



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

ESTUDIO PRELIMINAR DE LA GEOMORFOLOGÍA DE LA CUENCA
HIDROGRÁFICA DEL RÍO CUMBE LOCALIZADA EN EL SUR DEL ECUADOR

Trabajo de titulación previo a la obtención del
título de Ingeniero Civil

AUTORES: JUAN EDUARDO BERMEO CABRERA
JHOISY GERMANIA ABARCA DURAN
TUTOR: ING. VICENTE MAURICIO IÑIGUEZ MORÁN, PhD.

Cuenca - Ecuador

2024

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Juan Eduardo Bermeo Cabrera con documento de identificación N° 0107032880 y Jhoisy Germania Abarca Duran con documento de identificación N° 1401098072; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

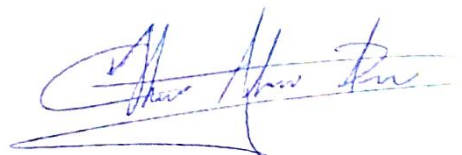
Cuenca, 30 de enero de 2024

Atentamente,



Juan Eduardo Bermeo Cabrera

0107032880



Jhoisy Germania Abarca Duran

1401098072

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, Juan Eduardo Bermeo Cabrera con documento de identificación N° 0107032880 y Jhoisy Germania Abarca Duran con documento de identificación N° 1401098072; expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto de investigación: “Estudio preliminar de la geomorfología de la cuenca hidrográfica del Río Cumbe localizada en el sur del Ecuador”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Civil, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

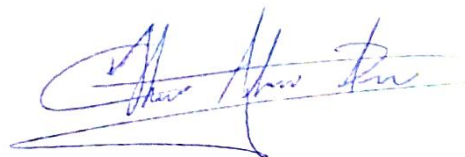
Cuenca, 30 de enero de 2024

Atentamente,



Juan Eduardo Bermeo Cabrera

0107032880



Jhoisy Germania Abarca Duran

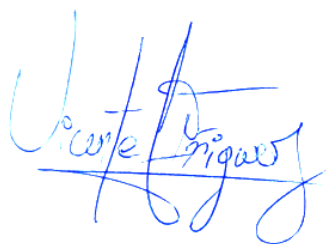
1401098072

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Vicente Mauricio Iñiguez Morán con documento de identificación N° 0102687191, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: ESTUDIO PRELIMINAR DE LA GEOMORFOLOGÍA DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO CUMBE LOCALIZADA EN EL SUR DEL ECUADOR, realizado por Juan Eduardo Bermeo Cabrera con documento de identificación N° 0107032880 y por Jhoisy Germania Abarca Duran, con documento de identificación N° 1401098072, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto de investigación que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 30 de enero de 2024

Atentamente,



Ing. Vicente Mauricio Iñiguez Morán, PhD.

0102687191

DEDICATORIA.

A mis padres, símbolos de perseverancia y constante superación.

Juan Eduardo Bermeo Cabrera

AGRADECIMIENTOS

Mis más sinceros agradecimientos a las personas de buen corazón que aportaron y siguen aportando a mi formación académica:

A Dios y a mis padres que con su ayuda pude llegar y desenvolverme en el ámbito universitario con el objetivo de generar conocimientos y experiencia no solo para el objeto laboral sino para la vida en sí.

A mis abuelos María y Narciso, con quienes residí en esta ciudad, por brindarme su amor infinito. También a Byron, Rosa, Nube, Blake, Enoch, Sammy y Jean.

A mis familiares, que se aproximan a una centena, quienes siempre estuvieron apoyándome incondicionalmente a lo largo de estos 5 años, desde palabras de motivación hasta invaluable recursos físicos, que gracias a Dios fueron de gran valor para ir logrando mis metas propuestas.

Y mis grandes amigos, por acompañarme y enseñarme a disfrutar de esta aventura llamada universidad.

Con amor, Eduardo Bermeo.

AGRADECIMIENTOS

Quisiera expresar mi profundo agradecimiento a todas las personas que me han apoyado de manera significativa a lo largo de mi trayectoria académica.

De manera especial a mis padres Enrique Abarca e Inés Durán, por su inquebrantable apoyo emocional y motivacional; su comprensión y aliento han sido mi fuente de inspiración.

Este logro no hubiese sido posible sin su apoyo y sin la compañía de mis hermanos quienes siempre me inspiran a seguir adelante. Gracias por ayudarme a no rendirme cuando las situaciones se tornaban difíciles.

Agradezco también a mis amigos por siempre sacarme una sonrisa y hacer más llevadera esta etapa universitaria.

Gracias familia y amigos, los quiere Jhoisy Abarca

DEDICATORIA

A mis padres y hermanos; cuyo amor, sacrificio y constante apoyo han sido la base de todas mis conquistas.

Jhoisy Germania Abarca Durán

RESUMEN

Este proyecto investigativo se enfocó en el estudio geomorfológico de la Cuenca Hidrográfica del Río Cumbe ubicada en el sur del Ecuador, desglosándola en tres paquetes de trabajo. En el primero, se realizó un análisis de los principales índices topográficos, destacando las variaciones de altitud, pendiente y rugosidad en las diferentes secciones de la cuenca. El segundo se centró en la identificación y mapeo de deslizamientos superficiales, revelando cambios notables en comparación a mapas previos y proponiendo como factores desencadenantes a la geología propensa a movimientos en masa, cambio de uso de suelo y precipitaciones. Finalmente, el tercer paquete incluyó la generación de redes de drenaje virtual para identificar puntos de iniciación de ríos, con validación de campo para mejorar la precisión, en la que se pudo diferenciar los resultados con dos variaciones de acumulación de flujo.

ABSTRACT

This research project focused on the geomorphological study of the Cumbe River Hydrographic Basin located in southern Ecuador, breaking it down into three work packages. In the first, an analysis of the main topographic indices was carried out, highlighting the variations in altitude, slope and roughness in the different sections of the basin. The second focused on the identification and mapping of surface landslides, revealing notable changes compared to previous maps and proposing geology prone to mass movements, land use change and precipitation as triggering factors. Finally, the third package included the generation of virtual drainage networks to identify river initiation points, with field validation to improve precision, in which the results could be differentiated with two flow accumulation variations.

