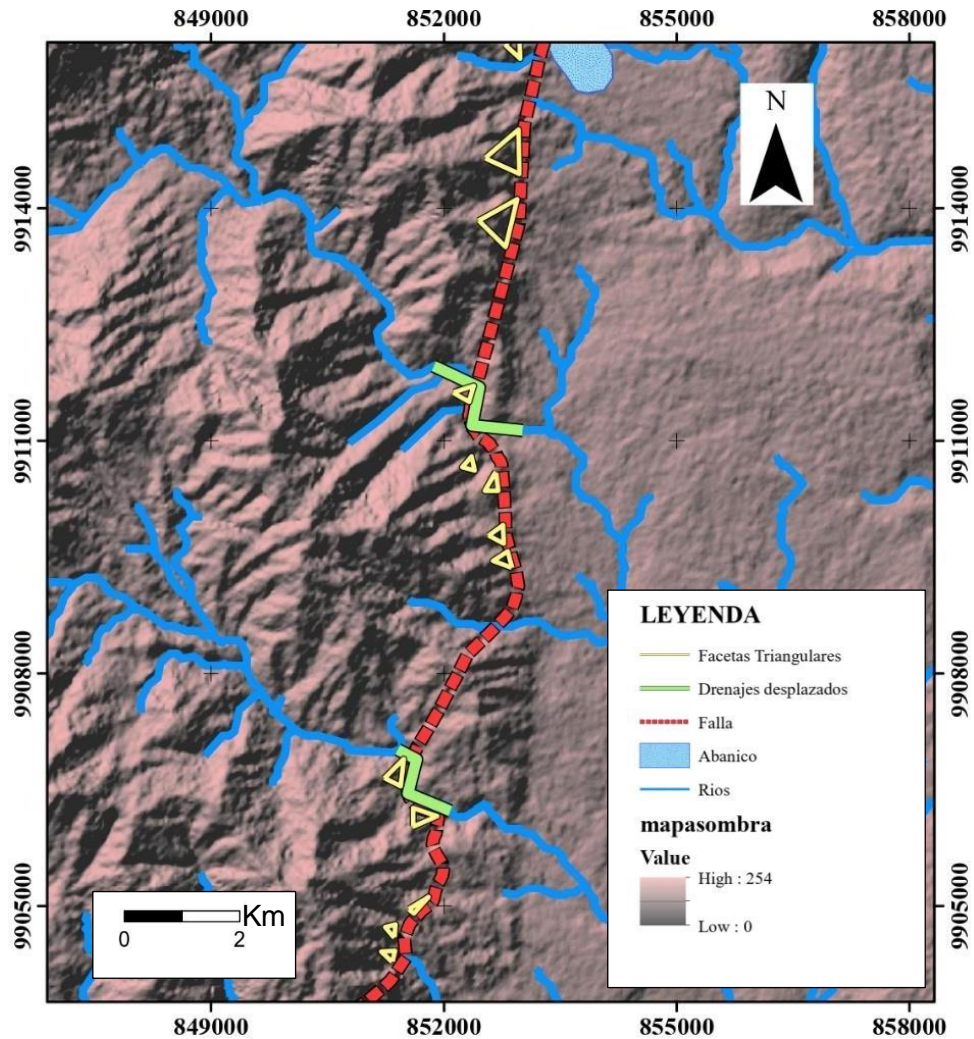


FIGURA 9. Mapa de evidencia con marcadores morfológicos de la Falla La Merced de Jondachi.

Como se observa en la figura 9 se encontraron facetas triangulares en el frente montañoso, drenajes desplazados y la presencia de un abanico a lo largo de la Falla La Merced de Jondachi; cuya longitud estimada de deformación de 23,14 km.

A partir de la delimitación de la falla, se analizó la presencia de subcuencas significativas, que estarían afectadas por la Falla La Merced de Jondachi. Las cuencas se muestran en la figura 10.

