

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA EN GEOLOGÍA Y PETRÓLEOS

**EVOLUCIÓN GEOMORFOLÓGICA FLUVIAL RECIENTE EN RÍOS
TROPICALES ANDINOS DEL ECUADOR**

**EVOLUCIÓN GEOMORFOLÓGICA FLUVIAL Y LOS MOVIMIENTOS
EN MASA ASOCIADOS A LA MICRO CUENCA HIDROGRÁFICA
DEL RÍO PIEDRA FINA 2 (CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO
COCA)**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA EN
GEOLOGÍA**

YADIRA ELIZABETH ESPINOZA OVIEDO

yadiraespinoza3a@outlook.es

DIRECTOR: PhD. ISABEL CAROLINA BERNAL CARRERA

isabel.bernal@epn.edu.ec

Quito, septiembre 2022.

CERTIFICACIONES

Yo, Yadira Elizabeth Espinoza Oviedo declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.



YADIRA ELIZABETH ESPINOZA OVIEDO

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Yadira Elizabeth Espinoza Oviedo, bajo mi supervisión.



PhD. ISABEL CAROLINA BERNAL CARRERA

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

YADIRA ELIZABETH ESPINOZA OVIEDO
PhD. ISABEL CAROLINA BERNAL CARRERA

DEDICATORIA

*A mis padres Carmen y Alfonso y hermanos Esteban y Anita por su apoyo constante en
esta travesía*

Con amor, Yadi

AGRADECIMIENTOS

A mis padres por el desmedido esfuerzo que hicieron cada día para que pudiera culminar mis estudios, por permitir que mi realidad fuera diferente gracias a su trabajo, dedicación y tanto amor.

A Esteban quien siempre estuvo pendiente de que no le faltara nada a su pequeña hermana. A Anita, la que me enseñó a cumplir todas las metas que me propusiera mediante su gran ejemplo ¡Te admiro demasiado hermana!

A la Dra. Carolina Bernal, por su respaldo y compañía. A OCP por la gestión en la disponibilidad de los datos para el desarrollo de este proyecto, así como a Francisco V. por su aporte. Y a todos los grandes profesores que contribuyeron durante estos años en mi formación.

A todos los chicos y chicas con quienes coincidí en cualquier momento dentro de las instalaciones de la U, desde mi ingreso, en especial a Israel, mi primer amigo, mi amigui.

A Fer y Emi, mis chiquitas, mis amigas incondicionales desde primer semestre, con quienes aprendí a ser mejor, disfruté y celebré cada proceso de nuestra vida personal y académica. Mis mejores momentos fueron y serán siempre junto a ustedes.

Gracias Migue Altamirano, por apoyarme en campo y compartir momentos de alegría en este proceso.

A Dani C, Pao y Dani V quienes compartieron conmigo noches de estudio y apoyo cuando más lo necesité durante el principio de la pandemia y juntos, más tarde crearíamos el Club de Geología junto con Emi, Fer e Isma. Gracias a todos por las enseñanzas dentro de nuestro auténtico proyecto.

A los chicos de mi promoción por nuestra unión que nos ayudó a salir adelante frente a ciertas circunstancias adversas. Cada uno, con su singular carisma hizo que disfrute aún más de esta linda carrera.

A ti Nico, que me apoyas hasta donde te es posible, incluso más que eso...

A cada uno de mis chicos del grupo "Los muy amigos" quienes se convirtieron en mis grandes amigos y crearon desde el primer momento experiencias maravillosas de alegría y apoyo que han trascendido durante estos años. Gracias Issac que fuiste gran parte de mí felicidad y la de todos nosotros como grupo, donde sea que estés, te recuerdo siempre.

Oh, thanks a lot !

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTOS	IV
RESUMEN.....	IX
ABSTRACT.....	X
1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO.....	1
1.1 Objetivo general.....	2
1.2 Objetivos específicos.....	2
1.3 Alcance	2
1.4 Área de estudio.....	3
1.5 Contexto General.....	4
1.5.1 Clima y Precipitaciones	4
1.5.2 Contexto Geodinámico.....	5
1.5.3 Geología Local.....	5
1.6 Marco Teórico	7
1.6.1 Geomorfología Fluvial	7
1.6.2 Sistema Fluvial	8
1.6.3 Dinámica Fluvial	8
1.6.3.1 Erosión	8
1.6.3.2 Transporte de sedimentos.....	8
1.6.3.3 Sedimentación	9
1.6.4 Movimientos en masa.....	9
1.6.4.1 Clasificación de tipos movimientos en masa	10
1.6.5 Cuenca Hidrográfica.....	11
1.6.5.1 Curva hipsométrica.....	12
1.6.6 Perfil Longitudinal de un río.....	13
1.6.6.1 Knickpoints.....	15
1.6.6.2 Pendiente media del cauce principal.....	16
2 METODOLOGÍA.....	17
2.1 Recopilación de información	17
2.2 Delimitación micro cuenca hidrográfica.....	18
2.3 Red hidrográfica.....	18
2.4 Curva hipsométrica.....	19
2.5 Perfil longitudinal.....	21

2.6	Levantamiento geológico.....	22
2.7	Preparación de láminas delgadas	22
2.7.1	Conteo modal	23
3	RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	24
3.1	Resultados	24
3.1.1	Delimitación micro cuenca hidrográfica	24
3.1.2	Levantamiento geológico	24
3.1.3	Curva hipsométrica.....	29
3.1.4	Perfil longitudinal	31
3.1.4.1	Knickpoints.....	32
3.1.4.2	Pendiente media del cauce del río Piedra Fina 2	34
3.1.5	Movimientos en masa.....	37
3.1.6	Evolución del proceso de erosión regresiva en el río Piedra Fina 2.....	38
3.2	Discusión.....	41
3.3	Conclusiones	42
3.4	Recomendaciones	42
4	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43
5	ANEXOS.....	47

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de ubicación de la micro cuenca hidrográfica del afluente río Piedra Fina dentro de la cuenca del hidrográfica del principal río Coca.....	3
Figura 2. Precipitaciones mensuales a partir del año 1979 a 2021. Datos extraídos de: Essential Climate Variables.....	4
Figura 3. Mapa tectónico sintético de la Cuenca Oriente (modificado a partir de Baby et al., 1999) y su relación con la distribución de los eventos volcánicos.(Tomado de: (Barragán & Baby, 2004))	7
Figura 4. Tipos de sedimentos (Tomada de Dirección General de Televisión Educativa. Sitio Web: https://nuevaescuelamexicana.sep.gob.mx/)	9
Figura 5. Esquemas de a) deslizamientos traslacional y rotacional b) caída de rocas c) volcamiento d) flujos canalizados y no canalizados según Cruden y Varnes (1996) e) expansiones laterales. Modificado de: Proyecto Multinacional Andino.....	11
Figura 6. Curvas hipsométricas características del ciclo de erosión según Strahler 1952	13
Figura 7. Parámetros usados para el índice de gradiente SL	14
Figura 8. Representación esquemática de los factores formadores de knickpoints en el perfil longitudinal de un río. Fuente:(Ahmed et al., 2019))	15
Figura 9. Ventana de herramientas del Software JMicroVision utilizado en este estudio.	23
Figura 10. Delimitación de la micro cuenca hidrográfica de río afluente Piedra Fina 2	24
Figura 11. Mapa geológico de la micro cuenca hidrográfica del río Piedra Fina 2 escala 1:2 500	25
Figura 12. a) afloramiento de Riolita en el margen izquierdo y de derecho del río Piedra Fina 2 (UTM 209396E 9985789N) b) fracturaciones en los afloramientos riolíticos de la zona c)muestra de mano de riolita, textura afanítica d) lámina delgada en luz natural	26
Figura 13. a) Afloramiento de Andesita en el margen izquierdo del río Piedra Fina 2 (UTM 209362E 9985823N) b)muestra de mano andesita, textura porfirítica c) lámina delgada en luz natural y luz poralizada	27
Figura 14. a) discordancia sobre rocas riolitas y avalancha de escombros (UTM 209366E 9985853N) b)avalancha de escombros limo-arenosa de matriz soportada (UTM 209356E 9985905N) c) avalancha de estructura brechosa compacta (UTM 209375E 9985866N)	28
Figura 15. a) Suelo arenoso con mezcla de fragmentos de roca meteorizada b) contacto con el suelo arenoso y la avalancha de escombros del paleo Reventador (tonalidad gris) y el río Piedra Fina 2, presencia variante OCP (coordenadas 209077 E 995965 N)	29
Figura 16. Curva hipsométrica de la micro cuenca hidrográfica del río Piedra Fina 2	30
Figura 17. Curva hipsométrica adimensional con curvas definidas por Strahler (1952), y la curva roja representa el obtenido en este estudio.....	31
Figura 18. Perfiles longitudinales y de equilibrio (PE líneas entre cortadas) de la evolución trimestral del río Piedra Fina 2 a partir del año 2020 al 2022.....	32
Figura 20. Evolución del cauce del río Piedra Fina 2 desde el 14 de junio del 2020 al 06 de julio del 2022.....	34

Figura 21. Representación de la variabilidad de las pendientes medias del cauce del río Piedra Fina 2 en dos tramos; desde la variante OCP al punto de avulsión y del punto de avulsión hacia la desembocadura con el RC desde el 14 de junio del 2020 al 06 de julio del 2022.....	36
Figura 22. PF1 Movimiento en masa margen izquierdo del río Piedra Fina 2 a 1390m.s.n.m coordenadas 209415E 9985946N	37
Figura 23. PF2 Movimiento en masa al margen derecho del río Piedra Fina 2 a 1357m.s.n.m coordenadas 209356 E 9985905 N	38

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Modelo digital de Terreno y Ortofotografías recopiladas para el estudio.....	18
Tabla 2. Reclasificación de intervalos, áreas entre curvas de nivel. DTM de la micro Cuenca de río Piedra Fina 2.....	19
Tabla 3. Parámetros estadísticos calculados a partir de la reclasificación de intervalos en áreas de curvas de nivel en el DTM de la micro Cuenca de río Piedra Fina 2.....	20
Tabla 4. Cálculo de parámetros necesarios para realizar la curva hipsométrica	21
Tabla 5. Valores de pendientes del cauce del río Piedra Fina 2 desde la cota más alta hasta su desembocadura, así como tramos desde la variación de la tubería OCP hasta el punto de avulsión y desde el punto de avulsión hasta la desembocadura (ver figura 20 para identificar los tramos)	35
Tabla 6. Evolución erosión regresiva en el río Piedra Fina 2 a partir del año 2020 al 2022.	40

RESUMEN

Tras el colapso de la cascada San Rafael en el año 2020, la geomorfología de la Cuenca Hidrográfica del río Coca se tornó inestable debido al proceso de erosión regresiva, PER el cual ha modificado drásticamente el paisaje fluvial, y, como consecuencia, sus ríos tributarios presentes aguas arriba se verían afectados por este proceso, por tal razón se evaluó la geomorfología del afluente río Piedra Fina 2, ubicado en la provincia de Napo, cantón Chaco, al norte de la región Subandina, mediante el uso de información trimestral a partir del año 2020 al 2022 de modelos digitales de terreno (DTM) encontrando así una tendencia que refleja un alto potencial erosivo debido a la variabilidad litológica de la zona las cuales descartan las condiciones de equilibrio dentro del perfil longitudinal del río (knickpoints). Los movimientos en masa son visibles evidencias de la geodinámica dentro de esta microcuenca los cuales se distinguen por las condiciones naturales de meteorización y altas pendientes, así como los que se han generado en respuesta a la actividad del PER.

PALABRAS CLAVE: río Piedra Fina 2, proceso de erosión regresiva, knickpoints, geomorfología.

ABSTRACT

After the collapse of the San Rafael waterfall on 2020, the geomorphology of the Coca River Watershed became unstable due to the process of regressive erosion, PER which has drastically modified the river landscape, and, as a consequence, its tributary rivers present upstream would be affected by this process, for this reason the geomorphology of the Piedra Fina 2 River tributary was evaluated, located in the province of Napo, Chaco canton, north of the Sub-Andean region, through the use of quarterly information from 2020 to 2022 of digital terrain models (DTM) thus finding a trend that reflects a high erosive potential due to the lithological variability of the area which rule out the equilibrium conditions within the longitudinal profile of the river. The mass movements are visible evidence of geodynamics within this micro-basin which are distinguished by the natural weathering conditions and high slopes, as well as those that have been generated in response to the activity of the PER.

KEYWORDS: Piedra Fina 2 river, regressive erosion process, knickpoints, geomorphology.

1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

A partir del año 2020, la geomorfología de la Cuenca Hidrográfica del río Coca, CHRC, se tornó inestable debido al agresivo Proceso de Erosión Regresiva, PER, y movimientos en masa asociados, que se desencadenaron a partir del colapso de la Cascada San Rafael, CSR. Se piensa que la formación de la CSR empezó después de la depositación de la avalancha de escombros asociada al colapso del Paleo-Reventador, Avalancha 2, y el posterior emplazamiento de un flujo de lava que brotó del volcán El Reventador modificando el cauce original del río de hace 12 000 años aproximadamente. En febrero de 2020, la evolución de la CSR tuvo un momento capital cuando un socavamiento hídrico basal arrastró el material de avalancha presente bajo la presa, colapsando la CSR y dando inicio al PER. Durante un año el río Coca, RC, contó con un arco de lava en esa zona que finalmente colapsó el 25 de febrero, 2021 debido a la pérdida del soporte basal, alcanzando su configuración actual.

Esta serie de eventos han modificado drásticamente el paisaje fluvial aguas arriba de la extinta CSR pero también han perturbado las geoformas aguas abajo; en ambos casos se ha dado un aumento del riesgo por amenazas geomorfológicas. Meneses Carrillo (2022) mostró en su estudio que este PER ocurre en tres ejes diferentes: 1. Eje frontal, que avanza hacia la Hidroeléctrica Coca Codo Sinclar, HCCS; 2. Eje lateral, que avanza hacia los costados del cauce del RC resultado de deslizamientos; y, 3. Eje vertical, el cual incisa el cauce del río Coca, este último fue el primero en activarse tras el colapso de la cascada.

El colapso de la CSR es parte de la evolución natural de toda cascada, sin embargo, estudios previos (Andrade Villafuerte, 2016; Horna Kuonqui, 2016; Maldonado Albuja, 2017, Bernal, IC. et al., 2017, Bernal et al., 2022) muestran cambios geomorfológicos e hidrosedimentológicos importantes a raíz del inicio de la construcción de la HCCS, cuya Captación se encuentra a aproximadamente 19km aguas arriba de la CSR. Bernal (2022) afirma que esta estructura antrópica alteró los regímenes de flujo sólido - líquido del río y éste respondió modificando sus variables geomorfológicas. De hecho, la presencia de grandes islas formadas por clastos de tamaño entre arena gruesa a bloques justo aguas arriba del Vertedero de Excesos de la Captación, muestra como la obra hizo que el río pierda una gran cantidad de sedimentos de carga de lecho y por tanto, el acorazamiento del lecho del RC aguas abajo de las obras, ésta circunstancia se constituye en un factor que catalizó las infiltraciones ya presentes en el alféizar de la cascada ubicado detrás de la columna de la cascada, acelerando así un proceso que podría haber tardado cientos o miles de años en provocar una falla total de la estructura. (Bernal et al., 2022)

Este PER iniciado en febrero de 2020 no solamente ha afectado al RC, también los tributarios presentes aguas arriba de la CSR han tenido afectaciones significativas. Por ello, el objetivo

de este trabajo, es analizar la evolución geomorfológica del río Piedra Fina 2, así como las afectaciones directas a la infraestructura presente en la zona, como es el caso de un tramo del oleoducto del OCP, la carretera E45. Todo esto se realizó mediante el uso de orto fotografías y modelos digitales de elevación de terreno (DTM) además de salidas de campo que permitieron evaluar el avance erosivo dentro de la micro cuenca de este río y movimientos en masa asociados.

1.1 Objetivo general

Analizar la evolución geomorfológica fluvial y los movimientos en masa asociados de la micro cuenca hidrográfica del río Piedra Fina 2 frente al fenómeno de erosión regresiva de la cuenca hidrográfica del río Coca y las afectaciones directas a la infraestructura antrópica.

1.2 Objetivos específicos

- Estudiar la evolución geomorfología fluvial del río Piedra Fina 2 mediante un análisis topográfico y geológico como resultado de la toma de orto fotografías, modelos digitales de elevación del terreno, así como visitas a campo.
- Realizar perfiles longitudinales del río Piedra Fina 2 para analizar a detalle la evolución del drenaje a partir del fenómeno erosión regresiva de la cuenca hidrográfica del río Coca, así como la realización de una curva hipsométrica.
- Caracterizar los diferentes tipos de movimientos en masa asociados a la micro cuenca hidrográfica del río Piedra Fina 2.

1.3 Alcance

El presente trabajo de integración curricular se desarrolló a partir de la fotointerpretación de ortofotografías trimestrales a partir del año 2020 al año 2022 en las cuales se analizó la evolución geomorfología fluvial del río Piedra Fina 2 y los movimientos en masa asociados. La información digital disponible y analizada en este estudio, se realizó a partir de la cota 1400 m.s.n.m del río hasta su desembocadura en el río principal Coca a 1150 m.s.n.m

Dichos análisis fueron verificados con visitas al campo y procesados en el programa ArcGis 10.3 para su oportuna interpretación descrita a continuación.

1.4 Área de estudio

El río Piedra Fina 2 se encuentra en la provincia de Napo, cantón Chaco, siendo este un afluente del principal río Coca al norte de la región Subandina, Levantamiento Napo.

La micro cuenca hidrográfica del río Piedra Fina 2 ubicada cerca de las faldas del volcán El Reventador donde predominan depósitos de avalancha de escombros y flujos de lava, comprende un área total de 1072 km² donde el punto más alto comprende la cota 1860 m.s.n.m hacia la cota del nivel base o desembocadura al río Coca a 1200 m.s.n.m, recinto San Luis. (fig 1.)