Contenido

1.	Introducción	1
2.	Problema	3
2.1	Antecedentes	4
2.2	Importancia y alcances.....	4
2.3	Revisión de literatura	8
3.	Objetivos.....	14
3.1	Objetivo general	14
3.2	Objetivos específicos	14
4.	Materiales y métodos.....	15
4.1	Paquete de trabajo 1: Cálculo de los índices de terreno para obtener un mapa geomorfológico de la cuenca del río Cumbe	19
	Índices de terreno:.....	19
	Estudio de mapas previos.....	22
4.2	Paquete de trabajo 2: Clasificación de los deslizamientos superficiales en la Cuenca del Río Cumbe.....	24
4.3	Paquete de trabajo 3: Determinación del área de iniciación de las nacientes de los ríos en la Cuenca del Río Cumbe.	27
	Obtención de la red de ríos:.....	30
5.	Resultados.....	34
5.1	Resultados del paquete de trabajo 1.....	34
	Cálculo de índices de terreno	35
	Elaboración del mapa geomorfológico actualizado.....	47
5.2	Resultados del paquete de trabajo 2.....	51
	Mapa de deslizamientos en Cumbe	52
	Comparación con mapas previos	53
	Análisis de deslizamientos actuales	56
	Deslizamientos predominantes en Cumbe	58
5.3	Resultados del Paquete de Trabajo 3	63
	Análisis de la Red de Drenaje:	63
	Selección de Puntos de Iniciación:	64
	Pruebas de Sensibilidad o posibles escenarios con r.stream.extract:.....	64
	Verificación in situ	68
	Interpretación de resultados.....	71
6.	Conclusiones	72

7.	Recomendaciones.....	74
8.	Referencias bibliográficas	75

1. Introducción

Los deslizamientos de tierra son uno de los peligros naturales más extendidos en la tierra y representan un riesgo en muchos terrenos montañosos (Thomas et al., 2023). Por lo tanto, generan gastos económicos y problemas ecológicos considerables (Vanacker et al., 2003). Estos terrenos son habituales en los Andes del Ecuador.

En los Andes del sur de nuestro país, los deslizamientos de tierras influyen directamente en los cambios morfológicos en los cauces de los afluentes. Generalmente, comprenden fallas superficiales asociados con lluvias intensas y saturación acelerada del suelo (Vanacker et al., 2003). Esto se lo puede atribuir al aumento de la presión demográfica y por consiguiente al desarrollo económico que ha exhortado a los pobladores y agricultores a utilizar zonas potencialmente peligrosas y poco aptas para sus cultivos.

La mayoría de los deslaves son causados por la gravedad; también puede ser causados por las lluvias, terremotos, erupciones volcánicas, presión de agua subterránea, erosión, desestabilización de laderas como resultado de la deforestación. (Acosta, J. 2015).

En la mayoría de los estudios realizados entre los años 2005 y 2010 se concluye que los deslizamientos se dan debido a la evidente deforestación en el lugar y el hecho de convertir los bosques en lugares para pastoreo. La deforestación empeora la erosión y sedimentación de las cuencas, reduciendo así la capacidad de sostener y regular los flujos de agua (Acosta, J. 2015).

El territorio ecuatoriano se ha visto afectado principalmente por los deslizamientos poco profundos provocados por las lluvias, ocasionando cierre de vías, pérdidas de terrenos e incluso de vidas humanas, por lo que se ha propuesto realizar un estudio geomorfológico de la cuenca hidrográfica del río Cumbe lo cual proporcionará información valiosa para la gestión del territorio de la parroquia rural Cumbe, ubicada en la capital de la provincia del Azuay.

La zona mencionada es vulnerable a deslizamientos. Las causas de este problema podrían ser:

- a. El cambio climático. Este fenómeno ha provocado un aumento desmesurado de las lluvias en los últimos años, generando un mayor número de deslizamientos de tierra (Thomas et al., 2023). Situación latente en nuestra región, y a nivel nacional, testigos de la problemática vial que ha incomunicado parcialmente las provincias de Azuay, El Oro y Guayas; por ejemplo, el cierre de las vías: Girón-Pasaje, Naranjal-Molleturo, Molleturo-Cuenca, entre otras vías dentro del país.
- b. La erosión del suelo, GUERRA et al., (2017), indican que la erosión del suelo es un factor que influye directamente en el deslizamiento de tierras porque agota drásticamente la capa superior de la tierra, esto se debe principalmente a la eliminación de la vegetación original con fines agrícolas.

La relación entre las precipitaciones, propiedades del suelo y el uso de la tierra puede producir tasas de erosión excesivas, por lo que el estudio de la erosión del suelo y el movimiento de masas como procesos geomorfológicos son esenciales para empezar a desarrollar estrategias de conservación del suelo.

Es importante considerar la geomorfología para el análisis de la ocurrencia de deslizamientos, ya que esta ayuda a entender las formas de la superficie terrestre, origen, transformaciones y comportamiento actual. Además, señala la configuración morfológica y evolución de las laderas de la zona a estudiar (Aristizábal & Yokota, 2006).

“...Los procesos de inestabilidad son el producto de la geomorfología local, hidrología y condiciones geológicas. La modificación de estas condiciones por procesos geodinámicos, vegetación, usos del suelo y actividades humanas activan movimientos lentos, generalmente

imperceptibles debido a que las propiedades mecánicas del material decrecen gradualmente. Posteriormente, factores como precipitación y sismicidad detonan dichos movimientos lentos en rápidos movimientos en masa” (Aristizábal & Yokota, 2006).

Estos factores son cambiantes con el tiempo y se clasifican en dos variables, las variables cuasi- estáticas, que contribuyen a la susceptibilidad, como es la geología y pendiente de laderas; y las variables dinámicas, que analizan precipitaciones y sismos (Aristizábal & Yokota, 2006).

En este contexto, se realizará un estudio geomorfológico ya que esta rama juega un papel importante para el entendimiento y análisis de desastres naturales, las condiciones ambientales permanecen en constantes cambios no solo por la acción humana sino también por la de la naturaleza. La evaluación y prevención de la ocurrencia de deslizamientos debe ser analizado desde un punto geomorfológico; analizando el proceso evolutivo y el énfasis humano sobre la zona (Aristizábal & Yokota, 2006).

2. Problema

Las lluvias en Ecuador han desencadenado deslizamientos poco profundos, generando consecuencias graves como bloqueo de carreteras, pérdida de tierras y, lamentablemente, vidas humanas. Esta realidad es un riesgo significativo, especialmente en zonas montañosas como Cumbe. Ante esta problemática, surge la necesidad de realizar un estudio inicial sobre la geomorfología y los índices de terreno en Cumbe, Cuenca-Ecuador. Este análisis busca proporcionar información clave que contribuya a la gestión efectiva de la zona y ayude a prevenir y mitigar los impactos de estos deslizamientos.