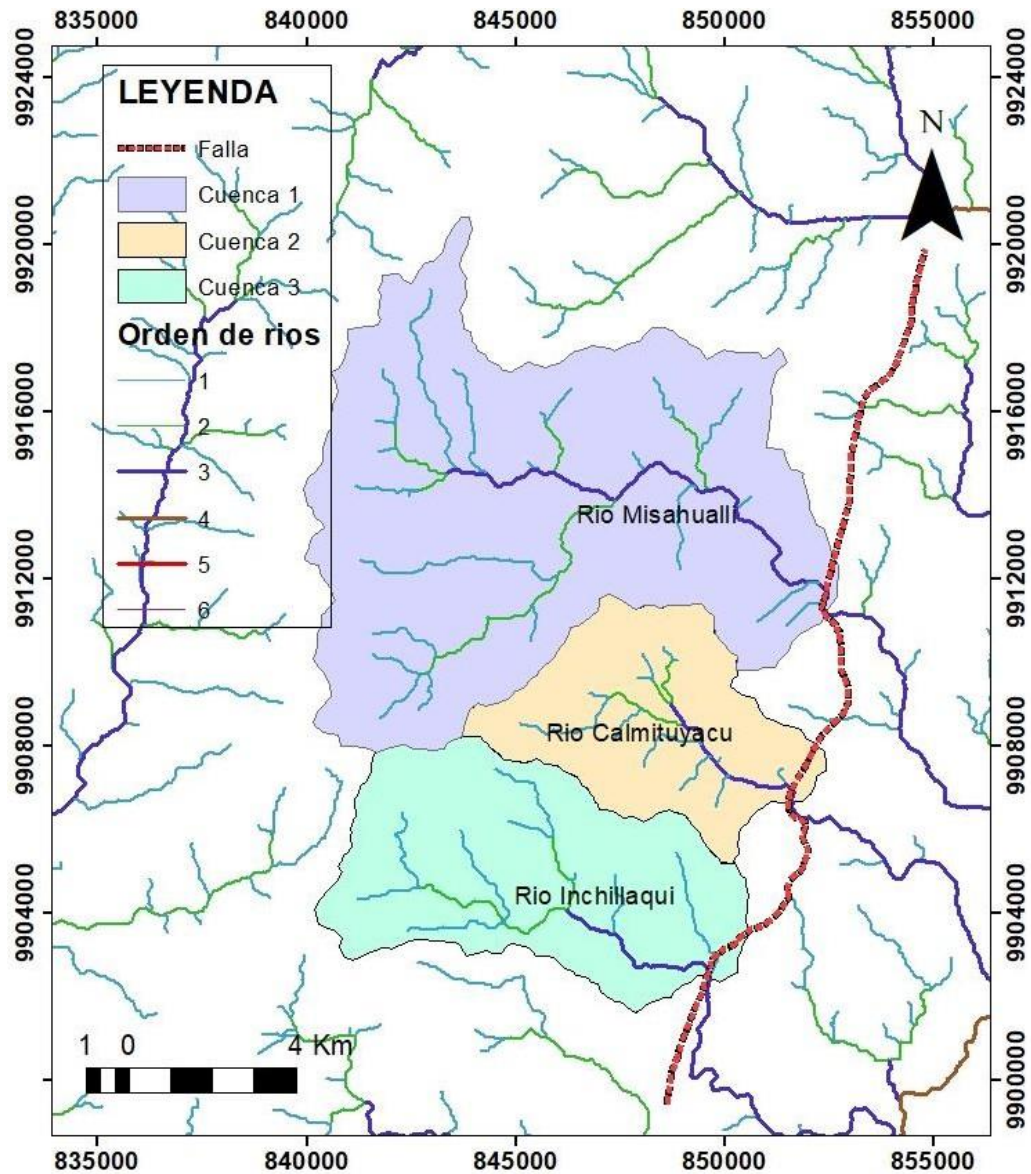


FIGURA 10. Mapa de evidencia de la presencia de tres subcuencas significativas y límites de los ríos que se trazan en la Falla La Merced de Jondachi.

En la figura 10 se identifican tres subcuencas que se orientan de forma perpendicular a la falla, esta atravesada por tres subcuencas de diferentes ríos, la primera pertenece al río Misahualli, la segunda al río Calmituyacu y la tercera al río Inchillaqui.

Índice de sinuosidad del frente de montaña (SMF)

Al trazar la longitud de contacto y piedemonte (Lmf) que se configura como numerador del indicador SMF en la ecuación 1, se evidenció que la Falla La Merced de Jondachi presenta áreas con pendientes pronunciadas mayores a 25%; otras con pendientes suaves menores a 25% (línea verde en la figura 7). Donde el Lmf se alarga con respecto al Ls, razón por la cual, el cálculo del SMF se estimó para 10 segmentos con características de pendientes distintas. Se utilizó el mapa de pendiente reclasificado para separar zonas altas de las planas. Con ese criterio se delimitaron los segmentos como se muestra en la figura 11:

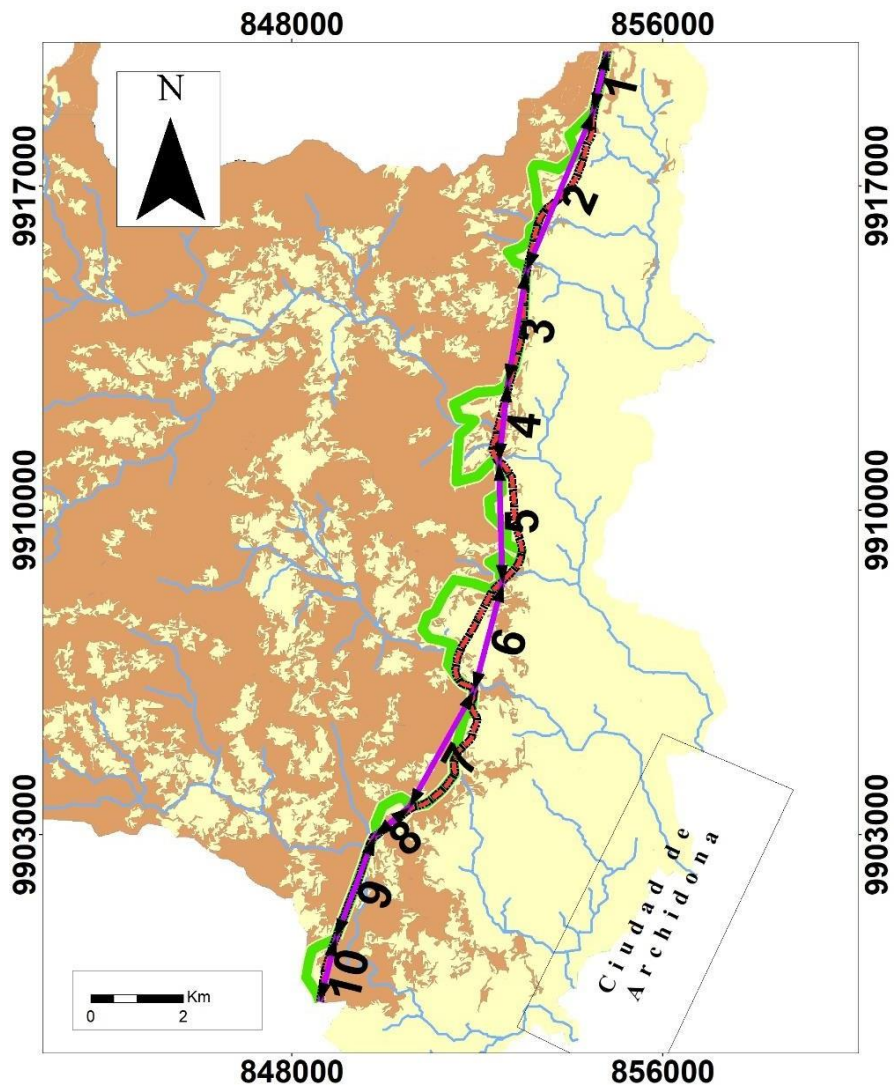


FIGURA 11. Ubicación espacial de 10 segmentos utilizados para el cálculo de SMF.