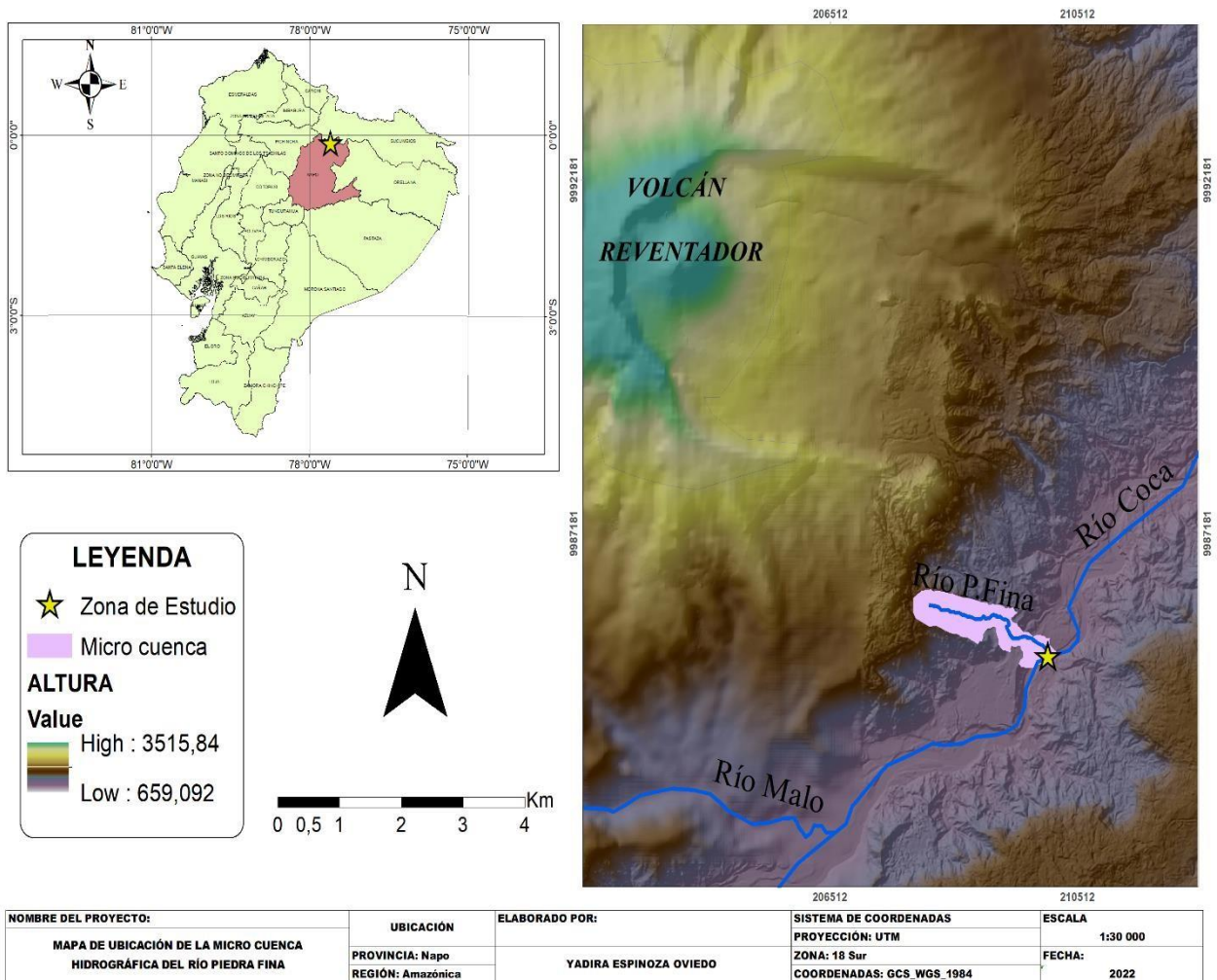


Figura 1. Mapa de ubicación de la micro cuenca hidrográfica del afluente río Piedra Fina 2 dentro de la cuenca del hidrográfica del principal río Coca.

1.5 Contexto General

1.5.1 Clima y Precipitaciones

Generalmente, la zona Subandina posee un clima de tendencia caliente a húmeda debido a presencia de colosal vegetación dentro de la región, produciendo una significativa retención de humedad.

Horna (2016) caracteriza a las precipitaciones de la Cuenca Hidrográfica del RC dentro de los meses de abril hasta julio como estación lluviosa y los meses de diciembre a febrero como estación seca. Sin embargo, considerando la orográfica sobre la micro cuenca hidrográfica del río Piedra Fina 2, la distribución de las precipitaciones se la atribuye principalmente a la presencia del volcán El Reventador mismas que descienden hacia la zona de desarrollo de este proyecto. De acuerdo a los datos satelitales disponibles en Essential Climate Variables para un período de largo plazo desde enero del año 1979 a junio del 2021, las precipitaciones totales más altas se presentan en los meses de marzo y abril y de noviembre a diciembre, por otro lado, los períodos de menor precipitación se dan en los meses de agosto y septiembre. (fig 2, ANEXO II).

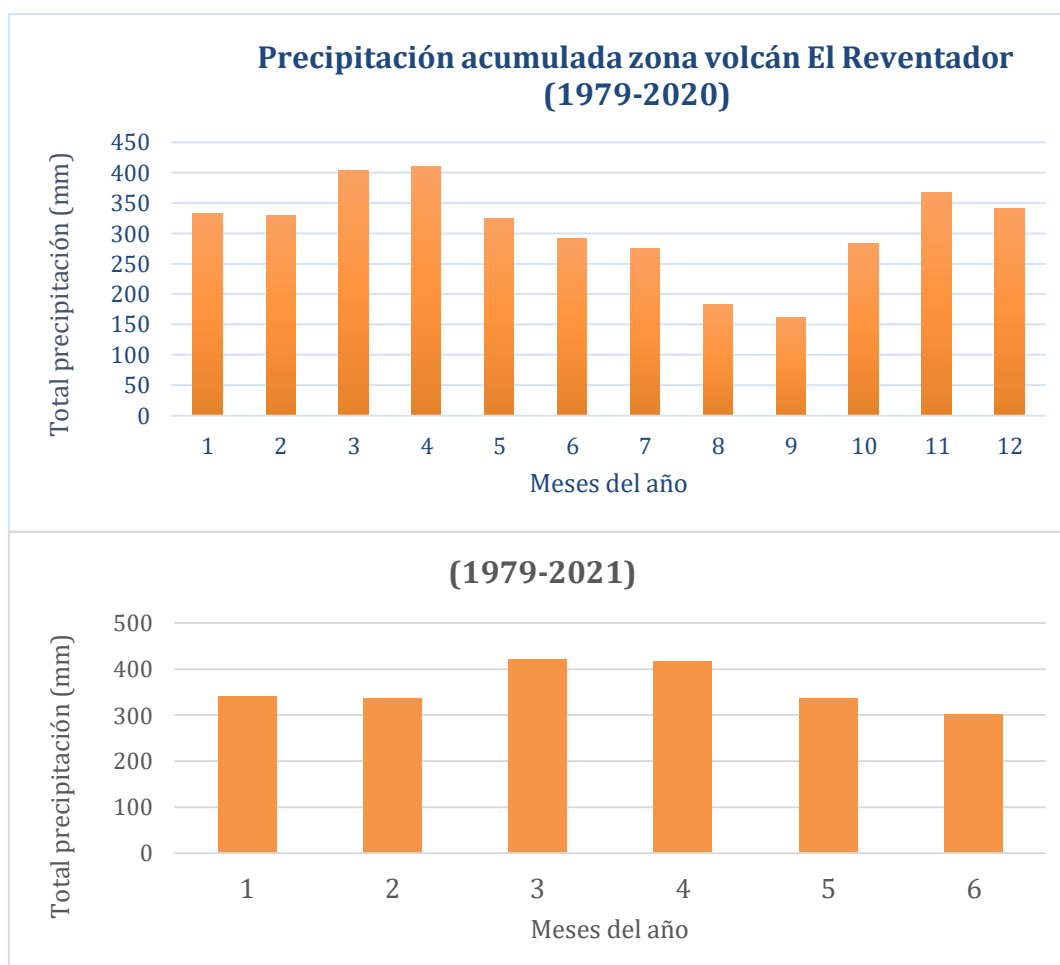


Figura 1. Precipitaciones mensuales a partir del año 1979 a 2021. Datos extraídos de: Essential Climate Variables

1.5.2 Contexto Geodinámico

Ecuador está presente en una zona de convergencia litosférica océano-continente, como consecuencia del choque a una tasa de ~ 58 mm/a entre la placa Nazca y la placa Sudamericana en dirección N83°E.(Trenkamp et al., 2002) conocido como entorno de subducción, este se encuentra presente desde aproximadamente 190 Ma con registros de actividad sísmica y volcánica

La geodinámica regional del Ecuador desde el Cenozoico hasta la actualidad ha sido compleja. En la actualidad, forma parte del denominado Cinturón de Fuego del Pacífico. La interacción de las placas tectónicas a lo largo del margen andino, han generado una zona de subducción oblicua con un acortamiento perpendicular importante hacia los ejes de la fosa, produciendo una megadeformación cortical en el margen continental, y consecuentemente expulsando y movilizándolo hacia el NNE al Bloque Nor-Andino (NAB) a través del sistema de fallas Chingual- Cosanga- Pallatanga- Puná (CCPP) (Alvarado et al., 2014)

La heterogeneidad de la placa de Nazca es la respuesta a la actividad del punto caliente de Galápagos ya que este es el responsable de la fragmentación de la placa Fallarón hace ~23 Ma y de la formación de la dorsal Carnegie, cuya edad ha sido motivo de debate, ha controlado la geodinámica actual dividiendo al Ecuador en dominios estructurales distintos, uno de ellos, la Región Oriental, constituida por la Zona Subandina y la Cuenca Oriente.

1.5.3 Geología Local

Zona Subandina

La Zona Subandina representa la zona de transición entre la Cordillera Real y la Cuenca Oriente, estructuralmente, consiste en fallas inversas de orientación N-S a NNE-NNW de alto ángulo y escala cortical (Rivadeneira & Baby, 2004). En su mayoría, la deformación es el resultado de la inversión tectónica de fallas normales pre existentes asociadas al sistema de rift Triásico Superior- Jurásico Inferior con orientación NNE-SSO (Díaz et al., 2004). Las estructuras características en la zona Subandina son en flor positivas en echelón que en su mayoría emergieron en el Mio-Plioceno y Cuaternario (Baby et al., 1999). Respecto a su morfología, la Zona Subandina se divide en tres unidades morfo-tectónicas divididas de Norte a Sur siendo (*fig 3.*):

- 1) *Levantamiento Napo*, que corresponde a un gran domo alargado, limitado al este y al oeste por fallas transpresivas donde afloran series jurásicas de la Fm.Chapiza y Misahuallí esta última, definida por primera vez como acumulaciones volcánicas de andesitas y andesitas basálticas (Watsson y Sinclair, 1927) y posteriormente se incluyeron, secuencias de tobos de cristales andesíticos y brechas volcánicas (Tschopp, 1953), así como traquitas, riolitas

y niveles conglomeráticos interestratificados con areniscas volcánicas verdes (Baldock, 1982). Posteriormente, afloran formaciones cretácicas como Hollín, Napo, Tena y depósitos cuaternarios.

El levantamiento Napo cuenta con la presencia de volcanes como el Reventador al norte de unidad, de volcanismo calco – alcalino cuya actividad se ha evidenciado desde el Plioceno (Samaniego et al., 2008) este ha registrado edificios volcánicos tales como: el Complejo Volcánico Basal, PaleoReventador II (Nieto, 1991) este colapsó debido al desplome de la antigua cámara magmática destruyendo el flanco de este edificio y la inestabilidad a la base del cono producida por erosión en el RC y el Cono actual.

Así mismo, al sur de la unidad coexisten los volcanes Pan de Azúcar y Sumaco.

- 2) *Depresión Pastaza*, donde las fallas se vuelven más cabalgantes al contacto zona Subandina-Cordillera Oriental generando estructuras anticlinales, aflora esencialmente sedimentos neógenos y cuaternarios.
- 3) *Cordillera de Cutucú*, la cual se caracteriza por un cambio de orientación de las estructuras, de N-S a NNO-SSE, se desarrolla el valle del Upano, donde se acumularon gran parte de los depósitos volcano-clásticos del volcán Sangay y la aparición de formaciones triásicas y jurásicas de la Fm. Santiago y Chapiza

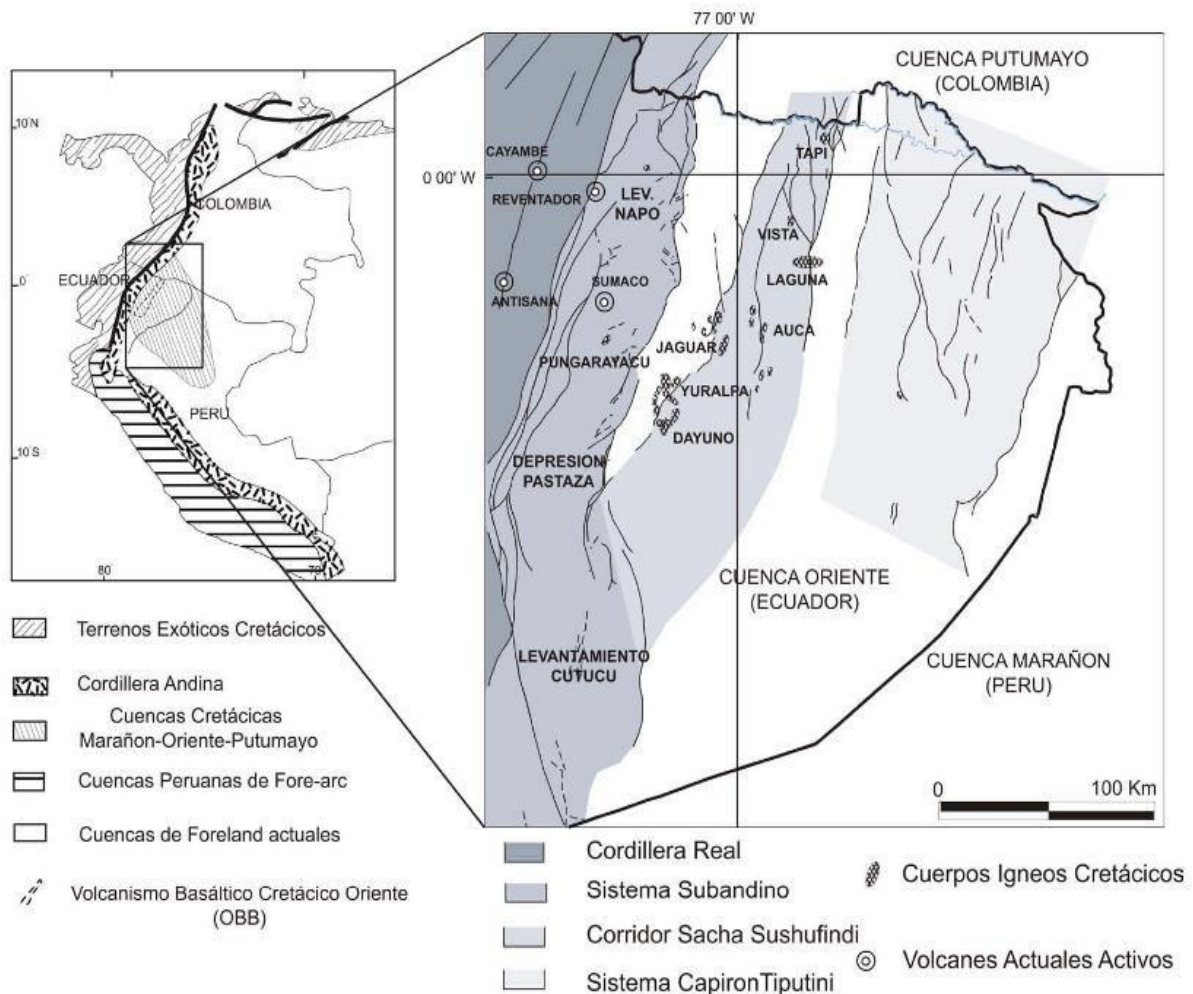


Figura 3. Mapa tectónico sintético de la Cuenca Oriente (modificado a partir de Baby et al., 1999) y su relación con la distribución de los eventos volcánicos. (Tomado de: (Barragán & Baby, 2004))

1.6 Marco Teórico

1.6.1 Geomorfología Fluvial

Los ríos se encuentran en muchos entornos diferentes y muestran una increíble diversidad de formas (Charlton, 2010). La disciplina que permite el estudio de las interacciones entre las formas y procesos de los canales fluviales en diversas escalas espaciales y temporales se denomina Geomorfología Fluvial.

Los distintos sistemas fluviales se caracterizan por la morfología que presentan los drenajes

1.6.2 Sistema Fluvial

Un sistema fluvial es el conjunto de redes de drenaje naturales en una cuenca hidrográfica, Este sistema se caracteriza por procesos dinámicos como el transporte, sedimentación y erosión fluvial que se dan en respuesta a las diferentes modificaciones del clima o geología. En la historia geológica de la Tierra, esta situación ha hecho que el sistema fluvial fluctúe en el tiempo, sin embargo, en el Antropoceno el cambio climático y las actividades antrópicas se han mostrado como factores importantes a la hora de modificar los procesos de erosión-sedimentación-transporte en los Sistemas Fluviales.

Los sistemas fluviales poseen un drenaje principal el cual fluye pendiente abajo debido a la acción de la gravedad y él cual es alimentado por otros drenajes secundarios conocidos como ríos tributarios o afluentes. Tres zonas son diferenciables en un sistema fluvial y varían según el tipo de trabajo que se realice en el tramo del río estudiado: transporte, erosión y depositación.

- *Zona 1* es el área de producción de escorrentía y sedimentos, se define como el área superior de la cuenca.
- *Zona 2* área de transferencia de material resultante de la zona 1
- *Zona 3* se produce la sedimentación (abanicos aluviales, deltas, llanuras de inundación) (Schumm, 1977)

1.6.3 Dinámica Fluvial

1.6.3.1 Erosión

Es la separación de partículas de suelos y rocas que han sufrido procesos de alteración, disgregación o meteorización previa debido a la acción de agentes como el agua, hielo o viento. La cantidad de materiales erosionados comúnmente se mide en T/Km² y varían según el clima local (que contrasta las precipitaciones), la cobertura vegetal, la actividad antrópica, así como el tipo de suelo.

1.6.3.2 Transporte de sedimentos

Es el traslado de partículas de suelo y/o rocas de diferentes tamaños, desprendidas por procesos de meteorización, mediante la acción de un fluido.

Los tipos de sedimento que transportan los ríos, (*fig 4.*) se clasifican en:

- *Carga de fondo*: en el lecho de río se movilizan cantos, arenas, gravillas y bloques con una velocidad menor al flujo del agua. Por la acción del agua o el viento el material es desplazado por rodadura, saltación o arrastre.
- *Carga en suspensión*: cuando sedimentos finos de arcilla, limo y arena por ser menos densos quedan suspendidos en el agua sin topar la base del río.
- *Carga en disolución*: el paso del agua por materiales solubles genera el transporte de iones y moléculas originarios de la meteorización de la roca los cuales se movilizan disueltos en el flujo.