2.1 Antecedentes

Los deslizamientos de tierra a lo largo de los años han sido muy recurrentes en Ecuador. Un estudio de campo realizado a 12 paisajes seleccionados de las 160 000 hectáreas de bosque tropical que cubre el área ecuatoriana demostró que la tasa de pérdida anual de bosques en 1990 fue de 7,8 millones de hectáreas, entre 2015 y 2020 se tuvo pérdidas de 4,7 millones de hectáreas; mostrando una disminución significativa. Sin embargo, sigue teniendo una de las tasas más altas de deforestación de América del Sur. El SNAP (Sistema Nacional de Áreas Protegidas), cubre aproximadamente el 20% del área ecuatoriana (Fischer et al., 2021).

Si bien es cierto que las tasas de deforestación se han mantenido relativamente, es importante la realización de los análisis socioambientales contextualizados a nivel local; para mejorar la comprensión de los efectos combinados de los impulsores y de los posibles efectos (López, 2022).

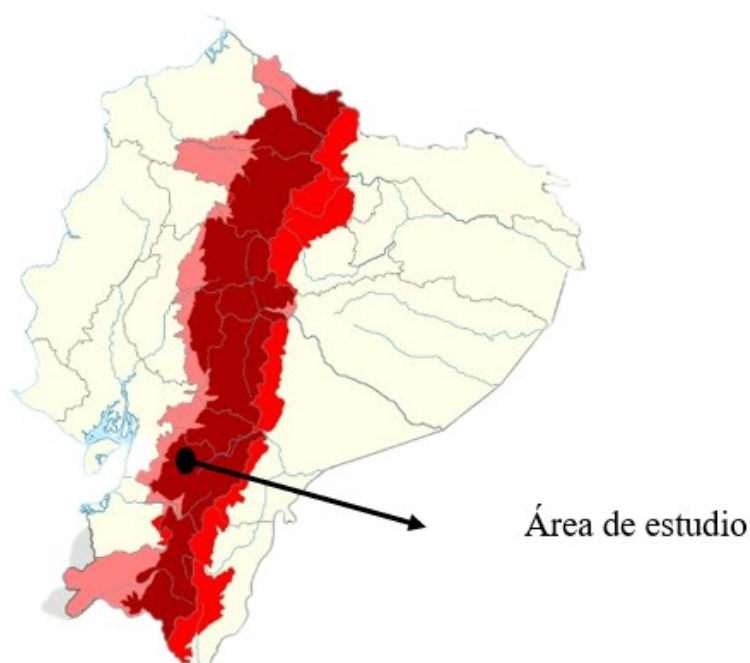
El hábitat de la agricultura se va degradando a medida que avanza la deforestación; esto no quiere decir que sea mayormente en zonas urbanas, redes viales y áreas de terreno suave, también lo es en zonas marginales (López, 2022). Por lo que, los análisis geomorfológicos de dichas zonas ayudarán a su población para gestionar y planificar de mejor manera el uso de sus suelos.

2.2 Importancia y alcances

Los Andes ecuatorianos forma parte del área más angosta de la cordillera de los Andes. Se caracteriza por sus extraordinarias elevaciones montañosas, volcánicas y nevados. Existen varios parques nacionales muy ricos en flora y fauna variada.

Según Google Earth, las coordenadas son 1°15'0" S y 78°31'0" W, en formato DMS (grados, minutos, segundos) o -1.25 y -78.5167 (en grados decimales).

Figura 1 *Los Andes ecuatorianos*



Nota. En el sur de los Andes ecuatorianos se encuentra la Cuenca Hidrográfica del Río Cumbe, representada en la Figura 1 como “Área de estudio”.

Cumbe es una de las 21 parroquias de la ciudad de Cuenca; está ubicada al sur de esta ciudad, a una distancia de 24 km, con una altura de más de 2600 metros sobre el nivel del mar. Esta zona está caracterizada por un régimen de precipitación bimodal, con un patrón de distribución espacial altamente heterogénea. La precipitación media anual es de 930 mm en la parte central y a más de 1100 mm en la parte alta de la cuenca (Chinchilima, 2008).

Sus límites son: al norte con la parroquia Tarqui, al sur con la parroquia Jima. Cumbe tiene un Patrimonio Natural que son sus fuentes de agua, lo cual les hace ser una parroquia

primordial dentro del Cantón, aportando con casi el noventa por ciento del líquido vital a la parroquia, lamentablemente el esfuerzo por mantener sus fuentes libres de contaminación y asentamientos no ha recibido apoyo alguno por parte de las instituciones competentes (Chinchilima, 2008).

Figura 2 *Vista panorámica de Cumbe*



Nota. Se puede observar cómo ha avanzado en gran medida la deforestación del lugar.

Fuente: Iñiguez Vicente, (2009).

La Figura 2 proporciona una visualización acerca del avance progresivo de la deforestación en el área de estudio, se observa diferentes rasgos de cambios significativos en la cobertura vegetal. Este fenómeno puede tener consecuencias ambientales significativas, como la pérdida de biodiversidad, cambios en los patrones hidrológicos. La comprensión de estos cambios es esencial para guiar estrategias de conservación y restauración en el área.

Figura 3 Muestra de territorio de Cumbe



Nota. La zona captada demuestra alta densidad de deslizamientos de tierra. Fuente: Tomado de Google Earth (octubre de 2023).

En la figura 3 se puede observar que la capa vegetal de la zona es interrumpida en diferentes partes por deslizamientos superficiales de tierra, que se aprecian de color café claro. Por lo que es importante tener una base de datos de los deslizamientos actuales de Cumbe.