En la figura 11 se observa los segmentos utilizados para el cálculo del índice SMF. En la tabla 1 se presentan los datos del numerador, denominador, el índice y la clasificación para cada una de las delimitaciones.

Tabla 1. Resultados de la aplicación de sinuosidad

Segmentos	Ls (Km)	Lmf (Km)	SMF	Clasificación
1	1,33	1,40	1,05	Altamente activo
2	3,72	5,27	1,42	Altamente activo
3	2,46	2,48	1,01	Altamente activo
4	1,71	4,54	2,66	Moderadamente activo
5	2,63	4,00	1,52	Moderadamente activo
6	2,40	4,40	1,83	Moderadamente activo
7	2,87	3,22	1,12	Altamente activo
8	0,98	1,46	1,49	Altamente activo
9	2,34	2,34	1,00	Altamente activo
10	1,42	1,78	1,26	Altamente activo

Razón de Elongación

La Re en las tres subcuencas proporcionan valores que se encuentran entre 0,56 y 0,85. Es notable que el valor más alto se registre en la subcuenca central, que forma parte del sistema fluvial del río Calmituyacu, mientras que, las subcuencas con los valores bajos se sitúen al norte río Misahualli y al sur río Inchillaqui.

En la siguiente figura se muestra la delimitación de las subcuencas para el análisis de la razón de elongación.

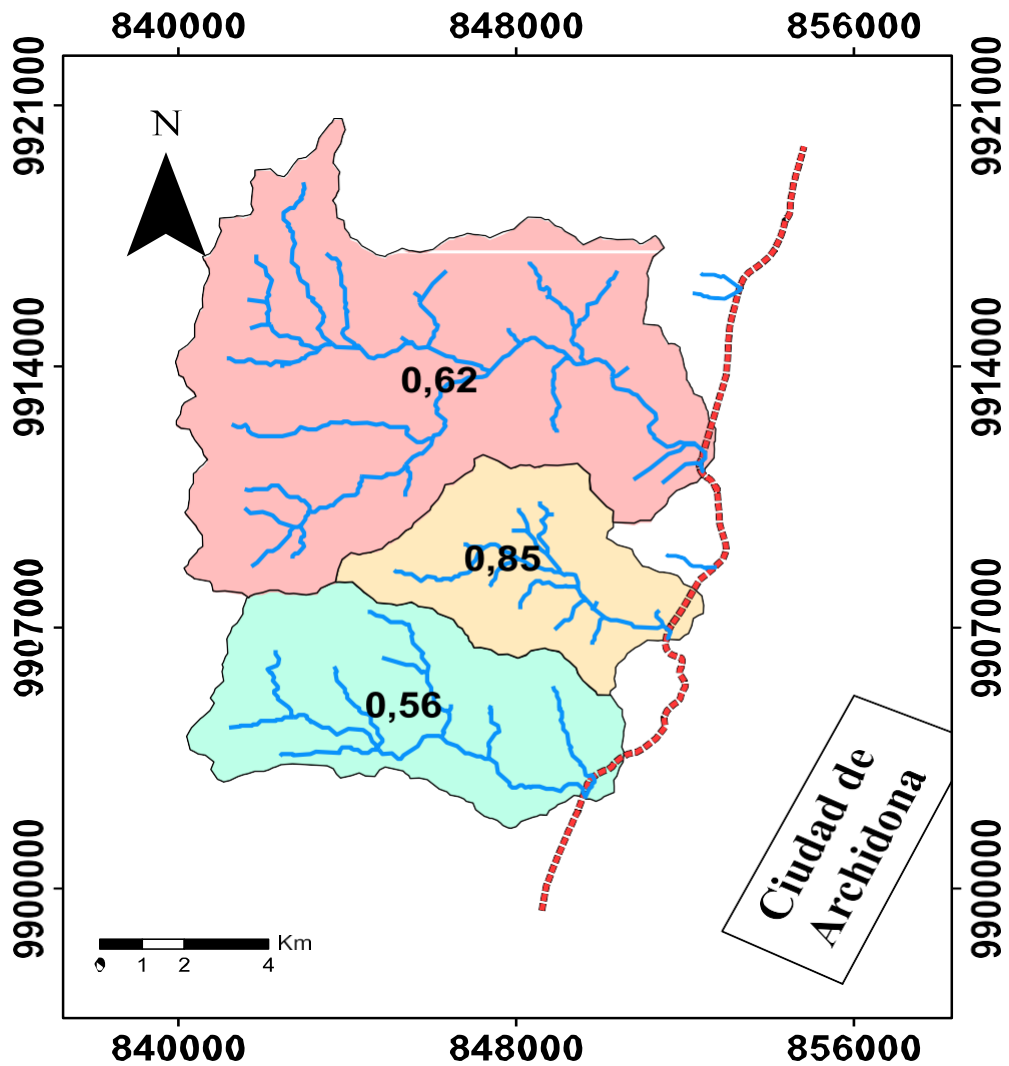


FIGURA 12. Índice de circularidad de la falla La Merced de Jondachi.

Como se observa en la figura 12 se identificaron tres subcuencas que tienen resultados de los índices, los siguientes:

Tabla 2. Re de las 3 subcuencas de la Falla La Merced de Jondachi

SUBCUENCA	Área	L (Km)	R	Rc	Re	Clasificación
1	93,78	17,61	5,46	10,93	0,62	Alargada
2	28,18	7,04	3,00	5,99	0,85	Ovalada
3	42,17	13,01	3,66	7,33	0,56	Alargada

En la tabla 2 se evidencia que la subcuenca 1 y 3 son alargadas; en tanto que la subcuenca 2 es ovalada. Con respecto a las primeras, al tener un Re entre 0,50 y 0,75, implica una subcuenca ligeramente activa, mientras que la ovalada presenta una subcuenca inactiva.