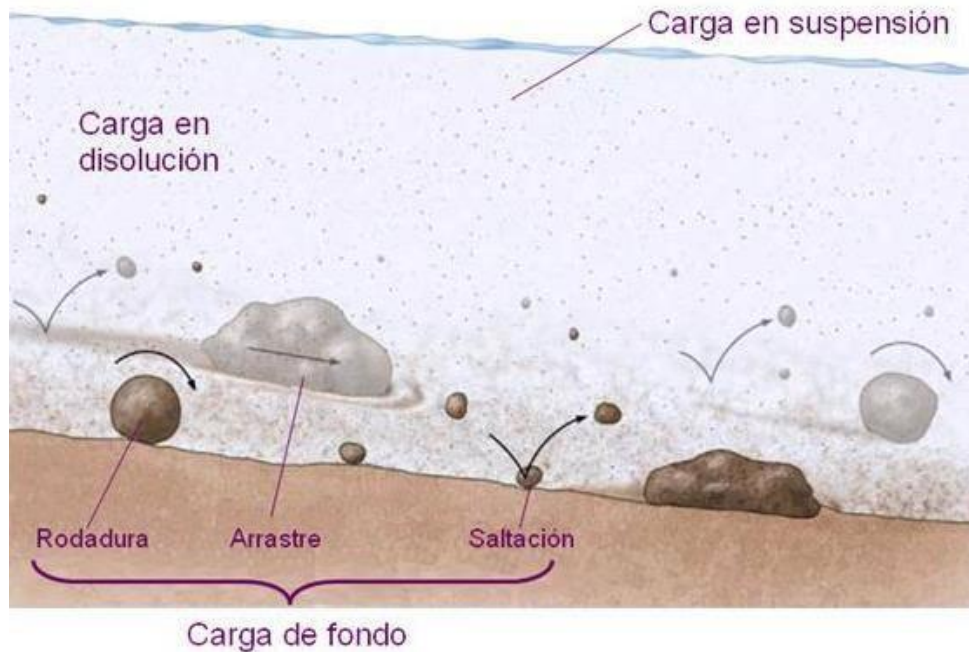


Figura 4. Tipos de sedimentos (Tomada de Dirección General de Televisión Educativa. Sitio Web: <https://nuevaescuelamexicana.sep.gob.mx/>)

1.6.3.3 Sedimentación

Se define como el proceso de acumulación de materiales transportados. La sedimentación se da en presencia de un flujo y conlleva una granoselección, ya que los materiales de gran tamaño se depositan cerca a la fuente y finaliza con materiales más pequeños a medida que el río pierde energía debido a la disminución de la velocidad.

1.6.4 Movimientos en masa

El movimiento en masa se refiere a rocas, tierra o detritos que han sido movidos ladera abajo por efecto de la gravedad (Cruden, 1991) se originan debido al debilitamiento progresivo de las propiedades mecánicas de los materiales de las vertientes por procesos naturales como

meteorización, levantamientos tectónicos así como actividades humanas que activan movimientos lentos, generalmente imperceptibles (Soeteres & van Westen, 1996).

1.6.4.1 Clasificación de tipos movimientos en masa

El criterio principal para los movimientos en masa y su clasificación son el tipo de movimiento y material como suelo o roca o una combinación de ambas, propuesto en primera instancia por (Varnes ,1978) y modificada años posteriores por (Cruden & Varnes,1996). Las clasificaciones empleadas por estos autores son (*fig 5.*):

- **Caídas** se refiere al movimiento de uno a varios bloques de suelo o roca, que alcanzan velocidades superiores de hasta 100 mm/s. generando posibles rebotes y rodamiento
- **Deslizamientos** ocurridos ladera abajo, sobre una superficie de falla o zona de gran deformación según su forma pueden ser *deslizamientos traslacionales*, los cuales generalmente ocurren discontinuidades planas como diaclasamiento, estratificación o fallas alcanzando velocidades de entre 1,8 m/h a 5 m/s por otro lado, existen los *deslizamientos rotacionales* los cuales se generan en una superficie de falla curva y cóncava, un escarpe principal es característico así como una contrapendiente de la superficie de la cabeza del deslizamiento hacia el escarpe principal, posee velocidades menores a 1 m/s.
- **Volcamiento** rotación comúnmente hacia delante de uno o varios bloques de suelo o roca Este movimiento ocurre por acción de la gravedad, por empujes de las unidades adyacentes o por la presión de fluidos en grietas (Varnes, 1978).
- **Flujos** se forman a menudo a partir de otro movimiento pudiendo ser una caída o un deslizamiento, este se caracteriza por tener una dinámica semejante a la de un flujo, sea lento, rápido, seco o saturado. Su trayectoria puede ser dentro de un canal pre-establecido o en áreas mayormente abiertas de laderas de alta inclinación.
- **Propagación lateral** debido a la deformación interna del material, es decir, expansión Varnes (1978) caracteriza este movimiento en, uno, cuando afecta a todo el material comúnmente en masas rocosas, y dos, cuando ocurre en suelos cohesivos que sobreyacen a materiales que han sufrido licuefacción o a materiales en flujo plástico.

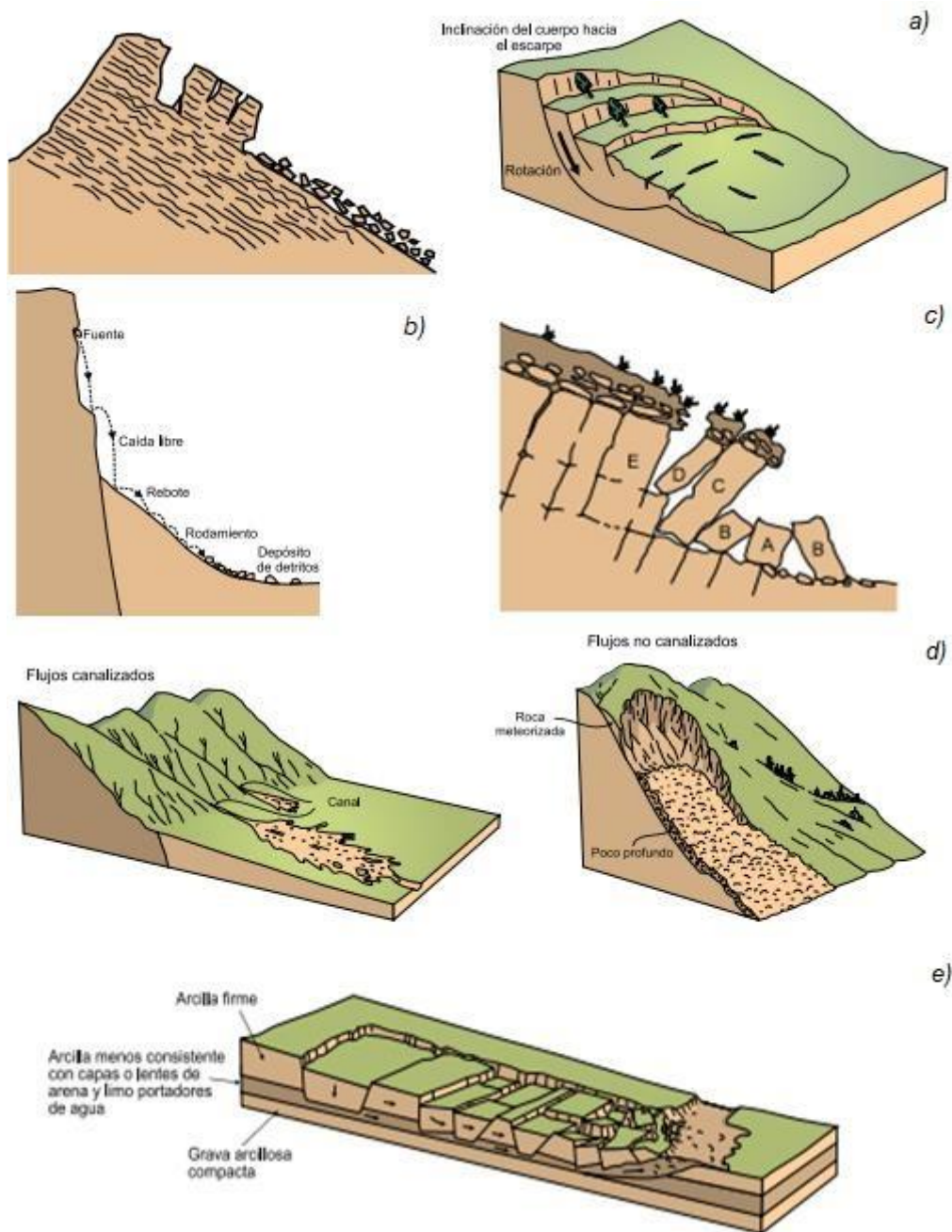


Figura 5. Esquemas de a) deslizamientos traslacional y rotacional b) caída de rocas c) volcamiento d) flujos canalizados y no canalizados según Cruden y Varnes (1996) e) expansiones laterales. Modificado de: Proyecto Multinacional Andino

1.6.5 Cuenca Hidrográfica

La cuenca hidrográfica es la unidad fisiográfica conformada por el conjunto de los sistemas de cursos de agua definidos por el relieve. Los límites de la cuenca o divisoria de aguas se definen naturalmente y corresponden a las partes más altas del área que encierra un río. La cuenca se divide en subcuencas y microcuencas.

El área de la subcuenca está delimitada por la divisoria de aguas de un afluente, que forma parte de otra cuenca, que es la del cauce principal al que fluyen sus aguas. La microcuenca es una agrupación de pequeñas áreas de una subcuenca o de parte de ella (Ramakrishna, 1997).

1.6.5.1 Curva hipsométrica

Es la representación obtenida con datos significativos de elevación del terreno del comportamiento de la altitud de una cuenca hidrográfica y la dinámica del ciclo erosivo.

Se obtiene colocando en las ordenadas los valores correspondientes a las diferentes alturas de la cuenca referidos a la máxima de la misma y, en las abscisas, los valores de área que se encuentran por encima de las alturas correspondientes, referidos al área total de la cuenca. Cuando las curvas hipsométricas presentan variaciones, ya sea por apartarse de las teóricas o por presentar más de un punto de inflexión, ello puede relacionarse con controles tectónicos o litológicos. (Racca, 2007)

El valor del área relativa que yace bajo la curva es indicativo del estado de desarrollo de la cuenca; valores superiores al 60 % indican desequilibrio manifiesto en el funcionamiento de la cuenca o potencial erosivo; fase de juventud, valores rondando el 47 % representan equilibrio; fase de madurez e inferiores a 30% implican una cuenca sedimentaria; fase de senectud. (*fig 6.*)

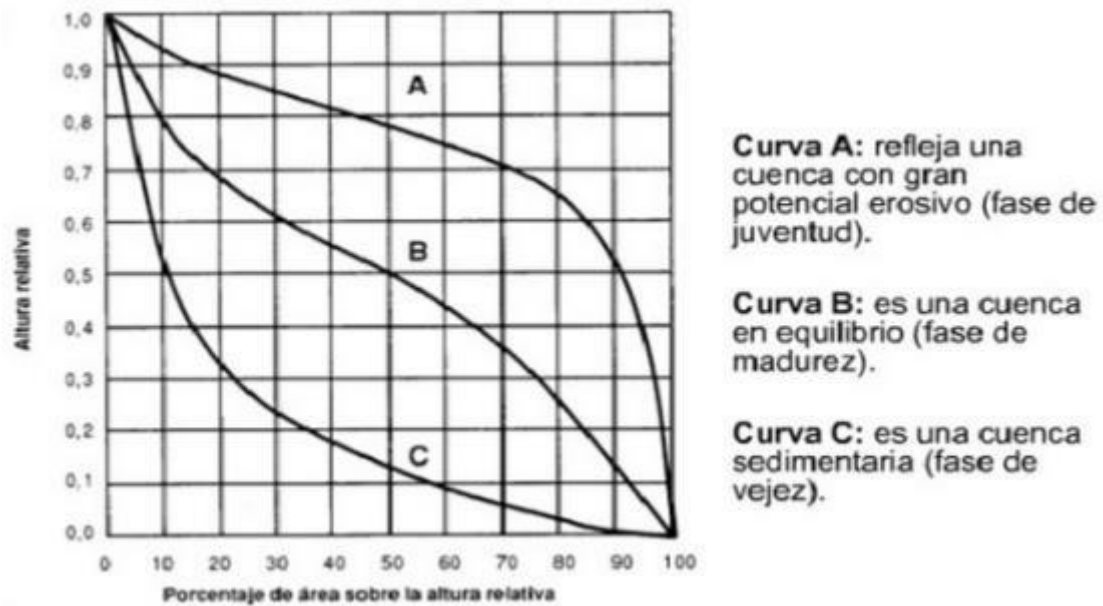


Figura 6. Curvas hipsométricas características del ciclo de erosión según Strahler 1952

1.6.6 Perfil Longitudinal de un río

Un perfil longitudinal de un río es la representación gráfica de diferentes alturas del flujo a partir de su nacimiento hasta su nivel base, este refleja las particularidades del relieve de una cuenca especialmente en el predominio de un régimen erosivo, así como el registro de la evolución del drenaje, deformación de la corteza o cambios de clima.

Para cuantificar los patrones de la evolución geomorfológica, tectónica y climática de un río se considera un nivel de referencia denominado perfil de equilibrio mismo que se refiere a un estado en el que las variables que actúan y el nivel base son constantes (Mackin, 1948). Representa la capacidad de un río para compensar erosión, transporte y sedimentación en todas las partes de su extensión y mantener así un perfil longitudinal suave de equilibrio.

Hack (1973) desarrolló un método para el análisis del perfil longitudinal de un río basado en la relación que existe entre la distribución de la pendiente y su longitud. A esa proporción le denominó índice de gradiente (SL) y está íntimamente relacionado con la capacidad de transporte del río de manera que es constante cuando el perfil está en equilibrio y no se dan cambios en la composición y tamaño medio de los materiales del lecho. (fig 7.)

$$SL = \frac{\Delta H \times L}{\Delta L}$$

Ecuación 1. Índice de gradiente

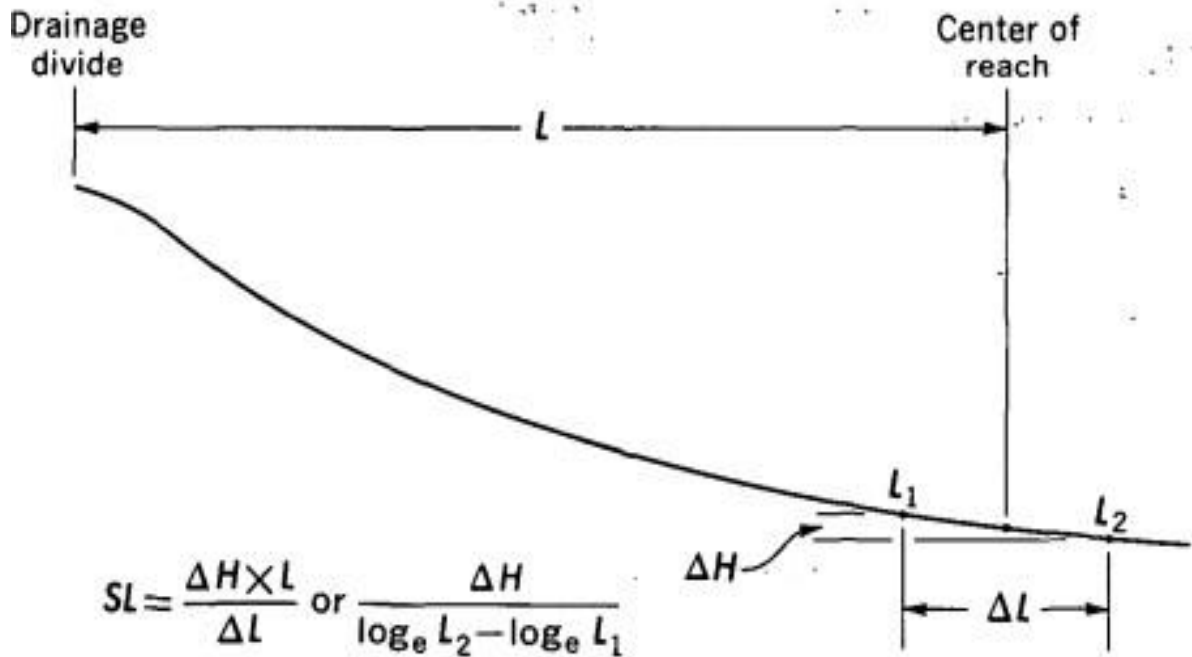


Figura 7. Parámetros usados para el índice de gradiente SL

Partiendo de este modelo, (Jiménez-Cantizano et al., 2017) establece que un río en equilibrio presenta un perfil cóncavo que se ajusta a una distribución logarítmica de la forma:

$$H = H_0 - SL \cdot \ln(L)$$

Ecuación 2. Para calcular un río en equilibrio

donde H es la altitud de cada punto del perfil, H₀ es la cota de la cabecera (punto más alto), SL el índice de gradiente y L es la distancia de cada punto del perfil respecto de la cabecera, medida hacia aguas abajo.

1.6.6.1 Knickpoints

Los knickpoints representan cambios transitorios o irregularidades en el perfil longitudinal de un río, son expresión del desequilibrio de un sistema fluvial y pueden estar presentes tanto en ríos aluviales como en ríos en lecho rocoso. Los avances en geomorfología fluvial y evolución del paisaje indican que los knickpoints resultan de distintos procesos tectónicos, climáticos y geomorfológicos (Castillo & Lugo Hubp, 2011).

La presencia de Knickpoints se relaciona a varios procesos de erosión diferencial asociada a contactos litológicos, zonas activas de levantamiento, control litológico-estructural, así como descensos bruscos del nivel de base de los ríos. (fig 8.)