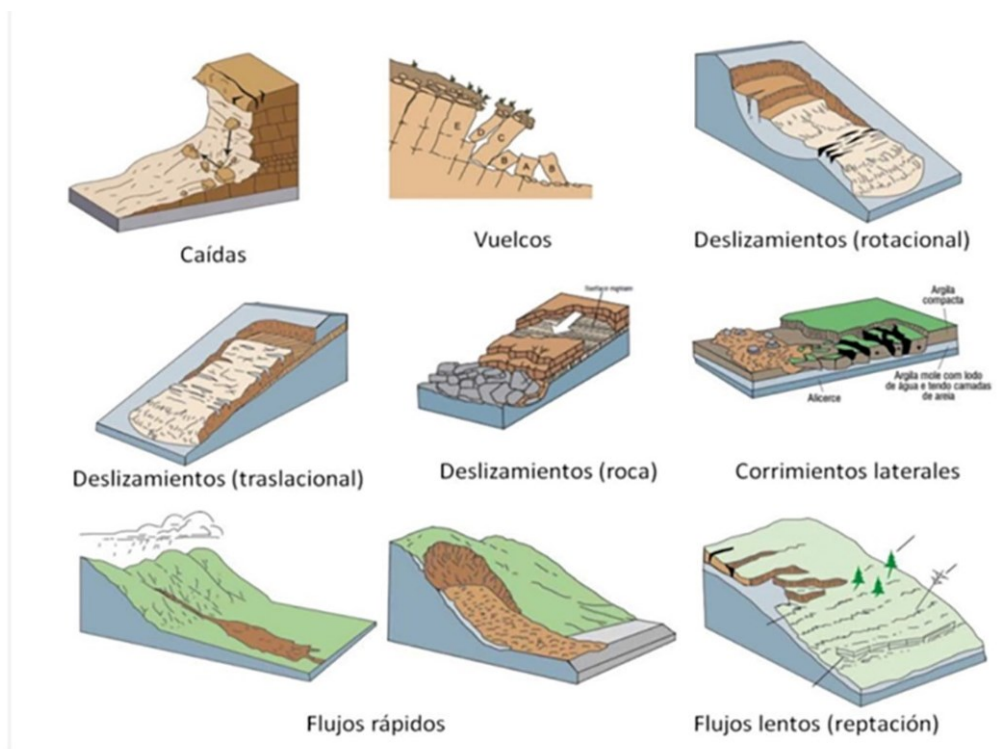
2.3 Revisión de literatura

Los movimientos de tierra van desde los extremadamente lentos hasta los muy rápidos. Los fenómenos que pueden describirse como deslizamiento de tierra pueden implicar seis mecanismos diferentes:

- a. Caída: este movimiento implica el desprendimiento del suelo o de la roca de una cara empinada o acantilado, a lo largo de una superficie en la que se produce poco o ningún desplazamiento de corte (aplicación lineal que desplaza cada punto en una dirección fija). Luego, el material desciende por el aire cayendo, antes de que el impacto con el suelo resulte en la desintegración, con fragmentos que posteriormente rebotan y ruedan a cierta distancia (Lee & Jones, 2014).
- b. Derrocamiento: esta caída implica la rotación hacia adelante desde una pendiente de una masa de suelo o roca alrededor de un punto o un eje por debajo del centro de gravedad de la masa desplazada. La evolución posterior de la masa desplazada es similar a la de una caída (Lee & Jones, 2014).
- c. Propagación lateral: es la extensión de un suelo cohesivo o una masa de roca sobre una capa deformable inferior, combinada con un hundimiento general de la masa fracturada superior en el material subyacente más blando. En la superficie de ruptura no se le toma como una superficie de corte intenso y, por lo tanto, a menudo no está bien definida. La propagación también puede ser el resultado del flujo y la extrusión de una capa de material subyacente más suave (Lee & Jones, 2014).
- d. Fluida: es el movimiento turbulento de una masa fluidizada (una corriente ascendente de fluido es usado para suspender partículas sólidas) sobre un lecho rígido, con agua o aire como fluido de poros. (Lee & Jones, 2014).

- e. Deslizamiento: es un movimiento descendente de un suelo como un cuerpo uniforme que se lleva a cabo en zonas de intensa deformación por corte. Los deslizamientos se caracterizan por la presencia de una superficie de corte bien definida en contacto entre la masa en movimiento y el suelo (roca subyacente) (Lee & Jones, 2014).
- f. Movimientos compuestos y complejos: tienen lugar cuando se producen dos o más tipos de desplazamiento dentro de la misma zona de deslizamiento de tierra. Por ejemplo, el deslizamiento se puede dividir en grupos rotacionales y traslacionales dependiendo de si la superficie de corte basal es curva o plana, pero en algunos casos las fallas de rotación tienden hacia abajo en fallas de traslación. Del mismo modo, hay fallas que representan una mezcla de flujo y deslizamiento, que se denominan deslizamientos de flujo (Lee & Jones, 2014).

Figura 4 *Tipos de Deslizamientos*



Nota. La clasificación de los tipos de deslizamiento se basa en la forma en que se produce el movimiento de tierras Fuente: Rodríguez, E. (2021).

La consideración de aspectos geomorfológicos es fundamental al analizar la presencia de deslizamientos, ya que es necesario comprender las características del terreno y los procesos que dan forma a la superficie. Los procesos en las vertientes son componentes esenciales de la geomorfología, siendo variables que influyen en la evolución del paisaje. En los últimos años, el aumento de la población y la expansión de asentamientos humanos en esta área han incrementado el impacto de desastres naturales.

El alto grado de urbanización y la morfología particular del lugar han llevado a que muchas personas residan en laderas propensas a deslizamientos, resultando en numerosos

estudios sobre la ocurrencia de deslizamientos en la región. Algunos de estos estudios han resaltado la necesidad de investigaciones que ayuden a comprender la dinámica de las laderas y su relación con la aparición de deslizamientos. La evolución del paisaje proporciona la mejor explicación para comprender la sensibilidad de los elementos del paisaje ante intervenciones humanas.

En este contexto, es crucial identificar no solo la amenaza generada o acentuada por la expansión urbana, sino también aquella asociada a las condiciones geomorfológicas según su ubicación (Aristizábal & Yokota, 2006).

A lo largo del tiempo, se han generado diversas formas de intervención en cuencas hidrográficas para el manejo de los recursos hídricos. Las intervenciones más antiguas se centraban en la gestión de recursos hídricos para la navegación, suministro de agua, control de inundaciones, vigilancia de la calidad del agua, mitigación de la erosión y generación de energía. Posteriormente, se incorporaron intervenciones que se enfocaron en la gestión ambiental, un enfoque más reciente que destaca la conservación del medio ambiente y los recursos. No obstante, el crecimiento desmedido de la población y explotación desmedida de los valles han afectado la sostenibilidad del recurso, incluso en áreas con excedentes hídricos.