Asimetría de la cuenca del drenaje

La subcuenca 3 presenta valores AF superiores a 50; es decir, tienen mayor intensidad de basculamiento hacia la izquierda, por lo tanto hay incidencia de actividad tectónica. Mientras que, la subcuenca 1 y 2 tienen valores próximos a 50, respectivamente. Así el basculamiento es hacia la derecha, con lo que, hay estabilidad de la actividad tectónica. En lo que corresponde a la asimetría de la cuenca del drenaje se calculó el AF y AF normalizado, se detallan los resultados:

Tabla 3. Resultados de AF y AF normalizado de las 3 cuencas del área de estudio

Subcuenca	Área Total (km ²)	Área Derecha de la Subcuenca (km ²)	AF	AF Normalizado	Clasificación
1	93,78	36,50	38,9 2	11,06	Cuenca moderadamente asimétrica
2	28,18	8,24	29,2 4	20,76	Cuenca fuertemente asimétrica
3	42,17	28,16	66,7 7	16,77	Cuenca fuertemente asimétrica

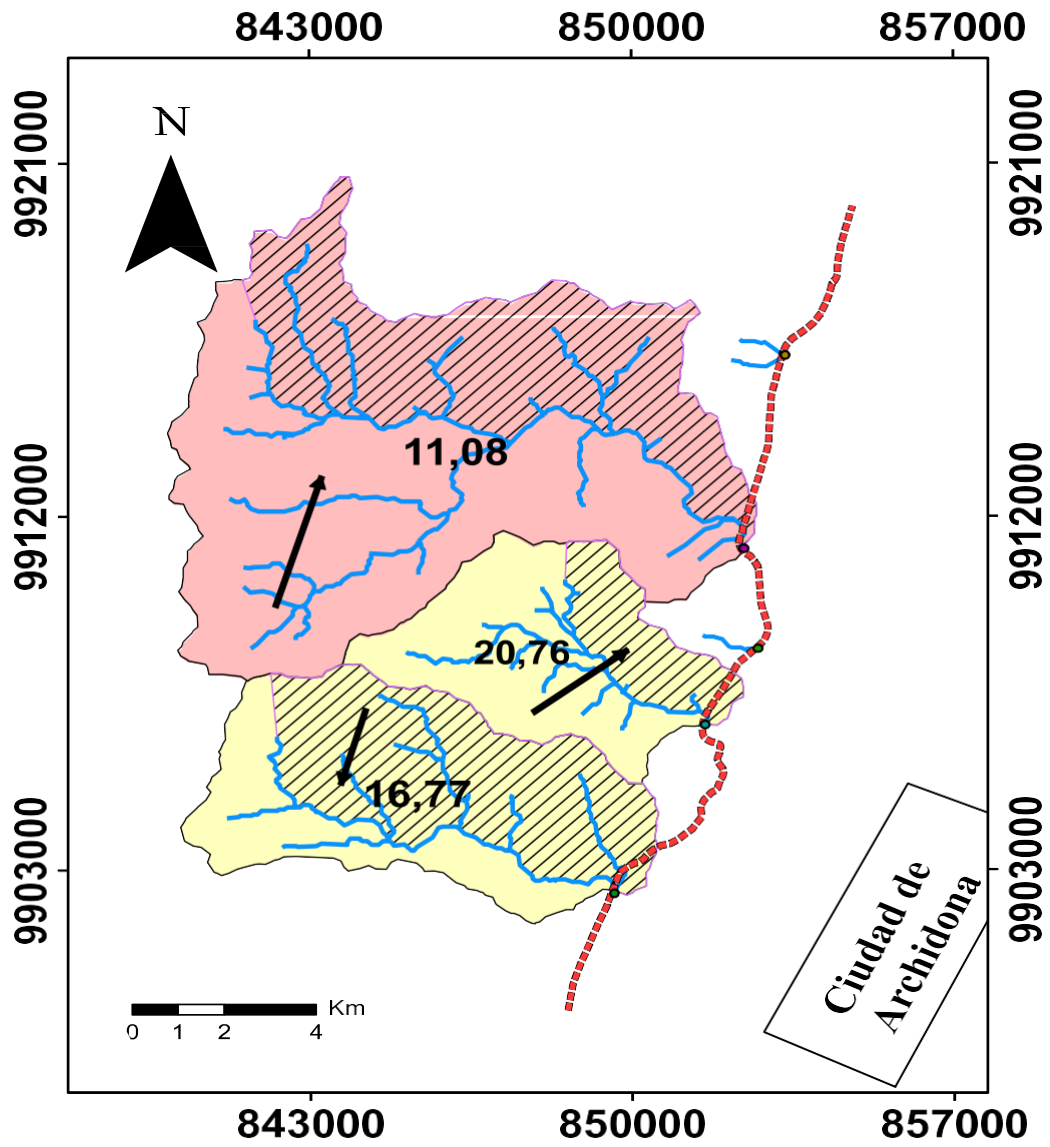


FIGURA 13. Mapa de distribución de asimetría de las subcuencas de la falla La Merced de Jondachi.

Los resultados de tabla 3 y la figura 13 evidencian asimetría significativa en las subcuencas, por ello, mayor basculamiento. Sin embargo, la dirección es diferente. Por otro lado, se identificó que la subcuenca 1 presenta asimetría moderada, así como basculamiento en dirección similar.

Índice de Hack

El mapa del índice de Hack permite observar que los puntos anómalos figura 14, se concentran en la red de drenaje de las subcuencas 2 y 3. Se detecta cambios abruptos

en la zona, con posibilidad de estar sujeta a condiciones de relieve como son: litología o la presencia del movimiento tectónico.