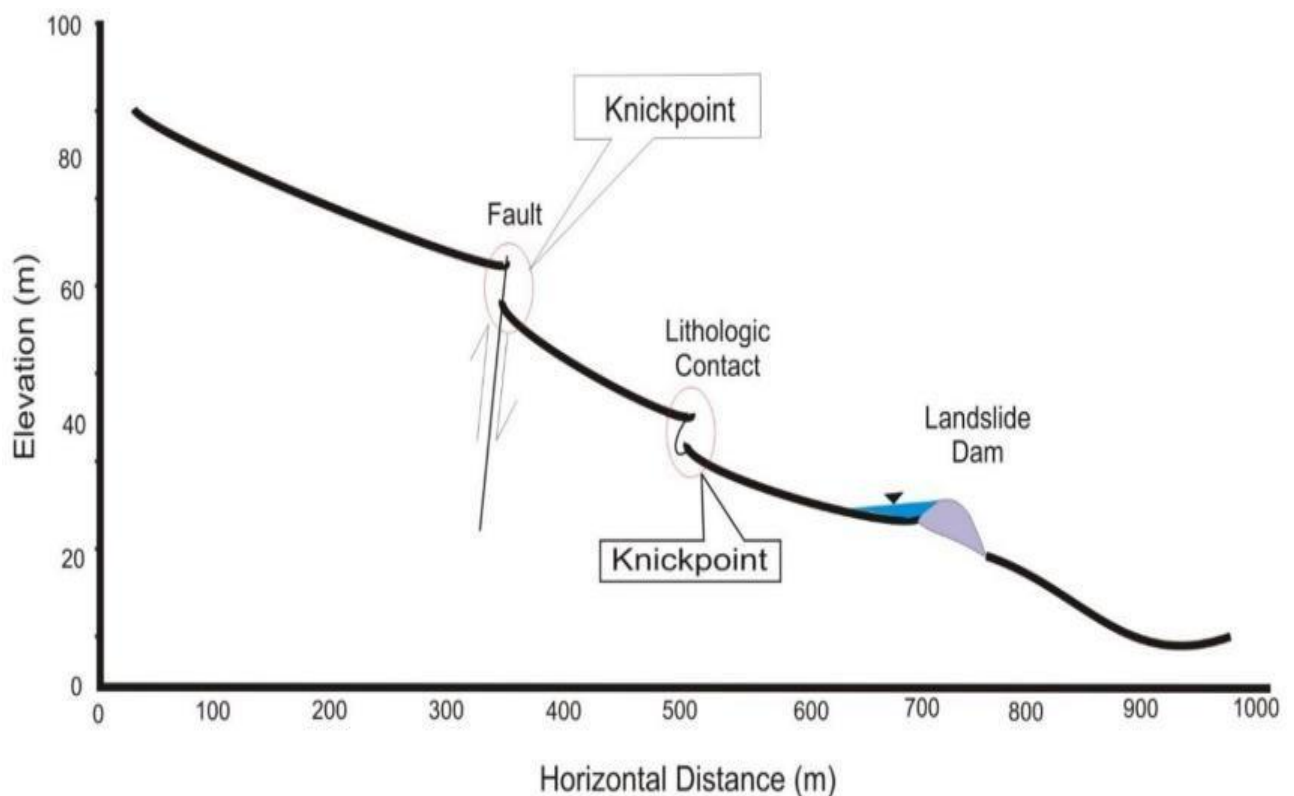


Figura 8. Representación esquemática de los factores formadores de knickpoints en el perfil longitudinal de un río. Fuente: ((Ahmed et al., 2019))

1.6.6.2 Pendiente media del cauce principal

Determina el comportamiento del flujo de agua, la pendiente del cauce de un río, varía en distintos segmentos o tramos a lo largo del mismo, de tal manera que se calcula la pendiente media del cauce mediante la ecuación de (Taylor & Schwarz, 1952):

$$S = \left[\frac{L}{\frac{l_1}{\sqrt{S_1}} + \frac{l_2}{\sqrt{S_2}} + \dots + \frac{l_n}{\sqrt{S_n}}} \right]^2$$

Ecuación 3. Pendiente media del cauce principal de Taylor & Schwarz

Donde

S pendiente media del cauce principal

L la longitud del cauce principal

ln longitudes de los n tramos del cauce principal

Sn pendientes de dichos tramos

2 METODOLOGÍA

2.1 Recopilación de información

Se dispuso de información de orto fotografías y modelos digitales de terreno disponibles de instituciones como el Sistema Nacional de Información de Tierras Rurales e Infraestructura Tecnológica (SIGTIERRAS) y Oleoducto de Crudos Pesados (OCP), esta información se detalla en la *Tabla 1*.

Nombre del archivo	Fecha	Resolución	Tipo	Fuente
OIII-A2d-A3.tif	2012	5 [m]	DTM	SIGTIERRAS
OIII-A2d-D1.tif	2012	5 [m]	DTM	SIGTIERRAS
OIII-A2d-A3.jp2	2012	0,3 [m]	Ortofoto	SIGTIERRAS
OIII-A2d-D1.jp2	2012	0,3 [m]	Ortofoto	SIGTIERRAS
Monitoreo_14_julio_2020_dtm.tif	2020/07/14	0,4 [m]	DTM	OCP
Monitoreo_ transparent_mosaic_group1.tif	2020/07/14	0,08 [m]	Ortofoto	OCP
Monitoreo_12_octubre_2020_dtm.tif	2020/10/12	0,4 [m]	DTM	OCP
Monitoreo_ transparent_mosaic_group1.tif	2020/10/12	0,08 [m]	Ortofoto	OCP
Monitoreo_18_enero_2021_dtm.tif	2021/01/18	0,4 [m]	DTM	OCP
Monitoreo_ transparent_mosaic_group1.tif	2021/01/18	0,08 [m]	Ortofoto	OCP
Monitoreo_12_abril_2021_dtm.tif	2021/04/12	0,4 [m]	DTM	OCP
Monitoreo_ transparent_mosaic_group1.tif	2021/04/12	0,08 [m]	Ortofoto	OCP
Monitoreo_12_julio_2021_dtm.tif	2021/07/12	0,4 [m]	DTM	OCP
Monitoreo_ transparent_mosaic_group1.tif	2021/07/12	0,08 [m]	Ortofoto	OCP
Monitoreo_04_octubre_2021_dtm.tif	2021/10/04	0,4 [m]	DTM	OCP
Monitoreo_ transparent_mosaic_group1.tif	2021/10/04	0,08 [m]	Ortofoto	OCP
Monitoreo_24_enero_2022_dtm.tif	2022/01/24	0,4 [m]	DTM	OCP
Monitoreo_ transparent_mosaic_group1.tif	2022/01/24	0,08 [m]	Ortofoto	OCP
Monitoreo_18_abril_2022_dtm.tif	2022/04/18	0,4 [m]	DTM	OCP

Monitoreo_ transparent_mosaic_group1.tif	2022/04/18	0,08 [m]	Ortofoto	OCP
Monitoreo_06_julio_2022_dtm.tif	2022/07/06	0,4 [m]	DTM	OCP
Monitoreo_ transparent_mosaic_group1.tif	2022/07/06	0,08 [m]	Ortofoto	OCP

Tabla 1. Modelo digital de Terreno y Ortofotografías recopiladas para el estudio.

ArcMap 10.3 fue el software utilizado para realizar análisis respecto a los modelos digitales de terreno e imágenes satelitales con el sistema de proyección de coordenadas WGS 84, hemisferio sur zona 18. Las ortofotografías obtenidas de secciones por separado en diferentes bandas de color, se procesaron en el programa mediante la herramienta *Composite Bandas* disponible el catálogo Toolboxes.

2.2 Delimitación micro cuenca hidrográfica

La zona de estudio refiere a la micro cuenca hidrográfica del río Piedra Fina 2 la cual se delimitó con el DTM de resolución 5 [m] del año 2012 del Sig Tierras empezando con las herramientas de *Spacial Analysis Tools > Hidrology > Fill > Flow direction > Flow accumulation* estas últimas tres mencionadas permiten rellenar huecos presentes en el DTM, identificar la dirección del flujo en base a la pendiente e identificar los principales cauces de agua respectivamente. Seguidamente en la misma herramienta *Spacial Analysis Tools > Hidrology* se utilizó la opción *>Basin* delimitando así la micro cuenca del río Piedra Fina 2.

2.3 Red hidrográfica

Se monitorea la evolución de la red hidrográfica de la microcuenca del río Piedra Fina 2 para los diferentes modelos digitales de elevación de terreno disponibles en diferentes fechas (*Tabla 1*) permitiendo así analizar la evolución del cauce principal como consecuencia del fenómeno de erosión regresiva.

Las herramientas de Arc Tool Box requeridas son *Spacial analys tools > Map algebra > Raster calculator*, donde se considera la operación *>log10 para* identificar los principales cauces de agua y el condicional *>con* utilizando el raster *flow accumulation* creado en el paso anterior, esto para obtener continuidad en la red. Finalmente, en *Spacial Analysis Tools > Hidrology > Stream link > Stream orden y Stream to feature* se ordena la red y se configura las etiquetas y simbologías que caracterizan al cauce principal y sus respectivos flujos secundarios.

2.4 Curva hipsométrica

Con el DEM 5 [m] del año 2012 delimitado la micro cuenca, mediante la herramienta Spatial Analyst Tool se realiza una reclasificación de intervalos del área de estudio. (Tabla 2)

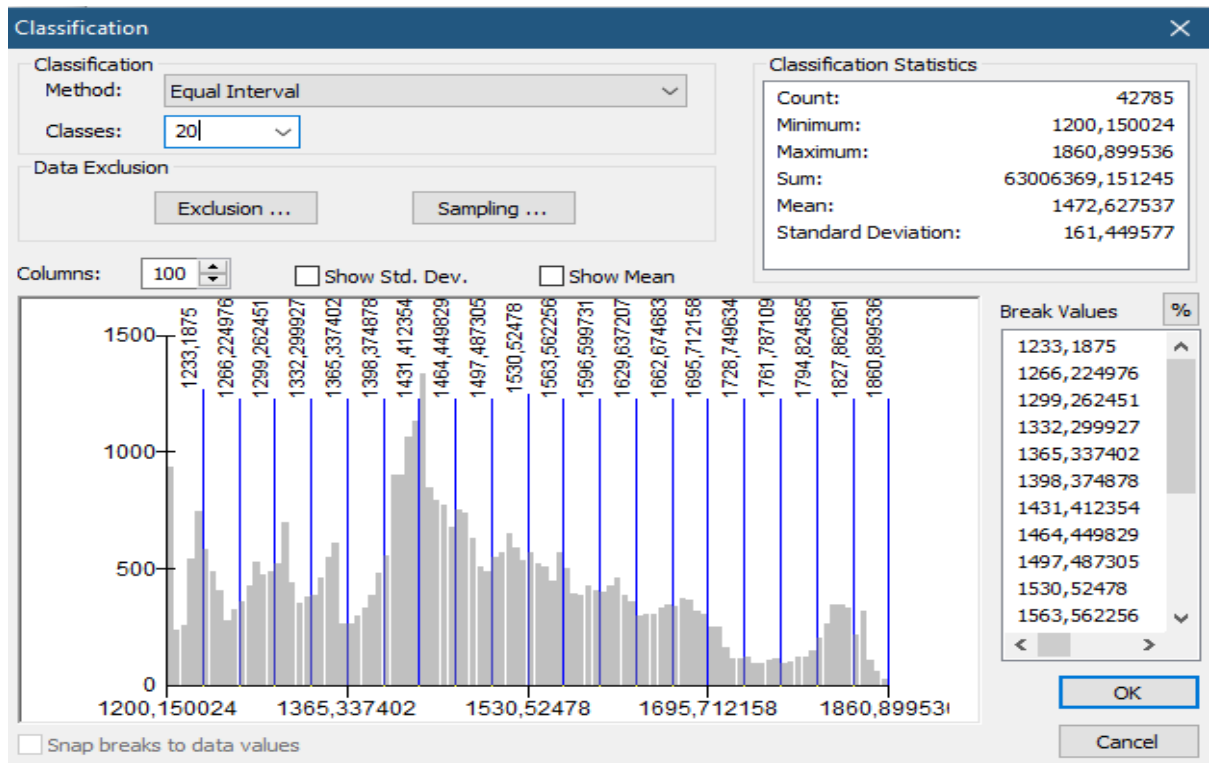


Tabla 2. Reclasificación de intervalos, áreas entre curvas de nivel. DTM de la micro Cuenca de río Piedra Fina 2

Para obtener los parámetros necesarios de cotas mínimas, máximas y de áreas entre curvas de nivel, junto a otros, estos datos se asignan en la tabla de datos estadísticos, *Spatial Analyst Tool* > *Zonal* > *Zonal statistics as table*. (Tabla 3)

Rowid	VALUE	COUNT	AREA	MIN	MAX	RANGE	MEAN	STD	SUM
1	1	2717	68052,829727	1200,150024	1233,180786	33,030762	1216,0681	11,963657	3304057,028076
2	2	2085	52223,095319	1233,19751	1266,223633	33,026123	1247,349805	9,633323	2600724,343384
3	3	2271	56881,846268	1266,241211	1299,239502	32,998291	1283,666395	9,154667	2915206,383789
4	4	2392	59912,53909	1299,274902	1332,29248	33,017578	1313,979433	9,258857	3143038,803955
5	5	2279	57082,222653	1332,304565	1365,312256	33,00769	1348,494989	8,562674	3073220,080322
6	6	1754	43932,522393	1365,373901	1398,371704	32,997803	1383,972761	9,571925	2427488,223145
7	7	4545	113838,83368	1398,375977	1431,400269	33,024292	1416,884073	9,125519	6439738,110229
8	8	4422	110758,046762	1431,426025	1464,447388	33,021362	1445,816343	9,734085	6393399,867798
9	9	3122	78196,884213	1464,451172	1497,485352	33,03418	1479,328808	9,371681	4618464,537842
10	10	2895	72511,204291	1497,505859	1530,516602	33,010742	1514,003431	9,29942	4383039,932007
11	11	2613	65447,936723	1530,543945	1563,561646	33,0177	1546,801617	9,828674	4041792,626343
12	12	2116	52999,55381	1563,568848	1596,539063	32,970215	1579,534093	9,802606	3342294,141235
13	13	2039	51070,931105	1596,614624	1629,630737	33,016113	1612,684309	9,30635	3288263,305908
14	14	1593	39899,947646	1629,637817	1662,66626	33,028442	1646,544767	9,55594	2622945,813721
15	15	1706	42730,264083	1662,684204	1695,66272	32,978516	1678,680027	9,333679	2863828,12561
16	16	902	22592,437399	1695,757935	1728,735596	32,977661	1709,16674	9,189345	1541668,399414
17	17	540	13525,405982	1728,768799	1761,72583	32,957031	1745,158451	9,87085	942385,563599
18	18	579	14502,240858	1761,968506	1794,822144	32,853638	1779,917003	9,571477	1030571,944458
19	19	1484	37169,819402	1794,929688	1827,824341	32,894653	1812,926067	8,956826	2690382,283691
20	20	731	18309,392172	1827,870117	1860,899536	33,029419	1838,385276	7,1289	1343859,636719

Tabla 3. Parámetros estadísticos calculados a partir de la reclasificación de intervalos en áreas de curvas de nivel en el DTM de la micro Cuenca de río Piedra Fina 2

Con los valores obtenidos en la (Tabla 3) se realizaron los cálculos respectivos para encontrar en cada intervalo de altura el área acumulada y su porcentaje, de esta manera se adquiere el porcentaje de área acumulada para representarlo en el eje x de la curva hipsométrica y en el eje Y el promedio de las alturas. (Tabla 4)

No	COTAS (m.s.n.m)		Coeficiente de altitud relativa (h/H)	Área (km ²)			Coeficiente de área realtiva (a/A)
	Min	Max		Área entre curvas	Área acumulada (a)	% Área acumulada	
1	1200	1233	0,66	68	1072	100	1
2	1233	1266	0,68	52	1004	94	0,9
3	1266	1299	0,70	57	951	89	0,9
4	1299	1332	0,72	60	894	83	0,8
5	1332	1365	0,73	57	835	78	0,8
6	1365	1398	0,75	44	777	73	0,7
7	1398	1431	0,77	114	734	68	0,7
8	1431	1464	0,79	111	620	58	0,6
9	1464	1497	0,80	78	509	47	0,5
10	1498	1531	0,82	73	431	40	0,4
11	1531	1564	0,84	65	358	33	0,3
12	1564	1597	0,86	53	293	27	0,3
13	1597	1630	0,88	51	240	22	0,2
14	1630	1663	0,89	40	189	18	0,2
15	1663	1696	0,91	43	149	14	0,1
16	1696	1729	0,93	23	106	10	0,1
17	1729	1762	0,95	14	84	8	0,1
18	1762	1795	0,96	15	70	7	0,1
19	1795	1828	0,98	37	55	5	0,1
20	1828	1861	1	18	18	2	0,0
Área total (km²)				1072			
Cota máxima (m.s.n.m)				1861			

Tabla 4. Cálculo de parámetros necesarios para realizar la curva hipsométrica

2.5 Perfil longitudinal

Una vez definido el cauce principal del río en la micro cuenca del Piedra Fina 2, mediante la herramienta 3D Analyst se selecciona el DTM al cual se quiere trabajar, en este estudio, se seleccionaron los catorce DTMs disponibles para la evaluación de río Piedra Fina 2. Considerando un período de variación trimestral entre el año 2020 al 2022.

Seguidamente, se interpola el cauce principal mediante un trazado de línea desde la cota de la cabecera (más alta) hacia la cota del nivel base o desembocadura (más baja) para posteriormente crear el perfil longitudinal con la herramienta *Profile Graph* esta representación

toma los valores de altura en el eje y así como la distancia recorrida para el eje x. *Profile Graph* permite guardar los valores de los puntos representados en el perfil.

La representación gráfica de un río en equilibrio se lo hace mediante un perfil con curva cóncava respecto a la formula logarítmica (*Ecuación 2*) expresada por (Jiménez-Cantizano et al., 2017).

El cálculo de estos valores y la representación gráfica se realizaron en el programa MATLAB R2020a.

2.6 Levantamiento geológico

Para el levantamiento geológico se realizó una cartografía a escala 1:2 500 con el uso de información de fotografías aéreas y modelos digitales de terreno de la (*Tabla 1*) y de estudios previos evidenciando las variaciones geomorfológicas y litológicas de la zona de estudio. Se identificaron estructuras antrópicas como la antigua carretera Quito-Lago Agrio, puente Piedra Fina 2 y el tramo de tubería del oleoducto OCP

Se realizaron visitas al campo donde se desarrolló una descripción de los afloramientos presentes con la toma de muestras de mano describiendo color, tamaño de grano, composición, texturas, estructuras y minerales posteriormente, se realizaron láminas delgadas para corroborar el tipo de litología presente en la zona

De esta manera, se procederá a realizar un mapa geológico de la micro cuenca hidrográfica del río Piedra Fina 2 junto con el uso de curvas de nivel procesadas en el programa ArcGis 10.3

2.7 Preparación de láminas delgadas

En el laboratorio de láminas delgadas se procedió a cortar las muestras con dimensiones de 27*46mm en la máquina pulidora se lustra una de las caras para eliminar impurezas, repetimos el procedimiento con la máquina devastadora con lijas de carburo de silicio de 400 grits, 600 grits, 1200 grits y 2500 grits hasta obtener un acabado brillante y uniforme para evitar las burbujas, se procedió a pegar la cara pulida con epoxy en una lámina petrográfica y se dejó secar. Una vez endurecida la muestra se cortó la parte de la cara pulida con un espesor de aproximadamente de 1 mm y se rebajó hasta un aproximado de 30 micras en la máquina pulidora. Para un acabado final, a mano, con pulimentos de carburo de silicio de 400 grits, 800 grits y 1200 grits se alcanzó el espesor deseado para finalmente cubrir la lámina delgada con bálsamo de Canadá y con un portaobjetos. Finalmente, se realizó un análisis mineral en el microscopio petrográfico.

2.7.1 Conteo modal

Para la identificación del tipo de roca presente en este estudio, se realizó el conteo modal para los diferentes minerales presentes en las muestras de láminas delgadas vistas al microscopio petrográfico mediante el software JMicroVision el cual permite cuantificar y estimar el porcentaje de minerales principales, acompañantes y accesorios dentro de cada lámina.

Dentro de este programa, una vez identificada la imagen que se desea analizar, seleccionamos la opción *>Point Counting* misma que permite seleccionar la opción *>Class Editor* donde se añadirá todos los minerales vistos en el microscopio para finalizar, la opción *>Start* despliega una ventana de propiedades donde se eligió el tipo de grilla y el límite de puntos de conteo a realizarse, en este estudio, se tomaron cien puntos de conteo para cada muestra (fig 9.)