GRASS (Geographic Resources Analysis Support System) es un sistema de información geográfica (SIG) que opera bajo la licencia GNU General Public License (GPL). Tiene la capacidad de manejar datos tanto en formato ráster como vectorial, y cuenta con herramientas para el procesamiento digital de imágenes.

El origen de GRASS se remonta a 1982, cuando fue desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros de Investigación de Ingeniería de la Construcción del Ejército de los Estados Unidos. Su propósito inicial era supervisar y gestionar aspectos medioambientales en territorios bajo la

jurisdicción del Departamento de Defensa. En 1991, GRASS se hizo accesible al público a través de internet, ganando popularidad entre universidades, empresas y agencias gubernamentales. En 1997, la Universidad de Baylor asumió la responsabilidad de su desarrollo. Finalmente, en 1999, el código del programa fue liberado, convirtiéndose en uno de los primeros ocho proyectos de la Fundación OsGeo (Alonso, 2021).

La exploración de las cuencas hidrográficas en un Sistema de Información Geográfica (SIG) adquiere una relevancia significativa debido a las diversas funciones que desempeñan en el entorno, tales como las implicaciones hidrológicas, ecológicas, ambientales y socioeconómicas.

GRASS, por su parte, ofrece los algoritmos esenciales para la creación y análisis eficiente de estas cuencas (por ejemplo, r.watershed, r.fill, r.flow, r.basins...) (Alonso, 2021)

La cuenca hidrográfica comúnmente se emplea como unidad de planificación para la gestión de recursos hídricos. No obstante, es crucial destacar que las cuencas hidrográficas de los ríos principales suelen estar compuestas por cuencas de menor tamaño, como los ríos tributarios. En Ecuador, se incorpora además el concepto de demarcación hidrográfica, definido por la Unión Europea como: "la zona marina y terrestre compuesta por una o varias cuencas hidrográficas contiguas, junto con las aguas subterráneas y costeras asociadas" (Vascones et al., 2019).

Las cuencas hidrográficas representan áreas del territorio naturalmente definidas donde todos los procesos socioecológicos están intrínsecamente interconectados. En este contexto, el manejo de las cuencas implica un proceso de planificación, implementación y evaluación de acciones, con la participación organizada e informada de la población. La posibilidad de llevar a cabo un manejo de cuenca comienza al reconocernos como habitantes de esta y, por ende,

como beneficiarios de sus servicios ecosistémicos. Estos servicios se originan a través de las funciones naturales de la cuenca, desde las áreas más elevadas, como los parteaguas, hasta los puntos de salida, como el mar o un lago, al mismo tiempo que se debe reconocer la responsabilidad como generadores de impactos que se acumulan en las áreas más bajas.

El entendimiento de la dinámica hidrológica, ecosistémica, cultural, social e institucional de las cuencas hidrográficas implica, en primer lugar, conocer nuestro entorno, comprender el origen de los bienes y servicios ambientales de los cuales nos beneficiamos, como el agua, la biodiversidad, el suelo, los bosques y las selvas. Estos elementos desempeñan diversas funciones y están interrelacionados a través del componente unificador del agua, que conecta de manera inseparable la cuenca alta con la cuenca baja (Cotler Avalos et al., 2013).

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Realizar un estudio geomorfológico de la cuenca hidrográfica del Río Cumbe, ubicada en los Andes del sur del Ecuador, mediante la caracterización y mapeo de su morfología, incluyendo deslizamientos superficiales y la determinación del área de iniciación de los ríos en la cuenca alta, lo cual proporcionará información valiosa para la gestión del territorio.

3.2 Objetivos específicos

- Calcular los principales índices del terreno para la cuenca hidrográfica del río Cumbe. Esto con la finalidad de obtener un mapa geomorfológico, el cual proporcionará información sobre la topografía, la pendiente, la irregularidad y otros parámetros relacionados con la configuración del terreno en la zona de estudio.
- Realizar un inventario de los deslizamientos superficiales presentes en la cuenca del río Cumbe, y los posibles factores desencadenantes
- Determinar el área de iniciación de los ríos en la Cuenca Alta del Río Cumbe a través de la identificación y mapeo de las zonas donde los ríos se originan. Estas influyen en la formación y el comportamiento de los ríos en la cuenca alta. Por lo que, permitirá comprender mejor los procesos fluviales y contribuirá a la gestión sostenible de los recursos hídricos en la región.