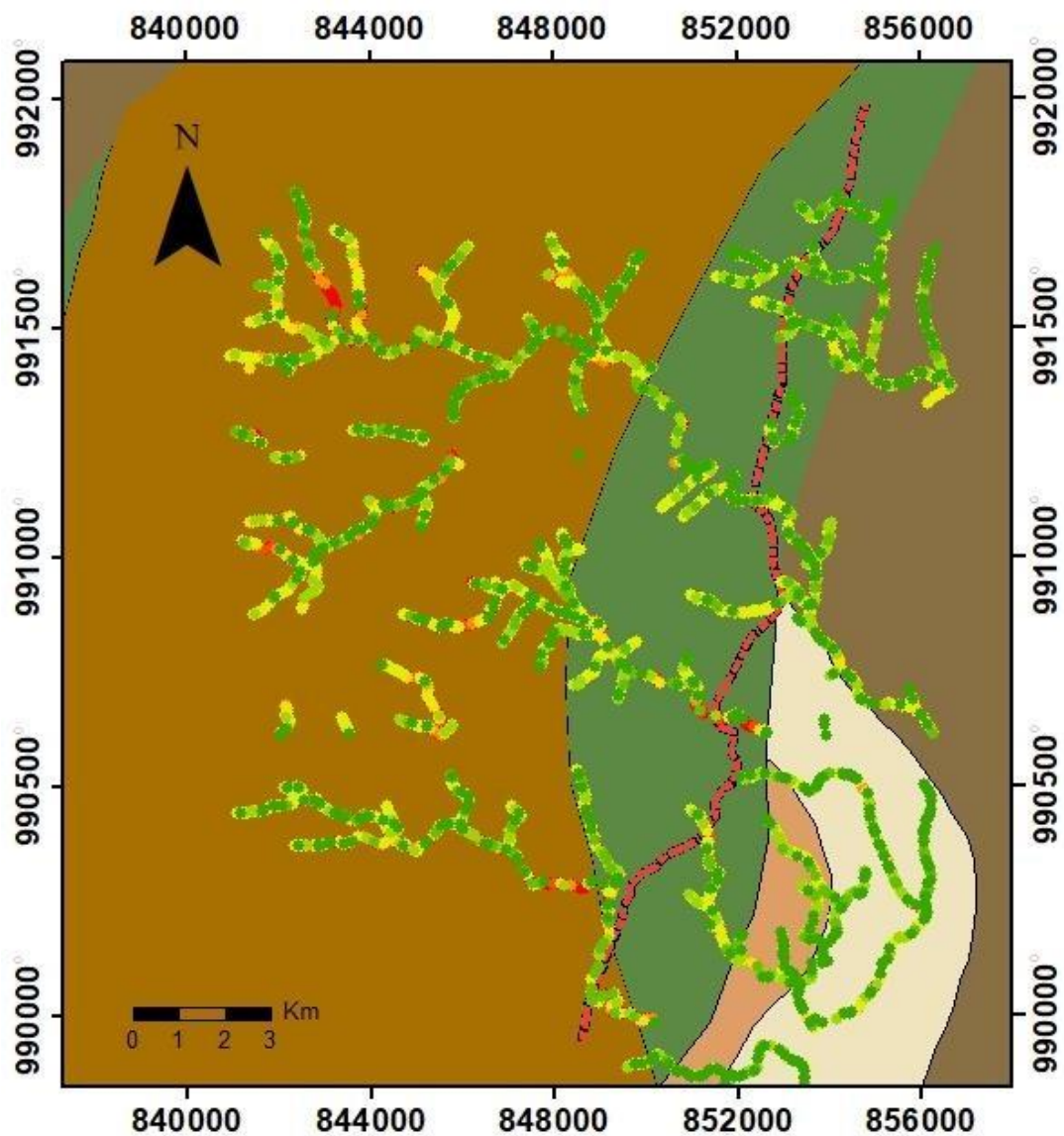


FIGURA 14. Mapa de distribución del Índice de Hack de la Falla La Merced de Jondachi.

Se observa mayor acumulación de puntos anómalos (puntos rojos) en la zona cercana a la Falla La Merced de Jondachi (línea roja) de la subcuenca 2 y 3.