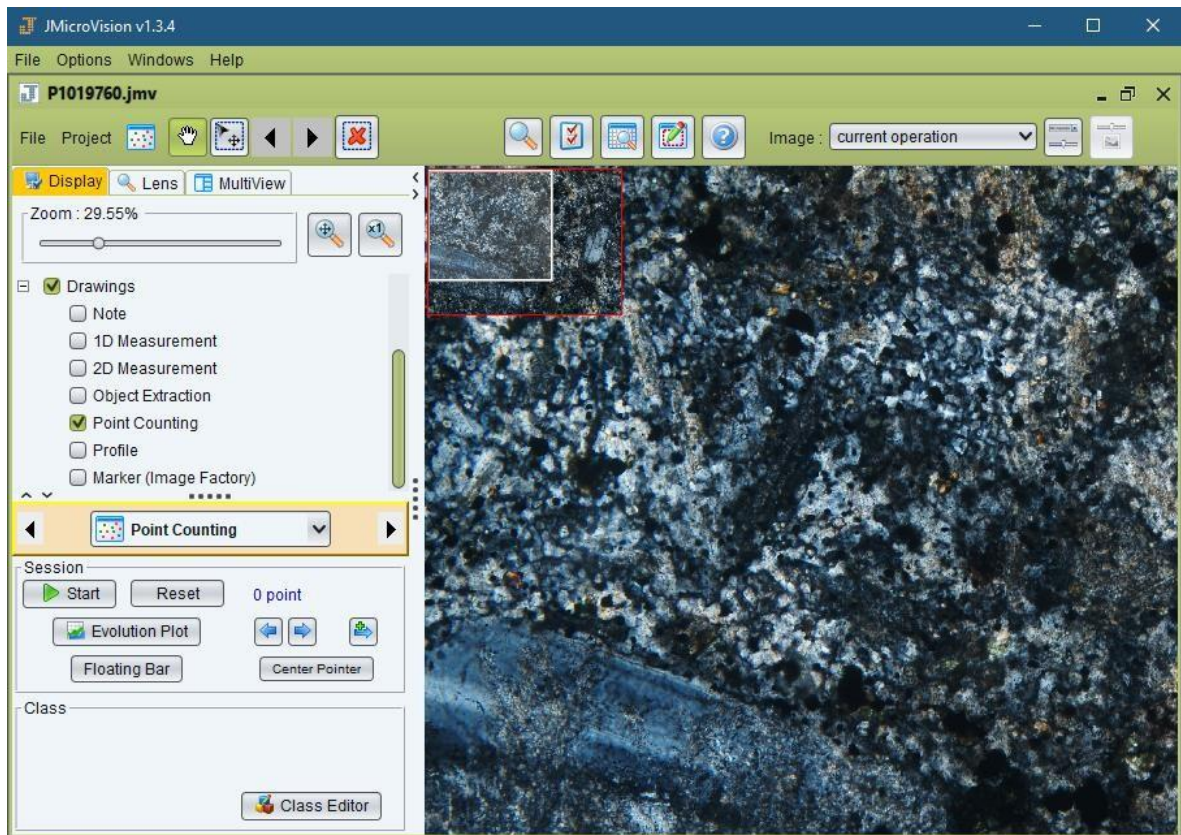


Figura 9. Ventana de herramientas del Software JMicroVision utilizado en este estudio

Los resultados obtenidos en porcentajes de este análisis se platearon en el software WinRock V8.8 el cual mediante una hoja de cálculo facilita la ilustración de los diagramas de clasificación de rocas ígneas intrusivas y extrusivas

3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1 Resultados

3.1.1 Delimitación micro cuenca hidrográfica

Se identificó la red de drenaje del río afluente al principal río Coca, Piedra Fina 2, así como el río Piedra Fina 1 dentro del orden de cauces, de esta manera se delimito el área de la micro cuenca hidrográfica la cual facilitara el análisis de la zona de estudio. (fig 10.)

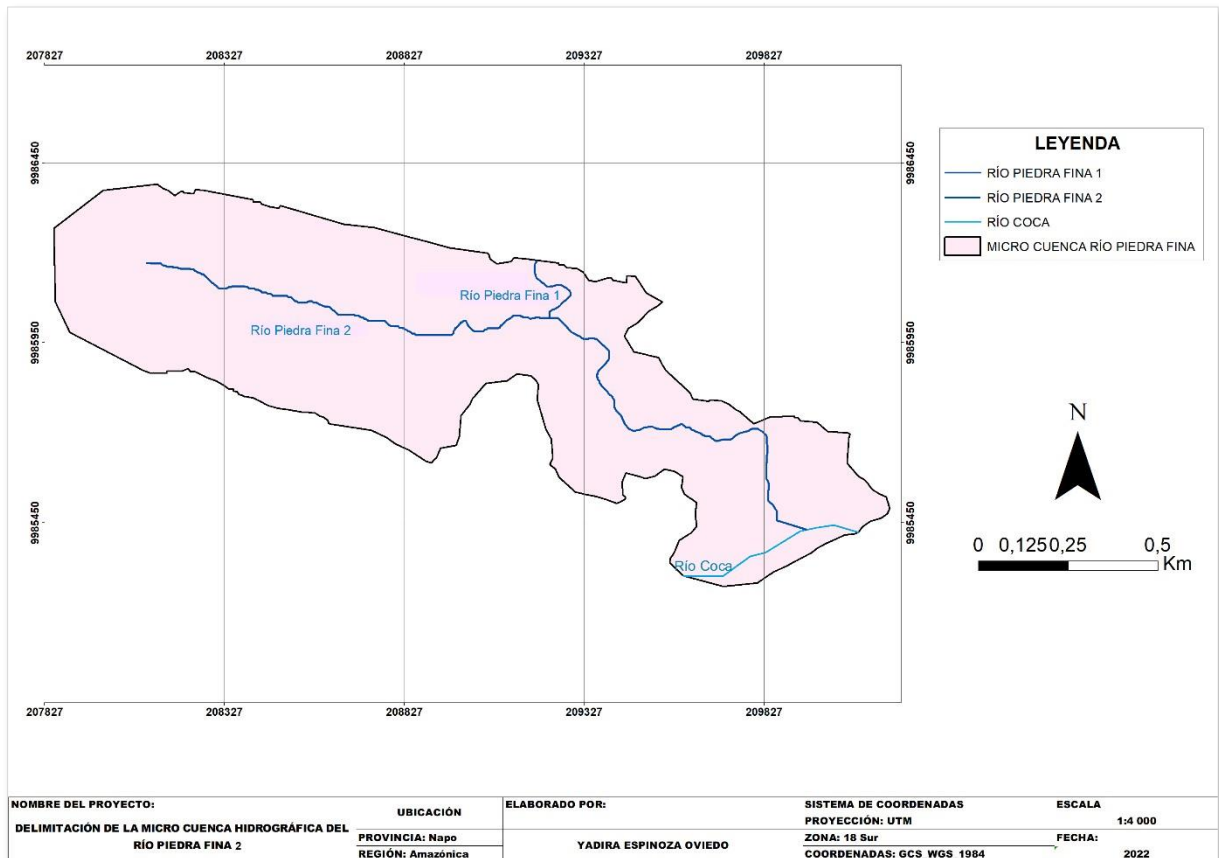
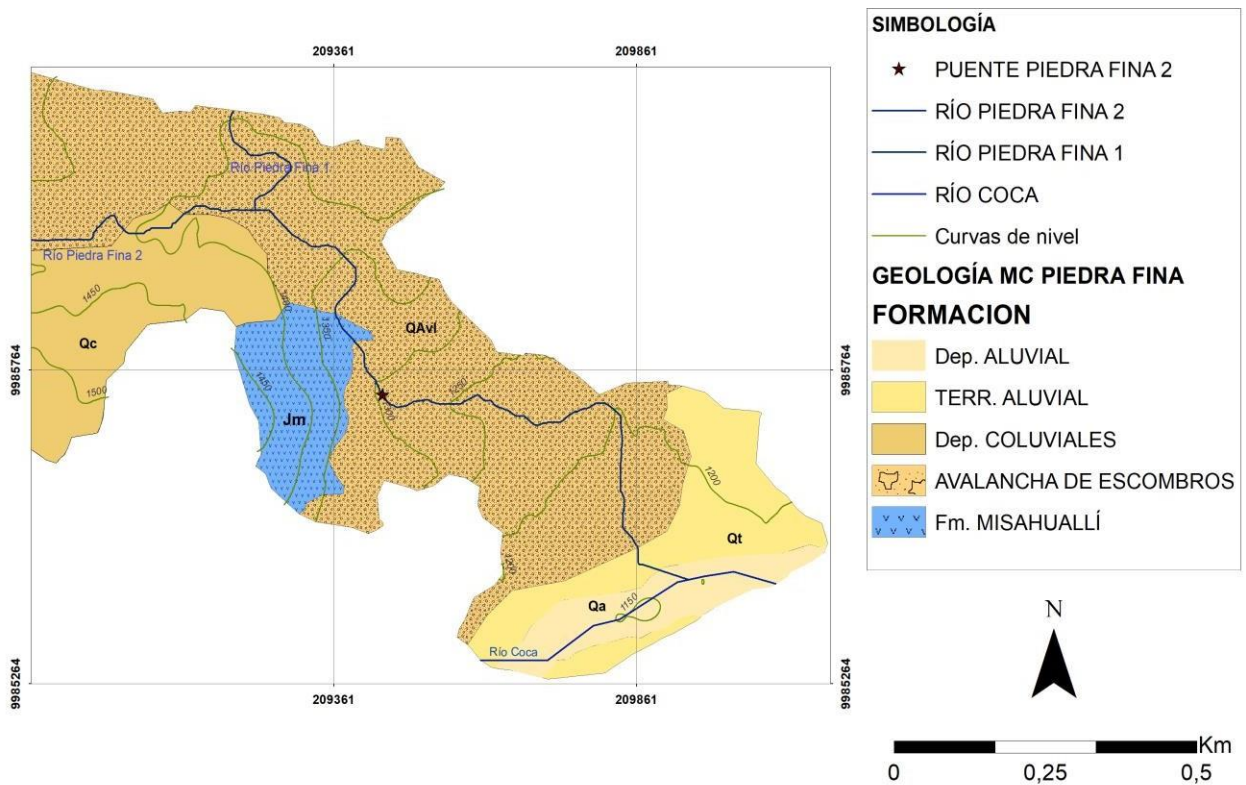


Figura 10. Delimitación de la micro cuenca hidrográfica de río afluente Piedra Fina 2

3.1.2 Levantamiento geológico

Principales depósitos y formaciones identificadas en la micro cuenca hidrográfica del río Piedra Fina 2 se observan en la figura 11.



NOMBRE DEL PROYECTO:	UBICACIÓN	ELABORADO POR:	SISTEMA DE COORDENADAS	ESCALA
MAPA GEOLÓGICO DE LA MICRO CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO PIEDRA FINA 2	PROVINCIA: Napo REGIÓN: Amazónica	YADIRA ESPINOZA OVIEDO	PROYECCIÓN: UTM ZONA: 18 Sur COORDENADAS: GCS_WGS_1984	1:2 500
				FECHA: 2022

Figura 11. Mapa geológico de la micro cuenca hidrográfica del río Piedra Fina 2 escala 1:2 500

FORMACIÓN MISAHUALLÍ (JM)

En el margen del río Piedra fina 2 afloran rocas intermedias y ácidas de la Formación Misahuallí tales como riolitas, con minerales principales de cuarzo 41%, plagioclasa 19%, feldespato alcalino 30%, anfíbol 10% sub-euhedrales, con textura porfídica, el alto contenido de feldespato se identifica con una tonalidad rosada con textura afanítica, en muestra de mano en la cual podemos identificando su un origen extrusivo (*fig 12.*)



Figura 12. a) afloramiento de Riolita en el margen izquierdo y de derecho del río Piedra Fina 2 (UTM 209396E 9985789N) b) fracturaciones en los afloramientos riolíticos de la zona c)muestra de mano de riolita, textura afanítica d) lámina delgada en luz natural

Y andesitas con minerales principales de plagioclasa 57,66% feldespato alcalino 29,93% piroxeno 7,3% cuarzo 5% sub-euhedrales su composición máfica aparte del contenido mineral, se lo evidencia por su tonalidad oscura en muestra de mano, la presencia de fenocristales de plagioclasa dentro de una matriz constituida por cristales de tamaño más fino y vidrio, forman una textura porfírica. (fig 13.)



Figura 13. a) Afloramiento de Andesita en el margen izquierdo del río Piedra Fina 2 (UTM 209362E 9985823N) b) muestra de mano andesita, textura porfirítica c) lámina delgada en luz natural y luz polarizada

DEPÓSITOS CUARTERNARIOS

Avalancha de escombros (QAvI)

Representan antiguos edificios volcánicos que han colapsado de El Reventador los cuales afloran en el margen izquierdo y derecho del río Piedra Fina 2, constituida principalmente en un 70% de matriz y clastos 30% de mal sorteo, los clastos poseen tamaños y formas variables desde 1 a 25 cm y sub redondeados a angulares, su composición varía entre clastos máficos a félsicos distribuidos dentro de una matriz de limo arenosa y arenas limosa en diferentes secciones de la micro cuenca con tonalidades grises y de estructura brechosa. Comprende

una mezcla de depósitos piroclásticos y lahares. Esta avalancha yace sobre las rocas riolíticas de la formación Misahuallí (209366E 9985853N) (fig 14.)



Figura 14. a) discordancia sobre rocas ríolitas y avalancha de escombros (UTM 209366E 9985853N) b)avalancha de escombros limo-arenosa de matriz soportada (UTM 209356E 9985905N) c) avalancha de estructura brechosa compacta (UTM 209375E 9985866N)

Depósitos coluviales (Qc)

Se evidenció material mezclado de suelo arenoso y rocas meteorizadas junto con bloques y fragmentos de roca que descienden por laderas y se depositan sobre la cota 1400 m.s.n.m (fig 15.)

Depósitos aluviales y terraza aluvial (Qa, Qt)

Material detrítico transportado por flujo del río Piedra Fina 2 a la desembocadura del principal Coca constituido principalmente por depósitos limo arenosos formando zonas de terrazas aluviales en la parte baja de la micro cuenca.



Figura 15. a) Suelo arenoso con mezcla de fragmentos de roca meteorizada b) depósitos coluviales con contacto a la avalancha de escombros del paleo Reventador (tonalidad gris) y el río Piedra Fina 2, presencia variante OCP (coordenadas 209077 E 995965 N)

3.1.3 Curva hipsomètrica

La curva hipsomètrica de la micro cuenca hidrogràfica del río Piedra Fina 2 presentada gràficamente en este estudio se ilustra en la figura 14. Donde se observa que a un rango de altura relativa entre 1 y 0,8 mantiene una ligera tendencia de disminuir constantemente con el intervalo de àrea relativa entre 0 y 0,5. Sin embargo, un cambio en la tendencia es mayormente representado a partir de 0,77 de altura relativa cuyo valor corresponde a una cota de 1431 m.s.n.m y 0,7 de àrea relativa reflejando el 68% de àrea acumulada. (fig 16.)

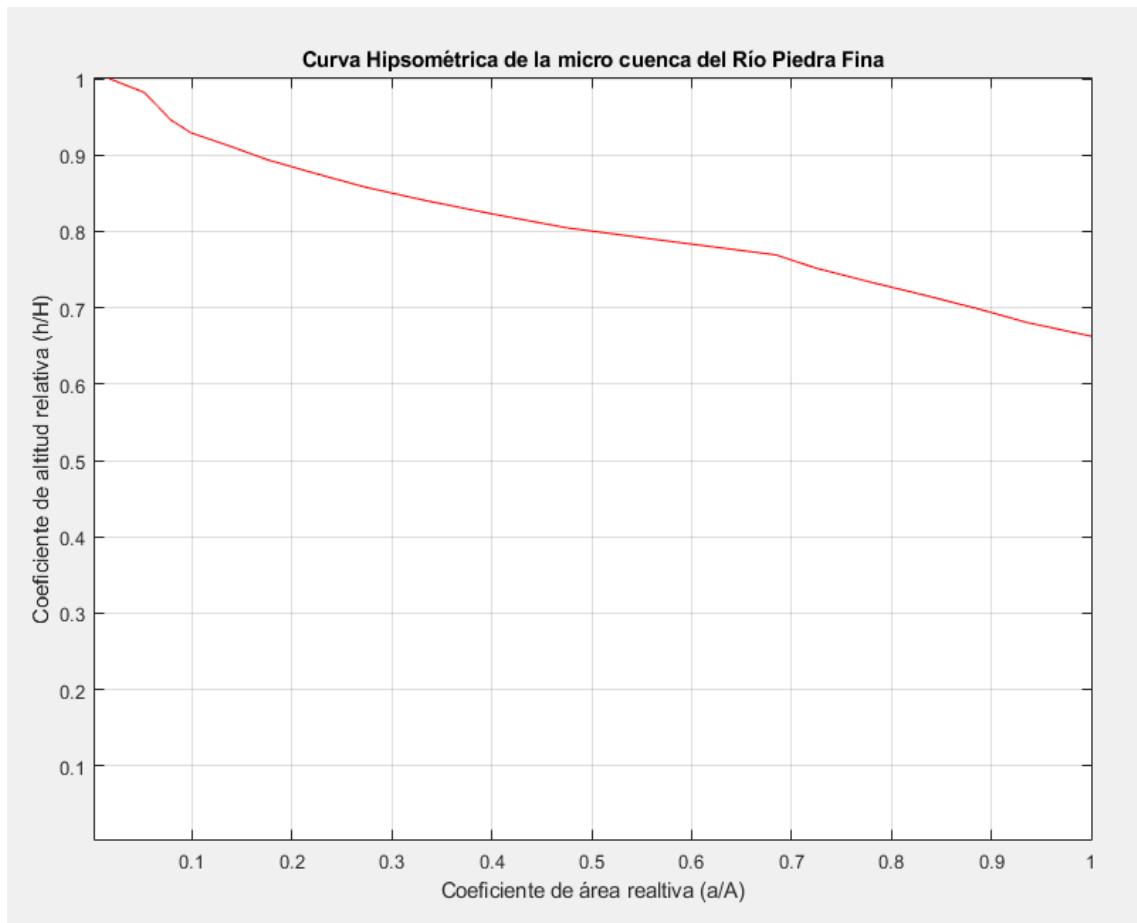


Figura 16. Curva hipsométrica de la micro cuenca hidrográfica del río Piedra Fina 2

La comparativa entre la curva hipsométrica obtenida en este estudio junto con las definidas por (Strahler,1952) obtuvo una tendencia que refleja una fase de juventud ya que los valores de área acumulada, presentan una tendencia curva superiores al 68% por lo tanto, esta cuenca posee un gran potencial erosivo (*fig 17.*)

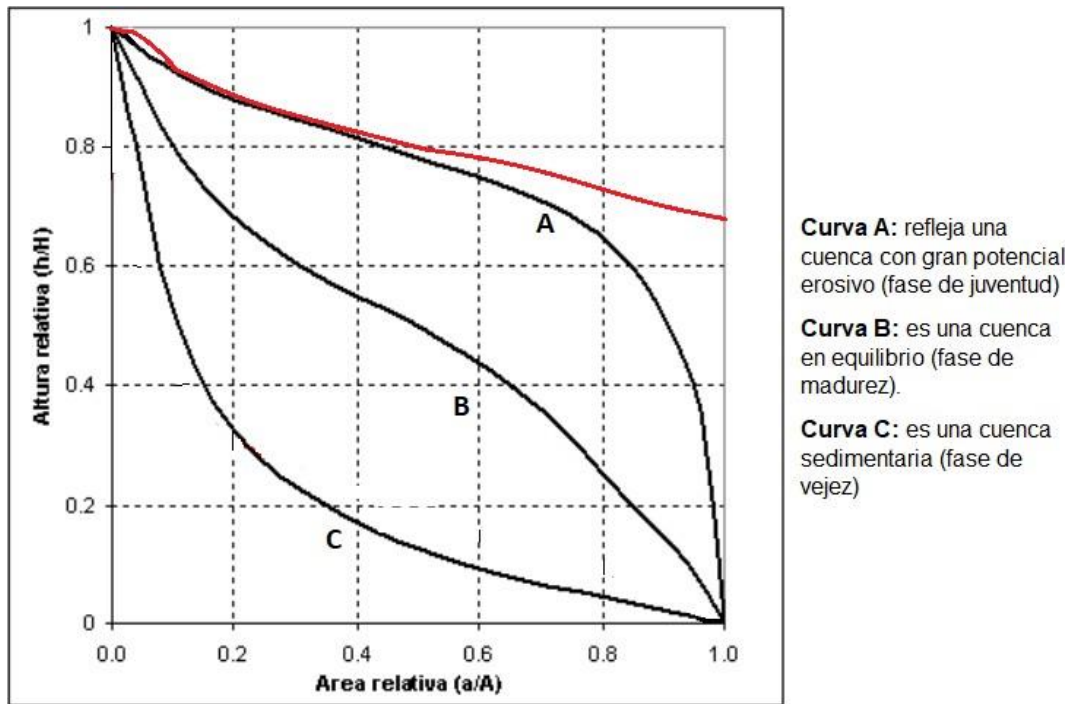


Figura 17. Curva hipsométrica adimensional con curvas definidas por Strahler (1952), y la curva roja representa el obtenido en este estudio.