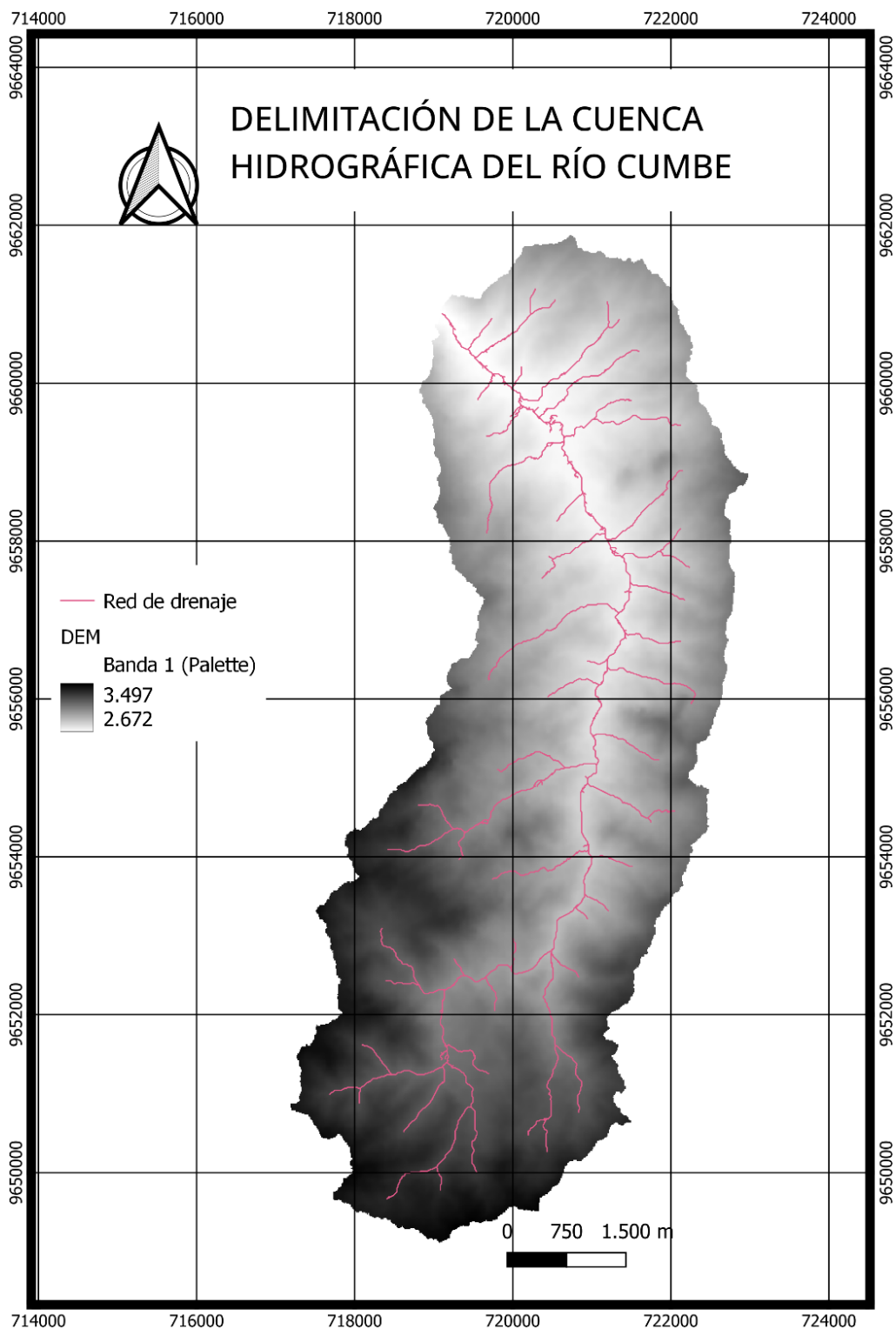
4. Materiales y métodos

Para la delimitación de la cuenca del río Cumbe, se utilizó el software QGIS, que opera con algoritmos de GRASS y SAGA GIS. Todo el proceso se llevará a cabo dentro de QGIS, comenzando con la importación del modelo de elevación digital.

Es importante destacar que contamos con información de estudios previos (Iñiguez et al., 2016). Esta información incluye una base de datos detallada de los ríos, calles y un Modelo Digital de Elevación (DEM) con una resolución de 12.5 x 12.5 metros. Este conjunto de datos constituirá la base principal para nuestro análisis y modelado de la cuenca.

A continuación, se delimita la zona de estudio con la ayuda del programa QGIS, se estudiará el área del río Cumbe, pero para identificar las nacientes de los ríos, se dirige el enfoque hacia una subcuenca situada en la parte alta.

Figura 5 Delimitación de la Cuenca Hidrográfica del Río Cumbe



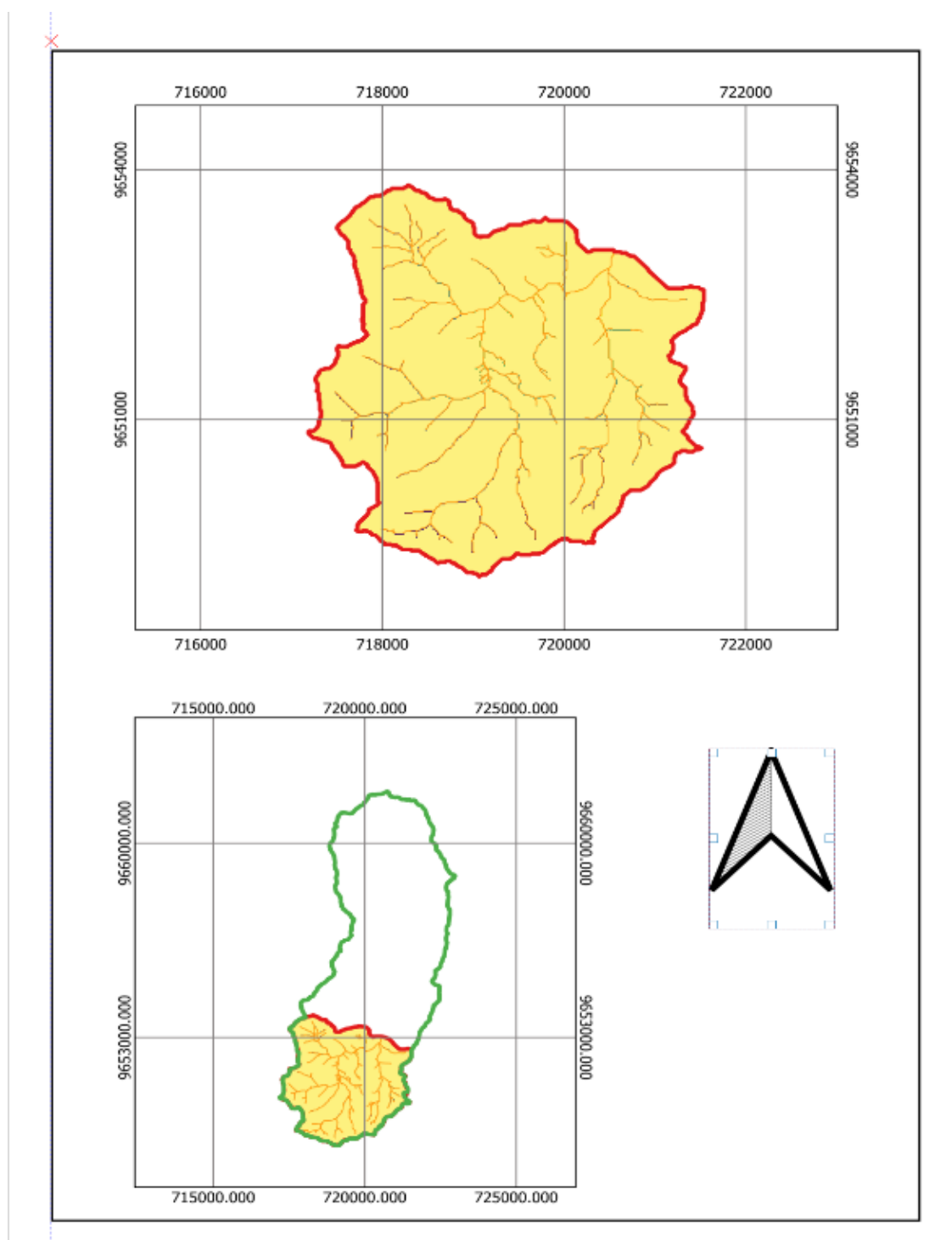
Nota. El modelo de elevación digital que será utilizado para el objeto del proyecto, incluido la red de drenaje.