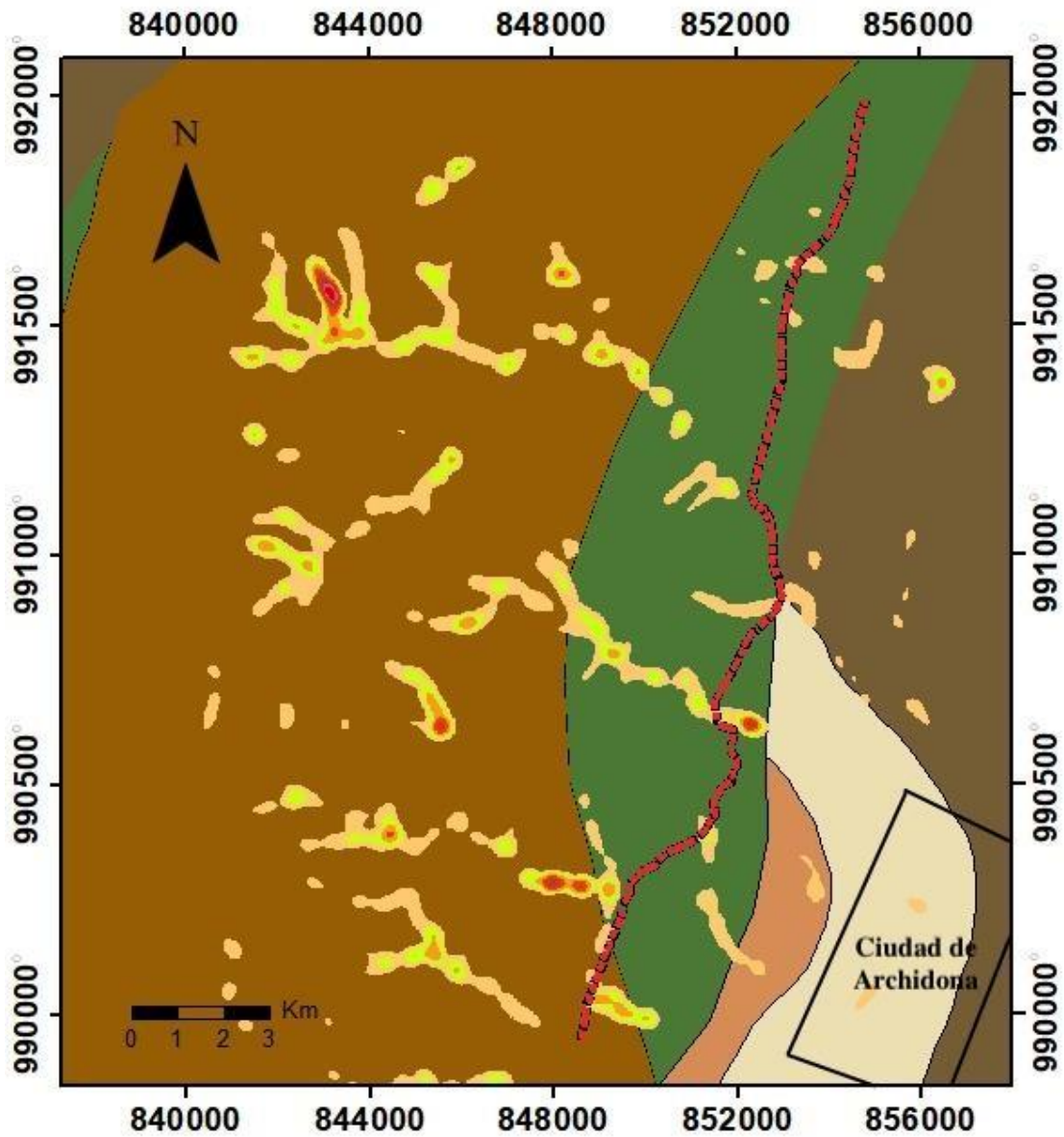


FIGURA 15. Mapa de la densidad de Kernel de la Falla La Merced de Jondachi.

En la Figura 15 se observa que en las subcuencas 2 y 3 concentran los puntos anómalos cerca de la zona por donde atraviesa la falla. Aspectos que identifican comportamientos inusuales comparados con otros segmentos de la grieta.

DISCUSIÓN

Cartografía y cinemática de la Falla La Merced de Jondachi

La utilización de marcadores geomorfológicos, como facetas triangulares, drenajes desplazados y abanicos aluviales son importantes para demostrar la existencia de la Falla La Merced de Jondachi y cartografiarla con precisión. En efecto la evidencia de facetas triangulares según Koukouvelas et al. (2021) surgen por la erosión causada por ríos y corrientes, siendo característica de la presencia de fallas activas durante mucho tiempo, donde la diferencia en la altura de las facetas triangulares indica procesos tectónicos y momentos en los que la corteza terrestre se eleva en etapas distintas. Asimismo, la observación de los drenajes desplazados es esencial para identificar el desplazamiento horizontal. Por otro lado, la presencia de abanicos aluviales revela señales de movimientos inversos en la falla. Así los periodos de mayor y menor precipitación impactan en los ciclos de agradación-incisión de los ríos, de modo que los estudios geocronológicos sobre abanicos aluviales proporcionan información valiosa sobre estos cambios. La acumulación de sedimentos refleja cambios en la elevación y la dirección del drenaje, indicando movimientos verticales. También se determinó la longitud de la Falla La Merced de Jondachi, estimada en 23,14 km. Parámetro importante para evaluar la peligrosidad de la falla asociada a la actividad tectónica, al comparar con la falla de SARA que mide 19,45 km, se destaca variaciones significativas, siendo relevante para establecer la longitud de la falla, ya que la peligrosidad se relaciona directamente con este factor.

Es relevante resaltar la existencia de la Falla La Merced de Jondachi, porque en investigaciones anteriores, esta no se consideraba como región afectada por la actividad tectónica. Así lo señala Eguez et al. (2003) quienes afirman que la Falla La Merced de Jondachi, es parte de la falla de Tena, siendo inversa y ciega de < 1,6 millones de años con una tasa de movimiento de <1. A pesar de ello, con la información recabada por SARA (2016) que sirvió de base para el presente análisis, indica que la falla es independiente, con respecto a la de Tena, estableciendo como falla inversa ciega cuaternaria (edad de último movimiento <1,8 millones de años). Con lo expuesto, en la presente investigación se observó, que la falla muestra evidencias de superficie; adicional presencia de componente transcurrente.

En lo referente a los sistemas fluviales desplazados de los ríos Misahualli, Inchillaqui y Calmituyacu, son indicadores que la Falla La Merced de Jondachi evidencia movimiento horizontal o que el movimiento de los bloques tiene tal característica (Tarbuck y Lutgens, 2005). El desplazamiento sería dextral; así las facetas triangulares presentes a lo largo de la falla indican cambios topográficos, revelando movimientos ascendientes que apuntan a movimientos verticales, como consecuencia que el bloque de techo se mueve hacia arriba y sobre el bloque de muro (inversa).

Análisis de los índices geomorfológicos

En el estudio se observó que la Falla La Merced de Jondachi experimentó desplazamientos recientes, revelando la condición activa. La heterogeneidad de la actividad tectónica evaluada mediante los índices geomorfológicos a lo largo de la falla, llevaron a comprender los procesos tectónicos en los segmentos.