3.1.4 Perfil longitudinal

La información disponible para el análisis de la evolución del cauce del río afluente Piedra Fina 2 mediante perfiles longitudinales en este estudio, fue a partir de la cota 1600 m.s.n.m hasta la desembocadura del mismo en el RC a 1150 m.s.n.m debido a la disponibilidad de información de los modelos digitales de terreno

Estos perfiles registraron la evolución del drenaje con un predominio del régimen erosivo, dentro de la cuenca hidrográfica del río Coca. Además, se consideró un nivel de referencia mediante la representación del perfil de equilibrio cuantificando así los patrones de la evolución geomorfológica, (*fig 18.*) De esta manera, se analizaron Knickpoints a lo largo del perfil.

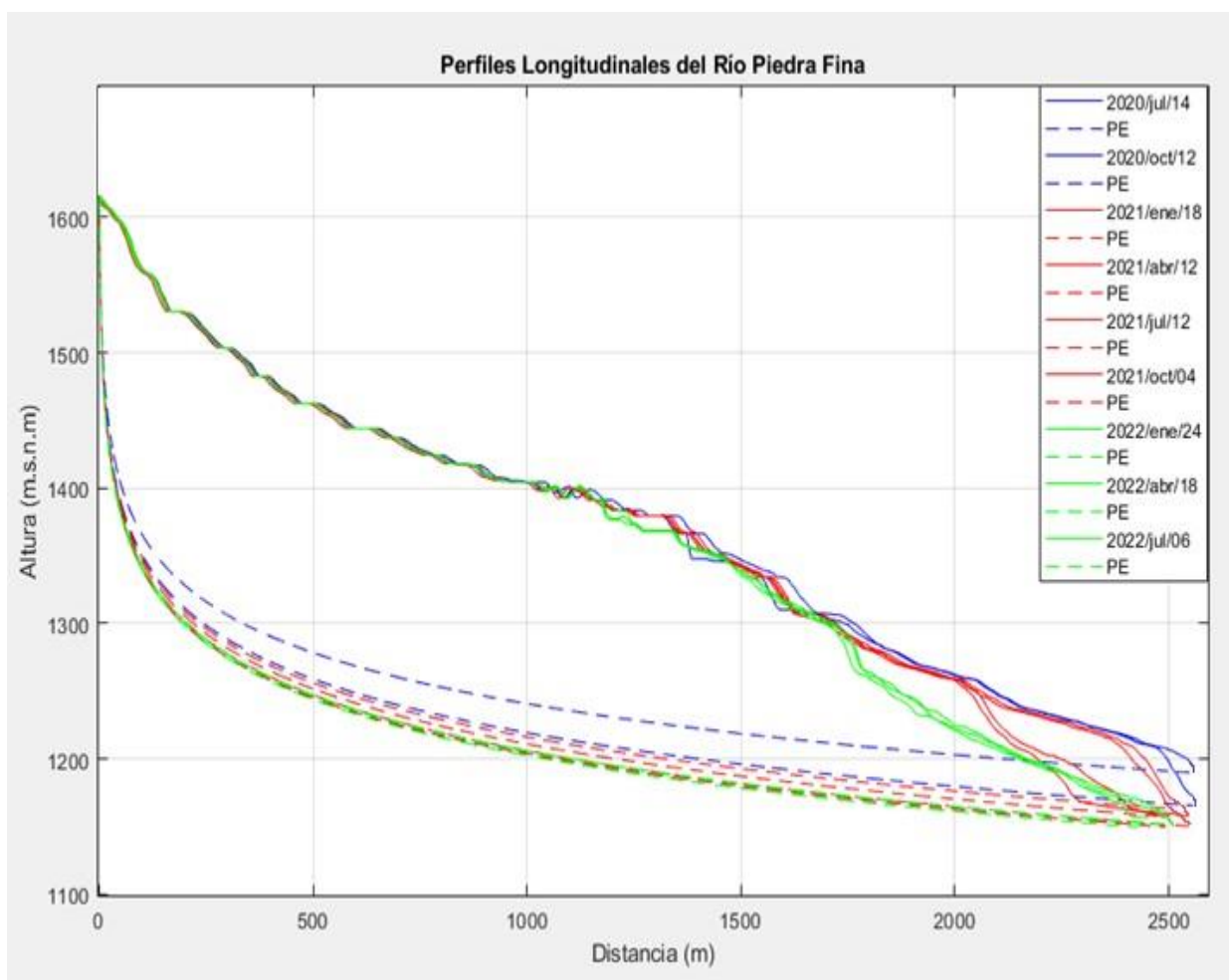


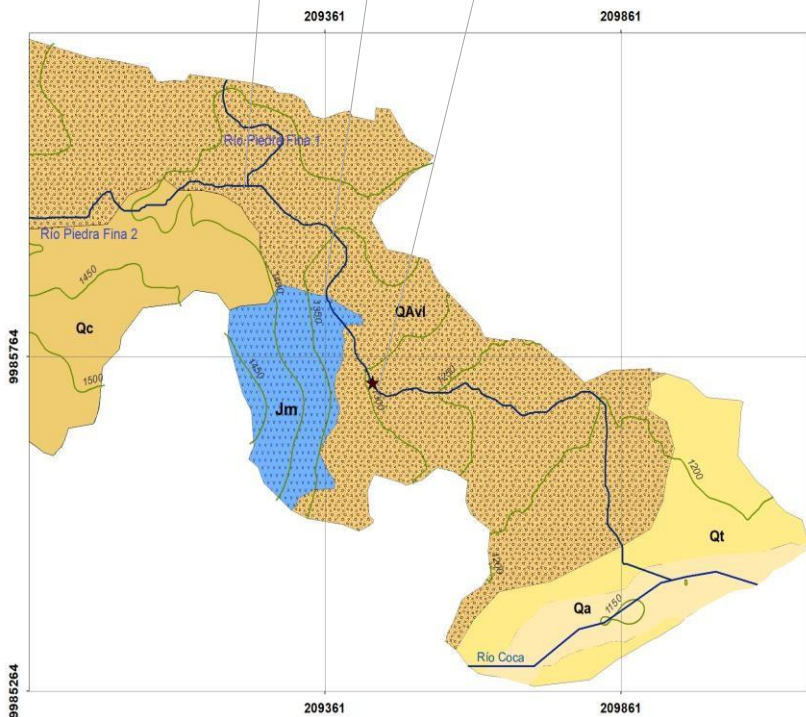
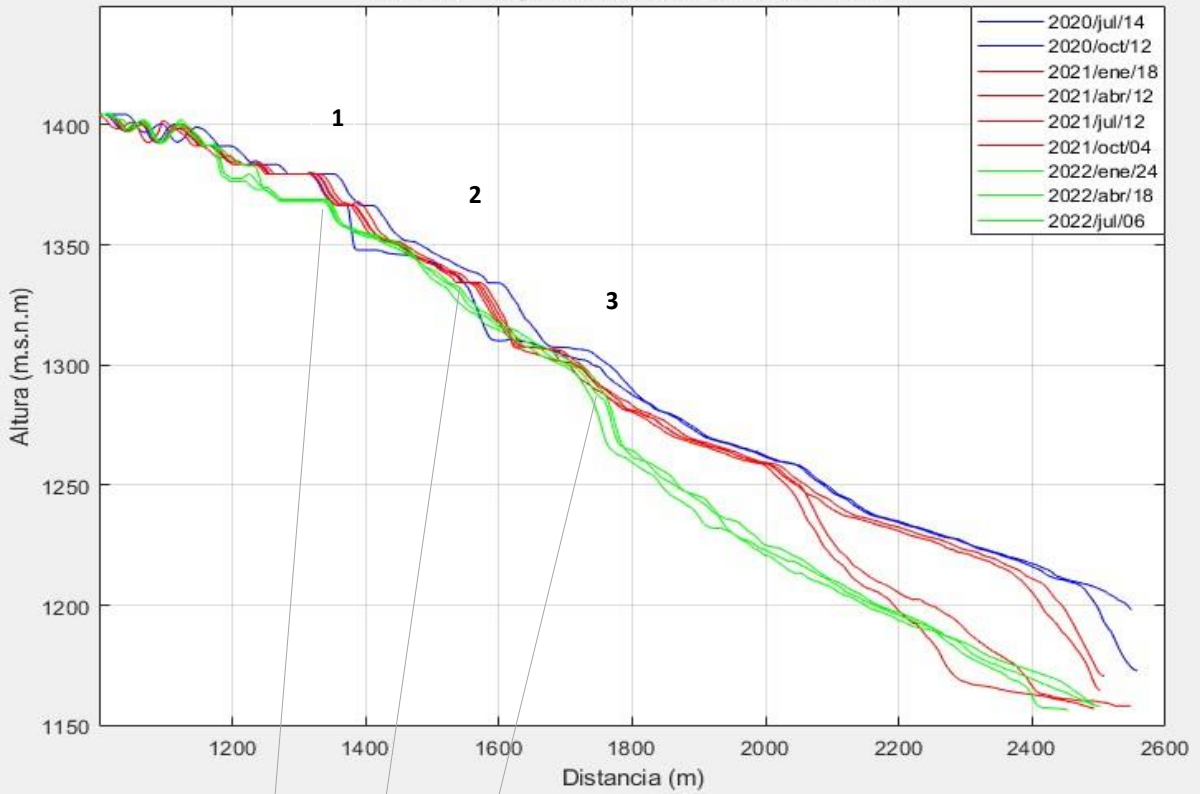
Figura 18. Perfiles longitudinales y de equilibrio (PE líneas entre cortadas) de la evolución trimestral del río Piedra Fina 2 a partir del año 2020 al 2022

3.1.4.1 Knickpoints

Se encontraron 3 knickpoints representativos a lo largo del perfil en segmentos de cotas entre 1400 y 1150 m.s.n.m. (fig 19.)

- 1) Se debe a la sección litológica de la avalancha de escombros de material mayormente consolidado y la intersección de los ríos Piedra Fina 1 y 2

Perfiles Longitudinales del Río Piedra Fina 2



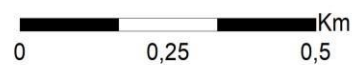
SIMBOLOGÍA

- ★ PUEBLO PIEDRA FINA 2
- RÍO PIEDRA FINA 2
- RÍO PIEDRA FINA 1
- RÍO COCA
- Curvas de nivel

GEOLOGÍA MC PIEDRA FINA

FORMACION

- Dep. ALUVIAL
- TERR. ALUVIAL
- Dep. COLUVIALES
- AVALANCHA DE ESCOMBROS
- Fm. MISAHUALLÍ



NOMBRE DEL PROYECTO:	UBICACIÓN	ELABORADO POR:	SISTEMA DE COORDENADAS	ESCALA
MAPA GEOLOGICO DE LA MICRO CUENCA HIDROGRAFICA DEL RIO PIEDRA FINA 2	PROVINCIA: Napo REGIÓN: Amazónica	YADIRA ESPINOZA OVIEDO	PROYECCIÓN: UTM ZONA: 18 Sur COORDENADAS: GCS_WGS_1984	1:2 500 FECHA: 2022

Figura 2. Knickpoints identificados en el perfil longitudinal del río Piedra Fina 2 y con vista en planta al mapa geológico de la micro cuenca a escala 1:2 500

2) En 1320 m.s.n.m se evidenció un cambio representativo debido al contacto litológico entre riolitas de la formación Misahuallí que afloran en el margen derecho e izquierdo del río Piedra Fina 2 y la avalancha de escombros del paleo reventador (*fig 14a.*)

3) En 1290 m.s.n.m sobre la avalancha de escombros del paleo reventador se comprobó la existencia de un represamiento natural de una brecha con material mayormente consolidado. Se evidencia la variación de dirección del flujo del cauce del río o punto de avulsión (*fig 20.*)

Sobre este punto se mantiene firme parte de la estructura antrópica de la zona “Antiguo puente Piedra Fina 2”

3.1.4.2 Pendiente media del cauce del río Piedra Fina 2

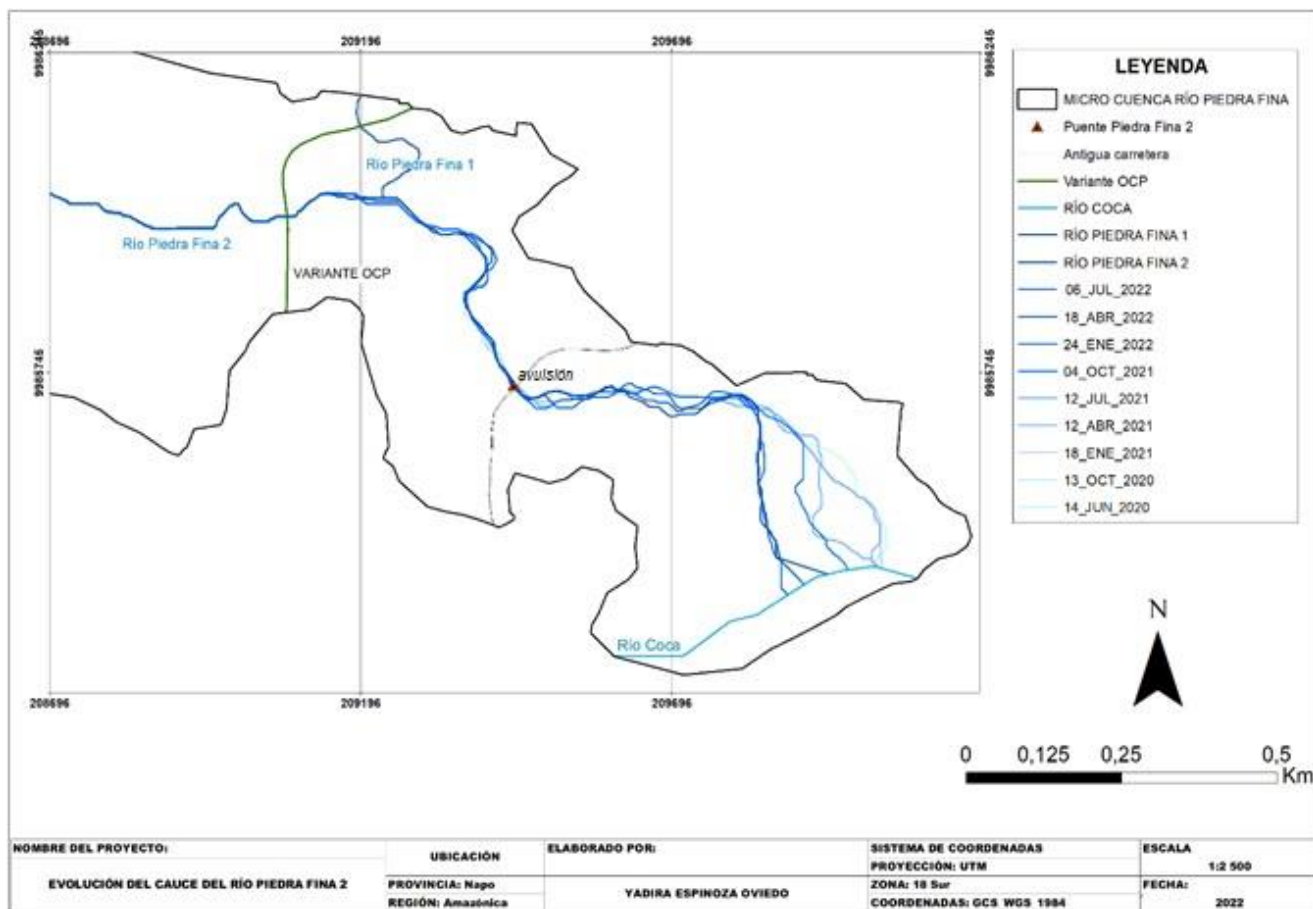


Figura 20. Evolución del cauce del río Piedra Fina 2 desde el 14 de junio del 2020 al 06 de julio del 2022.

PENDIENTE MEDIA DEL CAUCE			
FECHA	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 1 y 2
	Tubería OCP-Avulsión	Avulsión-Desembocadura	TOTAL
14/6/2020	10%	10%	10,08%
12/10/2020	9%	11%	10,87%
18/1/2021	12%	12%	12,20%
12/4/2021	12%	12%	12,08%
12/6/2021	11%	12%	11,56%
4/10/2021	13%	11%	11,70%
24/1/2022	15%	14%	14,43%
18/4/2022	15%	13%	14,07%
6/7/2022	16%	11%	12,95%

Tabla 5. Valores de pendientes del cauce del río Piedra Fina 2 desde la cota más alta hasta su desembocadura, así como tramos desde la variación de la tubería OCP hasta el punto de avulsión y desde el punto de avulsión hasta la desembocadura (ver figura 20 para identificar los tramos)

Se consideró dos tramos representativos para la variación de la pendiente media del cauce, el primero desde la variante OCP hacia el punto de avulsión, y el segundo desde el punto de avulsión hacia la desembocadura del río (*fig 20.*) En el año 2020, el valor de la pendiente media del río, mantenía un valor del 10%, tras la activación del proceso de erosión regresiva, este valor fue en aumento hasta el año 2022 de hasta un 16 % (*Tabla 5. fig 21*) lo que representa la búsqueda de un nuevo nivel base del río, es decir el nivel por debajo del cual el río no erosiona.