La figura 5 indica la Delimitación de la Cuenca Hidrográfica del Río Cumbe, en ella se observa el modelo de elevación digital con su rango de altura, siendo de color blanco los valores más bajos y de color negro los valores más altos, estos están representados en metros sobre el nivel del mar. Además, de color rojo claro se observa las líneas que representan la red de drenaje de dicha Cuenca Hidrográfica.

Para determinar las áreas de iniciación de ríos, se delimitó una subcuenca que será el área de estudio para el paquete de trabajo número 3, la que se representa en la figura 6. Esta zona es caracterizada por sus altos valores de elevación.

Figura 6

Subcuenca en la parte alta de Cumbe



Nota. La parte más alta de la Cuenca Hidrográfica del Río Cumbe, de color amarillo, es un sector potencial para encontrar las áreas de iniciación de los ríos. Fuente: Autores.

4.1 Paquete de trabajo 1: Cálculo de los índices de terreno para obtener un mapa geomorfológico de la cuenca del río Cumbe

Esta metodología consiste en realizar el cálculo de los índices de terreno y utilizar estos datos para elaborar un mapa geomorfológico del sector Cumbe, en los Andes ecuatorianos, para así comprender la configuración del terreno en la zona de estudio. Esto proporcionará información sobre la topografía, la pendiente, la rugosidad y otros parámetros geomorfológicos relevantes.

Obtención de datos topográficos: Modelo de elevación digital existente para el área de estudio, tiene una resolución espacial igual a 12.5 x 12.5 metros.

Índices de terreno:

Utilizando los datos topográficos, en el software QGIS se aplican diferentes algoritmos y técnicas para calcular los índices de terreno relevantes, como el índice de pendiente, el índice de rugosidad, el índice de elevaciones, entre otros. Los cuales proporcionarán una comprensión detallada de las características del terreno en la Cuenca Hidrográfica del Río Cumbe.

Índice de pendiente:

El índice de pendiente es una medida de inclinación del terreno en una parte de la zona de estudio. Representa la relación entre la diferencia de altitud y la distancia. Cuanto mayor sea la pendiente, mayor será el valor del índice. Se puede calcular en grados y en porcentaje (Ortega et al., 2015).

Las zonas con altos valores en el índice de pendientes indicarán áreas con pendientes más empinadas. Esto es crucial para la identificación de áreas de riesgo de deslizamientos, erosión y otros eventos relacionados con la topografía.

El conocimiento de las pendientes es esencial para la planificación del uso del suelo. Áreas con pendientes pronunciadas pueden ser inapropiadas para ciertos tipos de desarrollo, como construcciones o agricultura intensiva.

Las pendientes son un factor importante en el estudio de la hidrología. Pueden influir en la dirección y velocidad del flujo del agua, lo que es crítico para comprender la dinámica del agua en el paisaje.

Un mapa de índice de pendientes es fundamental para la evaluación de riesgos naturales como deslizamientos de tierra. Lugares con pendientes pronunciadas pueden ser más propensos a eventos catastróficos en caso de lluvias intensas o terremotos.

Para la planificación de infraestructuras, como carreteras o senderos, conocer las pendientes es esencial para garantizar la accesibilidad y la seguridad.

En resumen, un mapa de índice de pendientes ofrece una representación visual de la variabilidad de las pendientes en un área, lo que es crucial para diversas disciplinas, desde la geomorfología hasta la planificación urbana y la gestión del riesgo.

Curvas de nivel

Las curvas de nivel son trazados que conectan puntos o elevaciones con la misma altitud en un mapa. Se trata de seccionar la superficie del terreno mediante una sucesión de planos paralelos distanciados por intervalos. De manera en que estas líneas que se representan proporcionan información acerca de las variaciones de altitud en un área específica.

Cabe recalcar, que la proximidad de numerosas líneas de contorno indica un relieve más pronunciado, es decir, una mayor pendiente. En cambio, cuando dos líneas están considerablemente separadas, sugiere un relieve más suave, indicando una menor inclinación del terreno.

Las curvas de nivel, al mismo tiempo, contribuyen significativamente a la visualización de la morfología del terreno, permitiendo la identificación de colinas, valles y mesetas de manera clara y detallada.

Cuando se trata de la planificación del uso del suelo, las curvas de nivel resultan esenciales al facilitar la identificación de áreas planas y elevaciones, ofreciendo perspectivas cruciales para decisiones informadas en la gestión del territorio.

En el ámbito del estudio de la hidrología, las curvas de nivel revelan la disposición de las elevaciones, una información vital para comprender el flujo del agua en el terreno y diseñar estrategias de manejo hídrico efectivas.

En resumen, un mapa de curvas de nivel es una herramienta esencial para entender la topografía y la elevación del terreno, siendo fundamental para diversas disciplinas, desde la geografía hasta la planificación urbana y la gestión del medio ambiente.

Irregularidad

Las irregularidades topográficas de la superficie pueden desempeñar un papel crucial en la amplificación de los movimientos del suelo y en la intensificación de los daños a las construcciones y otros sistemas fundamentales.

La irregularidad topográfica, hace referencia a las variaciones y desniveles en la superficie terrestre, como elevaciones, depresiones y pendientes pronunciadas. Estas características influyen en aspectos como la hidrología y la geomorfología. En el contexto de los sismos, la topografía puede afectar la propagación y amplificación de las ondas sísmicas, dando lugar a fenómenos como la amplificación sísmica, que puede influir en la vulnerabilidad de las estructuras y la gravedad del daño.

Cambios en la irregularidad del terreno también pueden influir en los patrones de drenaje. Áreas con alta irregularidad podrían tener patrones de drenaje más complejos.

La información sobre la irregularidad del terreno también es relevante para la planificación del uso del suelo. Las áreas más irregulares pueden presentar desafíos para el desarrollo urbano o requerir consideraciones especiales.

En resumen, un mapa de índice de irregularidades ofrece una representación visual de la variabilidad topográfica en una región específica, lo que puede ser valioso para diversos estudios y aplicaciones, desde la geomorfología hasta la planificación del uso del suelo.