Entre los indicadores analizados se consideró al SMF, evidencia que los segmentos 1, 2, 3, 6, 7, 8, 9 y 10 presentan mayor actividad tectónica, En la asimetría de la cuenca, los resultados sugieren que las subcuencas de los ríos Inchillaqui y Calmituyacu atravesadas por la Falla La Merced de Jondachi están relacionadas con actividad tectónica, ello por las deformaciones o movimientos en la corteza terrestre (Sotti et al., 2013). En el índice Re evidenció que las subcuena presente al Sur de la falla es ligeramente activa, que define a la zona como activa tectónicamente (Toural y Moreiras, 2018). De este modo, el Inchillaqui que se encuentra al Sur, muestra que la elongación de las subcuencas tiene como resultado actividad tectónica activa. Mientras que, el índice de Hack muestra puntos anómalos en las subcuencas 2 y 3. Es decir, movimientos tectónicos, adicional al cambio litológico de la zona de transición de lavas y piroclastos a lutitas en la red de drenaje 2. Las lutitas al ser rocas sedimentarias tienen partículas finas y minerales arcillosos que erosionan con facilidad; haciendo menos resistente a la deformación tectónica.

Por otra parte, el SMF muestra los segmentos 4, 5 y 6 revelan actividad tectónica moderada. Los hallazgos evidencian que la Falla La Merced de Jondachi presenta relieves pronunciados con diferencias de altitud entre áreas altas y bajas. Lo que caracteriza zonas con levantamiento pronunciado de montañas y deformación de la corteza; en otras palabras, presencia de falla activa (Bull y McFadden, 1977) (Keller y Pinter, 2002) (Abdullah y Abdullah, 2023). En la asimetría de la cuenca 1 es

moderadamente activa, resultado de fuerzas tectónicas que actúan de manera heterogénea en distintas partes de las cuencas. En el índice Re evidencio que en el río Misahualli la actividad tectónica es ligeramente activa. En el índice de Hack, la red de drenaje 3 se caracteriza por la presencia del granito de Abitagua. Este granito, al pasar a través de procesos geológicos como la trascendencia a lavas y piroclastos, experimenta cambios que lo vuelven menos resistente a la deformación tectónica y la erosión.

CONCLUSIONES

Al finalizar el estudio orientado a analizar los indicadores geomorfológicos para la caracterización de actividades tectónicas en el piedemonte amazónico de la ciudad de Archidona, se concluye:

La cinemática de la Falla La Merced de Jondachi permitió determinar el desplazamiento de los bloques en la zona analizada, en donde se determinó que la acumulación de sedimentos refleja cambios en la dirección del drenaje, indicando movimientos verticales. Con ello se calculó los indicadores geomorfológicos de la zona.

Se construyó un Sistema de Información Georreferenciado de la falla a partir de los marcadores morfológicos que determinaron nueve facetas triangulares, así como la identificación de subcuencas significativas afectadas por la grieta que son el río Misahualli, río Calmituyacu e Inchillaqui. Con base a los resultados de la cartografía obtenida, el uso de SIG aporta al análisis de fallas y de determinación de las deformaciones tectónicas, en particular bajo el cálculo de índices geomorfológicos.

Al cartografiar la Falla La Merced de Jondachi se evidenciaron indicadores morfotectónicos en una longitud de 23,14 km que sugieren la presencia de falla activa. Los índices geomorfológicos confirmaron la existencia de actividad tectónica en la Falla La Merced de Jondachi en un nivel alto en las subcuencas de los ríos que se encuentran en el norte y sur de la falla, así como una actividad moderada en la subcuenca ubicada en el río. Evidenciando que la mayor actividad tectónica se ubica en la zona norte – sur de la Falla La Merced de Jondachi.

Se determinó que el índice de sinuosidad del frente de montaña tiene áreas con pendientes pronunciadas mayores a 25%. Razón por la cual, la actividad tectónica muestra características de peligrosidad de la falla. Datos que apuntan a tomar acciones tendientes de prevención para mitigar el riesgo que lleva la actividad tectónica hacia la población.

La razón de elongación, en las que las subcuencas del río Misahualli y del río Inchillaqui son alargadas, es decir es una subcuenca ligeramente activa. Al respecto, la asimetría se determinó que hay datos significativos, lo que ocasiona mayor basculamiento. A ello,

se suma en estas subcuencas se concentran puntos anómalos, factores que revelan comportamientos inusuales. En ese sentido los cambios evidenciados en la zona fueron caracterizados por los índices geomorfológicos, que representan influyentes para los cambios de relieve dados por la deformación tectónica.

BIBLIOGRAFÍA

- Abdullah, O., y Abdullah, A. (2023). Evaluation of relative active tectonics by using geomorphic indices of the Bamo anticline, Zagros Fold-Thrust Belt, Kurdistan Region of Iraq. *Heliyon.*, 9(7). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17970>
- Alvarado, A., Audin, L., Baize, S., Nocquet, J., Jomard, H., Mothes, P., y Jarrín, P. (2014). Active tectonics in Quito, Ecuador, assessed by geomorphological studies, GPS data, and crustal seismicity. *Tectonics*. <https://doi.org/10.1002/2012TC00322>
- Ayala, R. (2022). *Así es el "Anillo de Fuego", la cuna de los terremotos más poderosos que agitan la tierra*. National Geographic. <https://www.ngenespanol.com/el-mundo/cinturon-de-fuego-del-pacifico-que-es-y-por-que-genera-tantos-sismos/#:~:text=En%20el%20Cintur%C3%B3n%20de%20Fuego,placa%20lleva%20la%20palabra%20fuego.>
- Bhat, F., Bhat, I., Sana, H., Iqbal, M., y Mir, A. (2013). Identification of geomorphic signatures of active tectonics in the WestLidder Watershed, Kashmir Himalayas: Using Remote Sensing and GIS. *International Journal of Geomatics and geosciences*, 4(1), 164-176.
- Bull, W., y McFadden, L. (1977). *Tectonic geomorphology north and south of the Garlock fault, California*. Routledge. <https://doi.org/9780429299230>
- Campo, A., Aldalur, N., y Fernández, S. (2012). Morfometría fluvial aplicada a una cuenca urbana en Ingeniero White, República Argentina. *Investigaciones geográficas*(77). https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112012000100002
- Castro, B. (2021). Evaluación Macrosísmica del terremoto de Pujilí de 1962. *Tesis de pregrado*. Universidad Central del Ecuador.
- Cuéllar, M., López, J., Carrillo, E., Ibáñez, D., Sandoval, J., y Osorio, J. (2014). Control de la actividad tectónica sobre los procesos de erosión remontante: el caso de la cuenca del río cambeima, cordillera central, Colombia. *Boletín de Geología*, 36(1).
- Cunalata, F., y Caiza, P. (2022). Estado del Arte de Estudios de Vulnerabilidad Sísmica en Ecuador. *Revista Politécnica*, 50(1). <https://doi.org/https://doi.org/10.33333/rp.vol50n1.06>