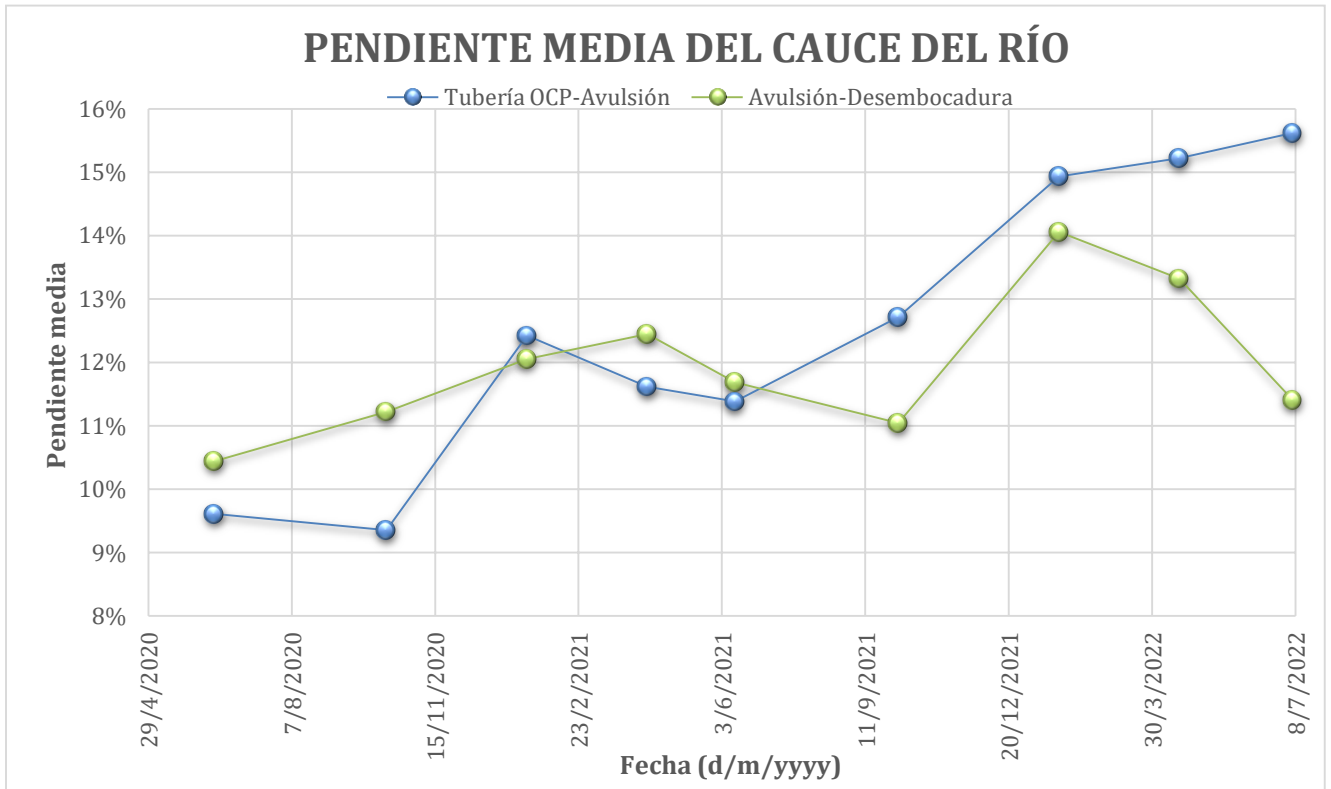


Figura 21. Representación de la variabilidad de las pendientes medias del cauce del río Piedra Fina 2 en dos tramos; desde la variante OCP al punto de avulsión y del punto de avulsión hacia la desembocadura con el RC desde el 14 de junio del 2020 al 06 de julio del 2022.

3.1.5 Movimientos en masa



Figura 3. PF1 Movimiento en masa margen izquierdo del río Piedra Fina 2 a 1390m.s.n.m coordenadas 209415E 9985946N

PF1 con coordenadas 209415E 9985946N evento ubicado en el margen izquierdo del río Piedra Fina 2 a 1390m.s.n.m desde su escarpe principal y 1350 m.s.n.m al pie del talud, es un movimiento que se caracteriza por la presencia de materiales de diferentes tamaños y formas subangulares y subredondeados de composición máfica, principalmente se compone de avalanchas de escombros con un porcentaje de clastos y 65% matriz soportada constituida de arena-limosa en la base y hacia el escarpe principal, se observan materiales limo-arenosos y material orgánico.

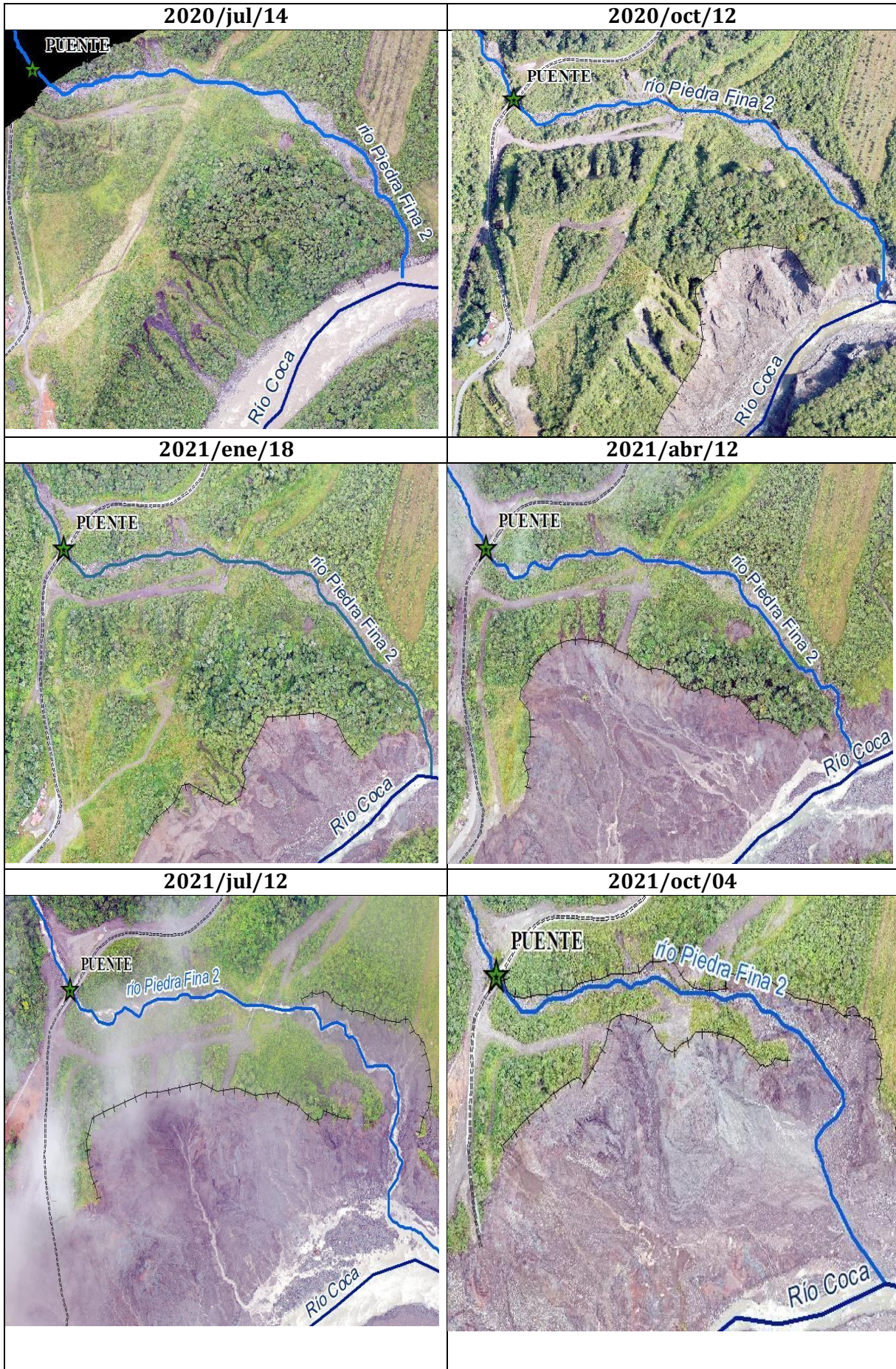
Se trata de un movimiento tipo flujo y caída de roca que se mantiene en estado activo con material de suelo húmedo donde se identifican estructuras tipo surcos por el paso de agua por las altas precipitaciones en la zona. La meteorización y alta pendiente, condicionan la actividad de este evento y la socavación del pie del talud y la erosión fluvial detonan su movimiento. (fig 22.)



Figura 4. PF2 Movimiento en masa al margen derecho del río Piedra Fina 2 a 1357m.s.n.m coordenadas 209356 E 9985905 N

PF2 con coordenadas 209356 E 9985905 N evento ubicado en el margen derecho del río Piedra Fina 2 a 1357m.s.n.m desde su escarpe principal y 1350 m.s.n.m al pie del talud, presenta clastos de tamaños variables desde 1cm a 15cm con formas subangulares y subredondeados en un 25% dentro de una matriz en un 75% de arena-limosa y material orgánico. Es un movimiento activo tipo flujo con material de suelo húmedo donde se identifican estructuras tipo surcos por el paso de agua por las altas precipitaciones en la zona. La meteorización y alta pendiente, condicionan la actividad de este evento y la socavación del pie del talud y la erosión fluvial detonan su movimiento. (fig 23.)

3.1.6 Evolución del proceso de erosión regresiva en el río Piedra Fina 2



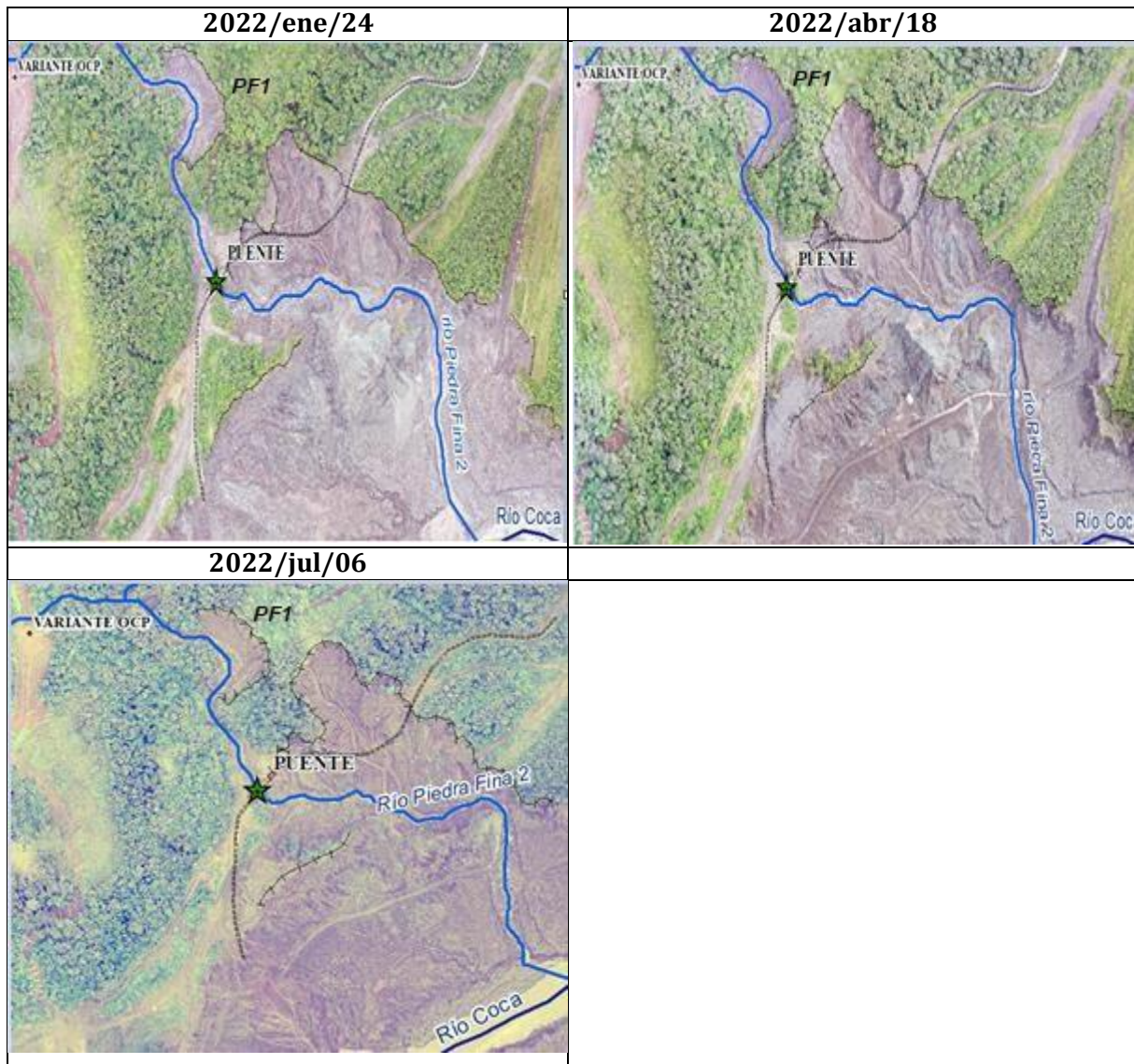


Tabla 6. Evolución erosión regresiva en el río Piedra Fina 2 a partir del año 2020 al 2022. PF1 representa el movimiento en masa descrito en la fig. 22, línea roja representa la distancia entre los movimientos en masa de la micro cuenca y los activos a partir del PER. Se ubican las estructuras antrópicas como la variante OCP y el antiguo puente y carretera E45.

El PER en los meses de julio a octubre del 2020 tuvo un avance en el margen izquierdo del RC sobre la avalancha 2, este, en un período donde las precipitaciones del volcán Reventador se mantienen en un nivel relativamente bajo. Para los primeros meses del año 2021, se observa el aumento del socavamiento coincidiendo con las altas precipitaciones de la zona, siendo un factor natural desencadenante por la saturación de agua y la continuidad de la erosión fluvial. (Tabla 6.)

Para el año 2022, el PER avanzó sobre río Piedra Fina 2, en los tres ejes diferentes de erosión (Meneses Carrillo, 2022) para el eje frontal, el PER afectó las infraestructuras antrópicas como

la carretera E45 y el puente Piedra Fina 2. El eje lateral continuó con la socavación al pie del talud activando la continuidad de los deslizamientos y el aumento de la pendiente media del cauce del río Piedra Fina 2 (Tabla 5.) representa el avance del eje incisivo de erosión.

El movimiento en masa descrito anteriormente, PF1 es un movimiento referido a las condiciones del relieve, geológicas y de precipitaciones, en la *Tabla 6*, se observa que, a partir de enero del 2022, este se encuentra a 91 metros de distancia con el deslizamiento producido por el avance del PER en el río Piedra Fina 2, para abril y julio del 2022, su distancia disminuyó a 49m y 45m respectivamente.

3.2 Discusión

La variación del cauce del río afluente Piedra Fina 2 hacia la desembocadura del río principal Coca trimestralmente entre 2020 y 2022, así como la presencia de laderas escarpadas y movimientos en masa aguas arriba son visibles evidencias de la geodinámica en respuesta a la actividad del PER.

Los resultados respecto a la curva hipsométrica realizada en este estudio con datos atribuidos al 2012, reflejaron un gran potencial erosivo de este río. Por otro lado, la variabilidad del perfil longitudinal en el período evolutivo considerado en este estudio (2020 – 2022) se comprobó con la distribución litológica a lo largo de la micro cuenca donde predomina la avalancha de escombros 2 del paleo Reventador que se encuentra adyacente a rocas riolitas y andesitas pertenecientes a la formación Misahuallí además de la presencia de depósitos cuaternarios como aluviales, coluviales y terrazas aluviales en la parte baja de la micro cuenca siendo así el margen litológico un factor clave para la evolución de este proceso erosivo.

Tras el PER el río Piedra Fina 2 busca alcanzar su nuevo nivel base, para ello, erosiona lateralmente, aguas arriba y en profundidad cambiando drásticamente las pendientes de su cauce alcanzando valores de hasta el 16% lo que se atribuye a la continuidad de la inestabilidad (Tabla 5).

El volcán El Reventador representa una zona de recarga donde las precipitaciones producidas sobre este descienden y afectan directamente a la microcuenca del río Piedra Fina 2, en comparación con las precipitaciones producidas a lo largo de la cuenca hidrográfica del río Coca, el régimen es distinto. Dentro de los deslizamientos consecuentes se observaron ojos de agua consecuentes a los periodos de altas precipitaciones. Los movimientos en masa presentes al entrar en contacto modificarían la dirección del flujo del cauce del río manteniendo así el proceso erosivo en sus tres ejes distintos; frontal, lateral e incisivo.

3.3 Conclusiones

- La curva hipsométrica del río tributario Piedra Fina 2 realizada con información del modelo digital de terreno con una resolución 5m del año 2012, indica una tendencia que refleja una fase de juventud reflejando el alto potencial erosivo de este río, cuya geodinámica de ha mantenido activa predominantemente a partir del año 2020 tras el colapso de la CSR hasta la actualidad.
- Con la realización del perfil longitudinal del río Piedra Fina 2 se analizaron los factores que descartan condiciones de equilibrio del mismo tras la formación de knickpoints.
- En un total de 3 knickpoints dentro del alcance del estudio el factor formador principal fue el cambio de litología presentada por el contacto entre avalancha de escombros del paleo Reventador y el afloramiento de riolitas de la formación Misahuallí así como la presencia de una brecha con material mayormente consolidado y la presencia de movimientos en masa los cuales fueron correlacionados con visitas en campo.
- Los deslizamientos representativos en la microcuenca poseen una geodinámica que los distingue, existen los originados por condiciones naturales de meteorización atribuida a la humedad y precipitaciones de la zona, altas pendientes sobre el punto de avulsión del cauce del río y los movimientos en masa que se han desencadenado debido a la continuidad del PER, estos se encuentran a escasos metros de distancia por lo que su intersección modificaría drásticamente la geomorfología de la micro cuenca cambiando en dirección el flujo del cauce del río Piedra Fina 2 .

3.4 Recomendaciones

- Realizar este tipo de análisis al resto de ríos tributarios de la cuenca hidrográfica del río Coca ya que los cambios litológicos, deslizamientos y estructuras son los principales desencadenantes para el avance erosivo de la zona
- Implementar estudios geotécnicos, geofísicos e hidrogeológicos para esta micro cuenca del río Piedra Fina 2 y demás ríos tributarios de la cuenca hidrográfica del río Coca que permitan tomar acciones preventivas que eviten la afectación directa hacia los poblados cercanos y recursos antrópicos de la zona como carreteras, puentes, oleoductos y poliductos.

4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmed, M. F., Ali, M. Z., Rogers, J. D., & Khan, M. S. (2019). A study of knickpoint surveys and their likely association with landslides along the Hunza River longitudinal profile. *Environmental Earth Sciences*, 78(5), 176. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8178-3>
- Alvarado, A., Audin, L., Nocquet, J. M., Lagreulet, S., Segovia, M., Font, Y., Lamarque, G., Yepes, H., Mothes, P., Rolandone, F., Jarrín, P., & Quidelleur, X. (2014). Active tectonics in Quito, Ecuador, assessed by geomorphological studies, GPS data, and crustal seismicity. *Tectonics*, 33(2), 67-83. <https://doi.org/10.1002/2012TC003224>
- Andrade Villafuerte, A. L. (2016). Análisis de la influencia de la geodinámica y los impactos antrópicos en la geomorfología fluvial del río coca. Caso de estudio: Impactos fluviales del proyecto Coca Codo SINCLAIR–PHCCS.
- Baby, P., Rivadeneira, M., Christophoul, F., & Barragan, R. (1999). Style and timing of deformation in the Oriente Basin of Ecuador. 5.
- Barragán, R., & Baby, P. (2004). Magmatismo alcalino intra-placa en la Cuenca Cretácica Oriente, Ecuador: Evidencias geoquímicas, geocronológicas y tectónicas. En P. Baby, M. Rivadeneira, & R. Barragán (Eds.), *La Cuenca Oriente: Geología y petróleo* (pp. 69-91). Institut français d'études andines. <https://doi.org/10.4000/books.ifea.2996>
- Baldock, J. W. (1982). *Geology of Ecuador: Explanatory Bulletin of the National Geological Map of The Republic of Ecuador; 1: 1,000, 00 Scale 1982*. Ministerio de Recursos Naturales y Energéticos, Dirección General de Geología y Minas.
- Bernal, IC. et al. (2017). Informe Final Proyecto PIMI14-09. Escuela Politécnica Nacional.
- Bernal, I., Romero, C., & Qhispe, D. (2022). IS THE HEADWARD EROSION A DOWNSTREAM EFFECT OF DAMMING THE COCA RIVER? 6.
- 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://doi.org/10.18268/BSGM2011v63n2a15>
- Charlton, R. (2010). *Fundamentals of fluvial geomorphology (Repr)*. Routledge.
- Cruden, D. M. (1991). A simple definition of a landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 43(1), 27-29. <https://doi.org/10.1007/BF02590167>

- Cruden, D.M., Varnes, D.J., 1996, Landslide types and processes, en Turner, K., y Schuster, R.L., ed., Landslides investigation and mitigation: Washington D. C, National Academy Press, Transportation Research Board Special Report 247, p. 36–75.
- Diaz, M., Baby, P., Rivadeneira, M., & Christophoul, F. (2004). El pre-Aptense en la Cuenca Oriente ecuatoriana. 26.
- Essential Climate Variables for assessment of climate variability from 1979 to present
<https://public.wmo.int/en/programmes/global-climate-observing-system/essential-climate-variables>
- Hack, J. (1973). Journal of Research of the U. S. Geological Survey 1, 421- 429.
- Horna Kuonqui, L. N. (2016). Evaluación hidrometeorológica y de sedimentos en la cuenca del río coca en la zona de influencia del proyecto coca codo Sinclair
- Jiménez-Cantizano, F., Antón, L., & Soria-Jáuregui, Á. (2017). Cálculo del perfil teórico de equilibrio de un río en función del índice de gradiente. Cuaternario y Geomorfología, 4.
- Maldonado Albuja, D. J. (2017). Análisis de la geomorfología fluvial en el Río Coca en el periodo 1969-2016: Influencia de eventos geodinámicos y antrópicos
- Mackin, J.H. (1948). Geological Society of America Bulletin 101, 1373-1388
- Nieto , A. S. (1991) General Geology of Northeastem Ecuador . In : Schuster , R. and Egreg , J. (Ed) The March 5 , 1987 , Ecuador earthquakes . Washington , D.C (págs . 23-28) . National Academy Press
- Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas. 2007. Movimientos en Masa en la Región Andina: Una guía para la evaluación de amenazas. Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Multinacional, No. 4, 432 p., 1 CD-ROM.
- Meneses, Carrillo, M. V. (2022). Evaluación de los factores que controlan la erosión regresiva en el Río Coca
- Racca, J. M. G. (2007). ANÁLISIS HIPSOMÉTRICO, FRECUENCIA ALTIMÉTRICA Y PENDIENTES MEDIAS A PARTIR DE MODELOS DIGITALES DEL TERRENO. 8.
- Ramakrishna, B. (1997). Estrategia de extensión para el manejo integrado de cuencas hidrográficas: Conceptos y experiencias. Costa Rica: Instituto interamericano de cooperación para la agricultura.

- Reyes, P., Procel, S., Sevilla, J., Cabero, A., Orozco, A., Córdova, J., Lima, F., & Vasconez, F. (2021). Exceptionally uncommon overburden collapse behind a natural lava dam: Abandonment of the San-Rafael Waterfall in northeastern Ecuador. *Journal of South American Earth Sciences*, 110, 103353. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103353>
- Rivadeneira, M., & Baby, P. (2004). Características geológicas generales de los principales campos petroleros de petroproducción. En P. Baby, M. Rivadeneira, & R. Barragán (Eds.), *La Cuenca Oriente: Geología y petróleo* (pp. 229-295). Institut français d'études andines. <https://doi.org/10.4000/books.ifea.3020>
- Samaniego, P., Eissen, J.-P., Le Pennec, J.-L., Robin, C., Hall, M. L., Mothes, P., Chavrit, D., & Cotten, J. (2008). Pre-eruptive physical conditions of El Reventador volcano (Ecuador) inferred from the petrology of the 2002 and 2004–05 eruptions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 176(1), 82-93. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2008.03.004>
- Schumm, S., (1977). *The Fluvial System*. s.l.:The Blackburn Press.
- Soeters, R. and van Westen, C.J. (1996) *Slope Instability Recognition Analysis and Zonation*. In: Turner K.T. and Schuster, R.L., Eds., *Landslides: Investigation and Mitigation*, Special Report No. 247, Transportation Research Board National Research Council, Washington DC, 129-177.
- Strahler AN. 1952. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. *Bulletin of the Geological Society of America*, 63: 1117 – 1142
- Taylor, Arnold B.; Schwarz, Harry E. (1952). Unit-hydrograph lag and peak flow related to basin characteristics. *Transactions, American Geophysical Union*, 33(2), 235–. [doi:10.1029/tr033i002p00235](https://doi.org/10.1029/tr033i002p00235)
- Tschopp, H. J. (1953). Oil Explorations In The Oriente Of Ecuador. Pp. 1938–1950. *Aapg Bulletin*. Vol. 37(10). Pp. 2303-2347.
- Trenkamp, R., Kellogg, J. N., Freymueller, J. T., & Mora, H. P. (2002). Wide plate margin deformation, southern Central America and northwestern South America, CASA GPS observations. *Journal of South American Earth Sciences*, 15(2), 157-171. [https://doi.org/10.1016/S0895-9811\(02\)00018-4](https://doi.org/10.1016/S0895-9811(02)00018-4)
- Varnes, D. J., 1978, Slope movements types and processes, en Schuster R.L., y Krizek R.J., ed, *Landslides analysis and control: Washington D. C, National Academy Press, Transportation Research Board Special Report 176*, p. 9–33.

Wasson, T., Y Sinclair, J. H. (1927). Geological Explorations East of The Andes Of Ecuador.
American Association of Petroleum Geologists Bulletin, Vol. 11(No. 1), Pp. 1253-1281

5 ANEXOS

ANEXO I. EROSIÓN REGRESIVA VISTA DESDE EL ANTIGUO PUEBLO Y CARRETERA DEL RÍO PIEDRA FINA 2





Antigua carretera

R. Piedra Fina 2



ANEXO II. Datos satelitales del promedio mensual de precipitaciones

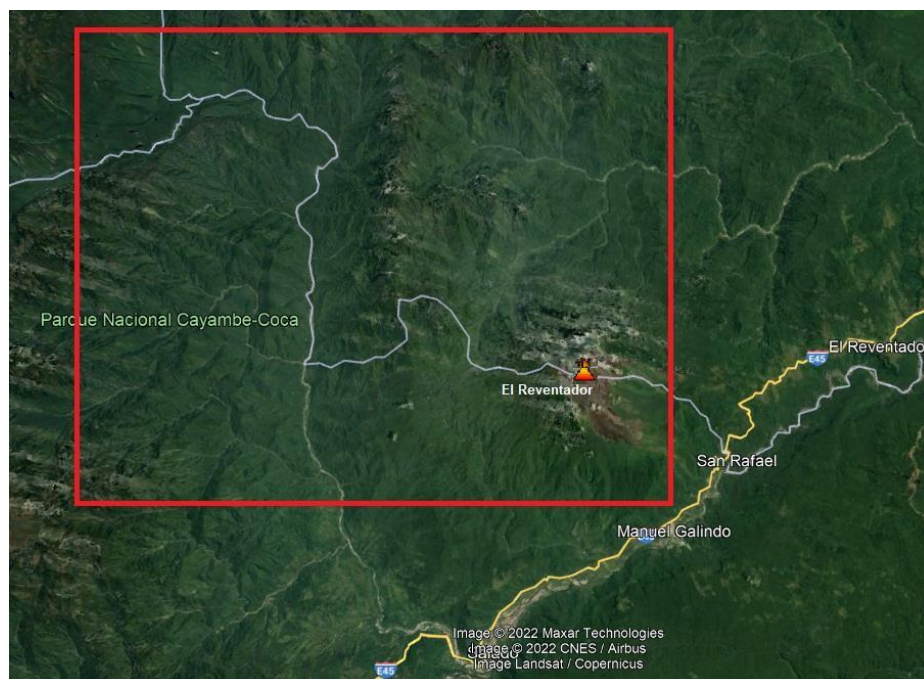
Datos satelitales del promedio mensual de precipitaciones del mundo desde 1979 de Essential Climate Variables, la base de datos posee un formato tipo Grib.

Zona de interés: volcán Reventador sección Norte para un grib de 0.25x0.25 grados.

Coordenadas lat=0, long=-77.75

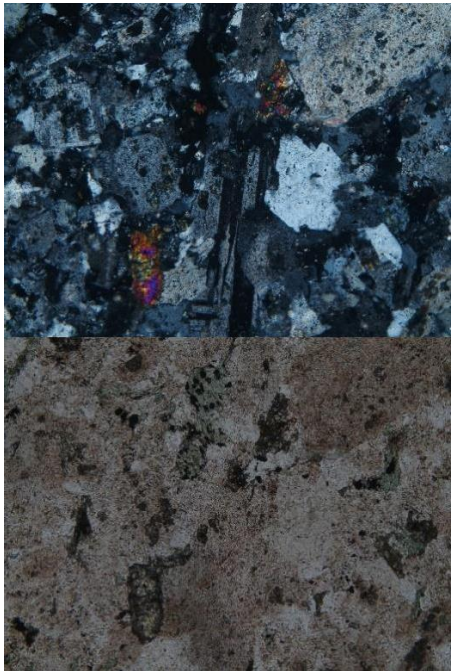
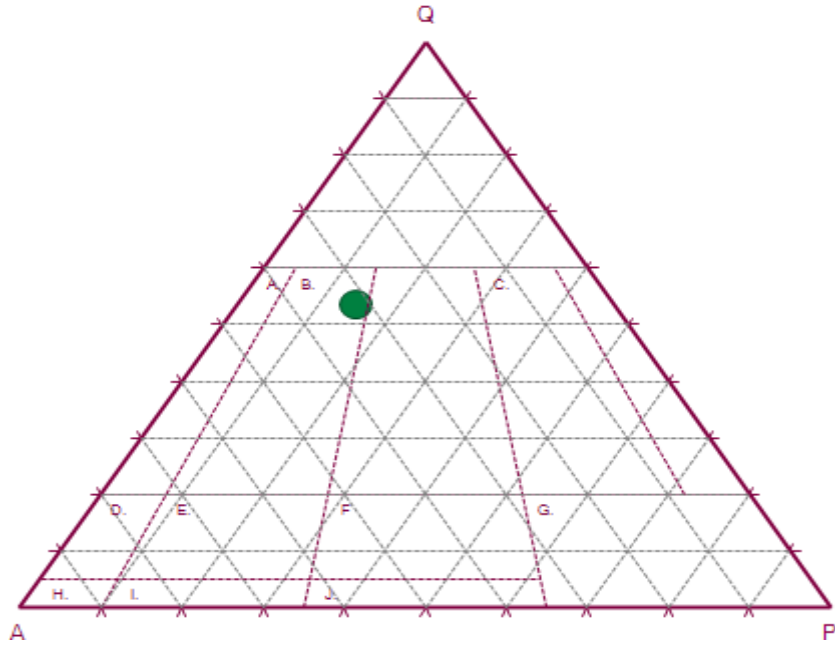
month	Precipitación acumulada zona volcán El Reventador (1979-2020)	
	tp_m	tp_mm
1	0,33290007	332,90007
2	0,32995983	329,95983
3	0,40387229	403,87229
4	0,40966431	409,66431
5	0,32538237	325,38237
6	0,29268841	292,68841
7	0,27493475	274,93475
8	0,18326184	183,26184
9	0,16159055	161,59055
10	0,2830419	283,0419
11	0,36701017	367,01017
12	0,34041876	340,41876

month	Precipitación acumulada zona volcán El Reventador (1979-2021)	
	tp_m	tp_mm
1	0,34018614	340,18614
2	0,33627125	336,27125
3	0,42034129	420,34129
4	0,41677872	416,77872
5	0,33708777	337,08777
6	0,30261044	302,61044



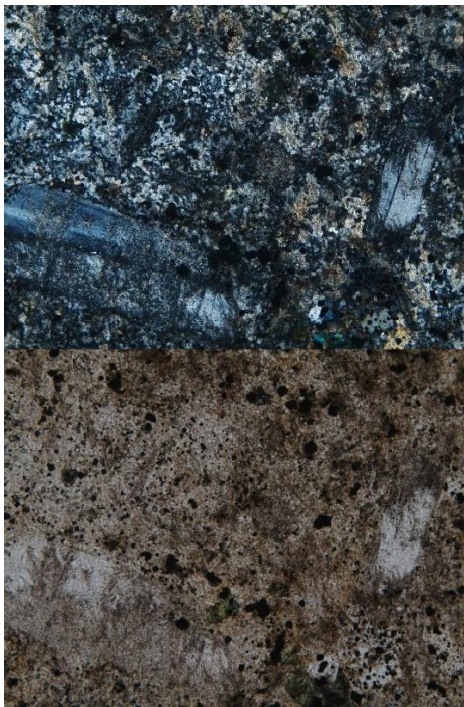
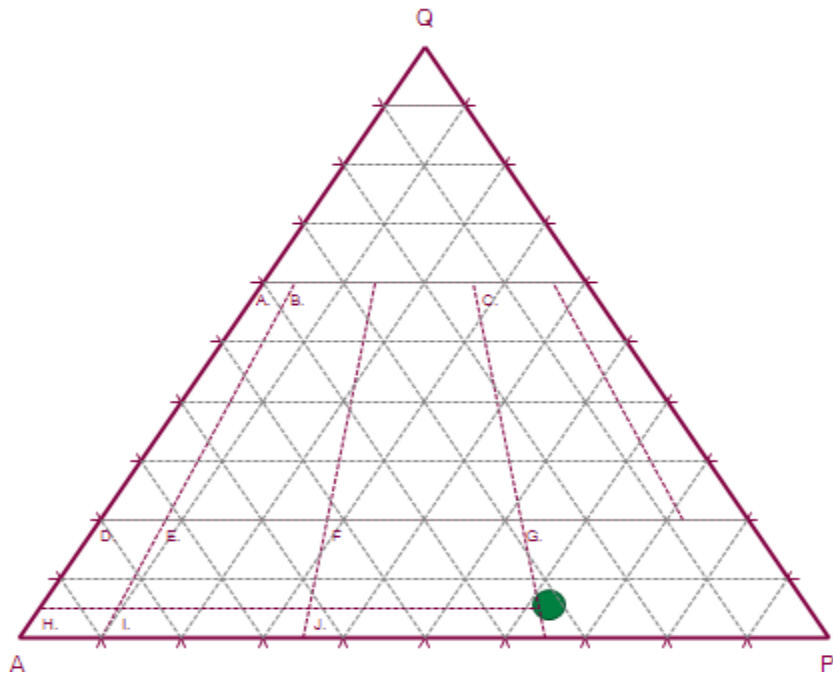
ANEXO III. Resultados del conteo modal y diagramas QAP de clasificación de rocas ígneas extrusivas

B. Rhyolite



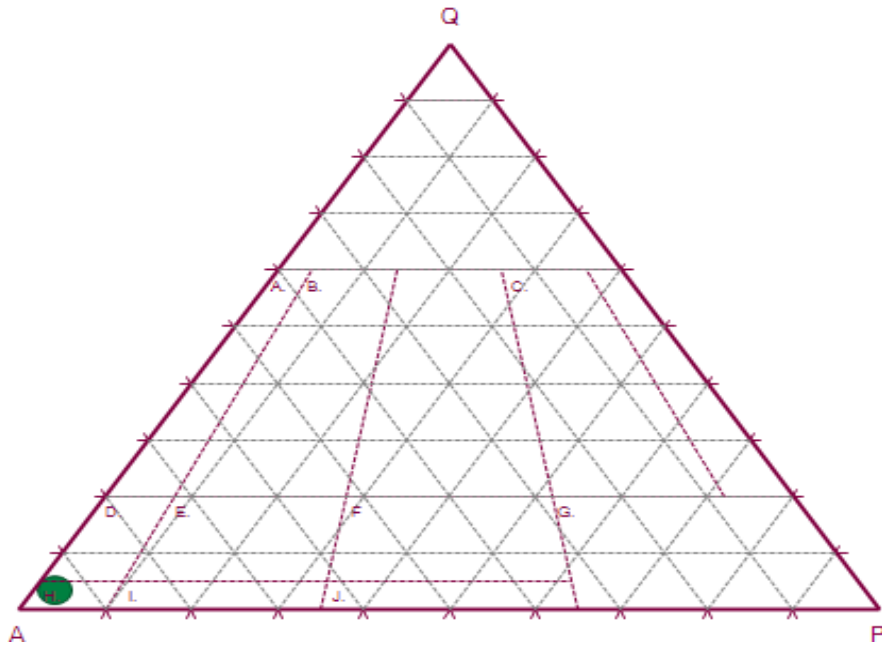
[Q] Cuarzo	51%
[P] Plagioclasa	14%
[F] Feldespato Alc	30%
[A] Anfíbol	5%

G. Andesite (SiO₂ > 52%)



[P] Plagioclasa	57.66%
[Q] Cuarzo	5.11%
[A] Feldespato Alc	29.93%
[X] Piroxeno	7.3%

H. Alkali Feldspar Trachyte



[F] Feldespato Alc	80.73%
[P] Plagioclasa	2.75%
[Q] Cuarzo	3.67%
[X] Piroxeno	5.5%
[A] Accesorios	7.34%