- Duvall, M., Waldron, J., Godin, L., y Najman, Y. (2020). Active strike-slip faults and an outer frontal thrust in the Himalayan foreland basin. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 117(30), 17615-17621. <https://doi.org/10.1073/pnas.2001979117>
- Eguez, A., Alvarado, A., Yepes, H., Machette, M., Costa, C., Dart, R., y Bradley, L. (2003). *Database and Map of Quaternary Faults and Folds of Ecuador and its offshore regions*. U.S. Geological Survey .
- GAD Municipal Archidona. (2022). <https://archidona.gob.ec/identidad/>
- Hack, J. (1973). Stream-Profile Analysis and Stream-Gradient Index. *Journal of Research of the United States Geological Survey*, 1(4), 421-429.
- Hare, P., y Gardner, T. (1985). Geomorphic indicators of vertical neotectonism along converging plate margins, Nicoya Peninsula, Costa Rica. *Tectonic Geomorphology proceedings of the 15th Annual Binghamton Geomorphology Symposium*, 75-104.
- Keller, E., y Pinter, N. (2002). *Active tectonics earthquakes, uplift and landscape*. Prentice - Hall, Inc. <https://doi.org/0-13-088230-5>
- Koukouvelas, L., Nikolakopoulos, K., Kyriou, A., Caputo, R., Belesis, A., Zygouri, V., . . . Tsentzos, L. (2021). The March 2021 Damasi Earthquake Sequence, Central Greece: Reactivation Evidence across the Westward Propagating Tyrnavos Graben. *Geosciences*, 11(8). <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/geosciences11080328>
- Lavenu, A. (2006). Neotectónica de los andes entre 1°N y 47°S (Ecuador, Bolivia y Chile). *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 61(4), 504-524. <http://www.scielo.org.ar/pdf/raga/v61n4/v61n4a06.pdf>
- Martín, I., Silva, P., Martínez, A., y Elez, J. (2020). Geomorphological and Geochronological Analysis Applied to the Quaternary Landscape Evolution of the Yeltes River (Salamanca, Spain). *Sustainability*, 12(19), 2-19. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/su12197869>
- Ollarves, R., y Audemard, F. (2004). Evidencias morfotectónicas de actividad cuaternaria en la Cuenca de Barlovento, Venezuela Norcentral . *Conference: XII Congreso Venezolano de Geofísica*.
- Quinde, P., y Reinoso, E. (2016). Estudio de peligro sísmico de Ecuador y propuesta de espectros de diseño para la Ciudad de Cuenca. *Ingeniería sísmica*(94), 1-26. <https://www.scielo.org.mx/pdf/ris/n94/0185-092X-ris-94-00001.pdf>
- Salazar, G. (2018). Terremotos y salud: lecciones y recomendaciones. *Salud Pública de México*, 60(11). <https://doi.org/https://doi.org/10.21149/9445>

- SARA. (2016). <https://sara.openquake.org/>
- Schumm, S. (1956). The evolution of drainage system and slopes in badlands at Pearth Amboy, New Jersey. *Bulletin of Geological Society of America*(67), 597-646.
- Sotti, V., Mollin, P., Faccenna, C., Soligo, M., y Casas, A. (2013). The influence of surface and tectonic processes on landscape evolution of the Iberian chain (Spain): Quantitative geomorphological analysis and geochronology. *Geomorphology*, 206, 37-57.
- Taípe, L. (2013). Análisis de las ecuaciones de predicción de movimientos de suelo para el Ecuador utilizando datos registrados durante el periodo 2000 - 2011 en estaciones sísmicas de bada ancha y acelerógrafos. *Tesis de especialista en Geología*. Escuela Politécnica Nacional.
- Tarbut, E., y Lutgens, F. (2005). *Ciencias de la Tierra. Una introducción a la geología física*. Person Educación.
- Toural, R., y Moreiras, S. (2018). Aplicación de índices geomorfológicos en el pie de monte neotectónicamente activo de Mendoza. *GEOACTA*, 42(2), 45-63. https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/90831/CONICET_Digital_Nro.fc_a2cda3-785c-4648-9e59-3b412d1e61f8_A.pdf?sequence=2&isAllowed=y
- UNDRR. (2013). *América del sur: una visión regional de la situación de riesgo de desastres*.
- Valdivia, W., Chacaltana, C., Chumpitaz, M., Benites, A., y Peña, D. (2014). Caracterización morfoestructural en la proyección sur de la zona de transición entre las cuencas Santiago y Huallaga. *Ingemmet*.
- Yépez, S., Ocampos, A., Espín, J., y Chulde, E. (2022). Evaluación Geomecánica de la Estabilidad de las Cavernas Humanti, Archidona - Napo. *GEO Latitud*, 5(2).