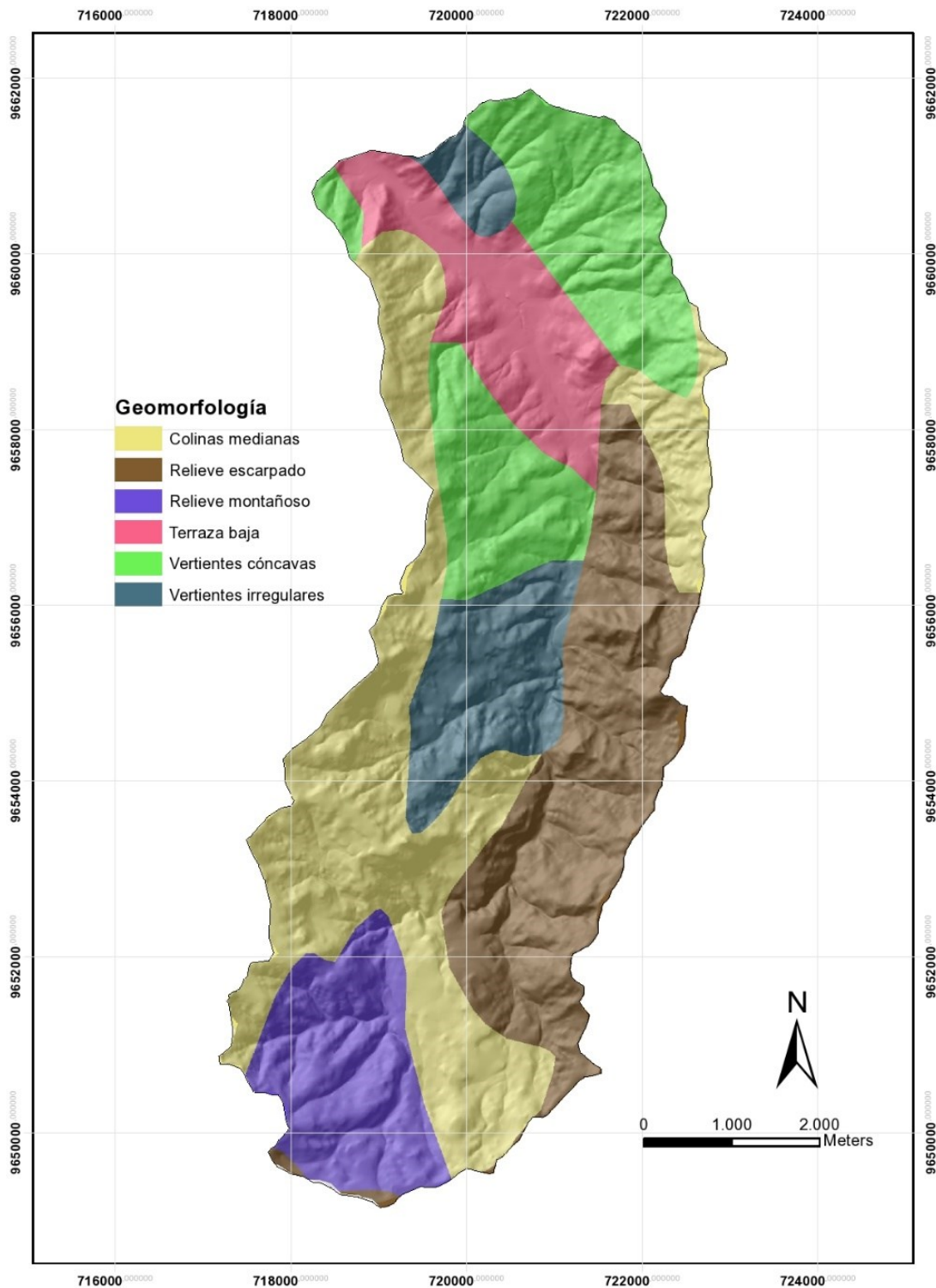
El histograma de irregularidades se utiliza para visualizar la distribución de las variaciones en un conjunto de datos, específicamente en el contexto topográfico. Este tipo de gráfico representa la frecuencia de diferentes altitudes o elevaciones en el área de estudio. Examinar este histograma puede revelar patrones, tendencias y características destacadas en la topografía del área, planificación del uso del suelo. En esencia, proporciona una representación visual que ayuda a comprender la complejidad y estructura del terreno.

Una vez obtenidos los índices de terreno, se realiza un análisis detallado e interpretación de los resultados. Esto implica identificar y mapear las diferentes unidades geomorfológicas presentes en el área de estudio, como laderas, valles, entre otras. Centrándonos en las zonas que indiquen la presencia de procesos geológicos activos, como los deslizamientos superficiales.

Estudio de mapas previos

El mapa geomorfológico de la figura 7, desempeña un papel crucial en la comprensión de la dinámica de la geomorfología de la cuenca. Su generación se basó en datos recopilados hasta el año 2003, lo que subraya la necesidad de una actualización.

Figura 7 Mapa geomorfológico previo.



Nota. La Cuenca Hidrográfica del Río Cumbe representa una geomorfología muy variada. Fuente: Broekaert Sander, (2012).

Se propone realizar la corrección del mapa de la figura 7, con el objetivo de dotarlo de una mayor precisión y detalle en sus características. Se pretende lograr esto mediante la integración de datos de elevación más recientes, los cuales se dispone para realizar este estudio, específicamente los pertenecientes al 2013. Este proceso de actualización no solo fortalecerá la fiabilidad del mapa, sino que también permitirá una interpretación más precisa y detallada de la evolución geomorfológica de la cuenca en estudio.

Este mapa no solo servirá como una representación visual de las unidades geomorfológicas identificadas, sino que también será una herramienta fundamental para la gestión efectiva del territorio. El enfoque del proyecto incluirá la realización de comparaciones y análisis detallados de los patrones espaciales y las relaciones entre los diversos índices de terreno.

Este análisis profundo se orienta a proporcionar una comprensión más completa y detallada de la geomorfología del terreno bajo estudio.

4.2 Paquete de trabajo 2: Clasificación de los deslizamientos superficiales en la Cuenca del Río Cumbe.

Esta metodología de trabajo se enfoca en clasificar los deslizamientos superficiales presentes en el sector Cumbe.

Identificación y mapeo de los deslizamientos superficiales: Se llevará a cabo un inventario de los deslizamientos superficiales existentes en el área de estudio.

Clasificación de los deslizamientos: Se analizarán las características geomorfológicas de los deslizamientos mediante visualización en el programa Google Earth, definiendo a qué tipo de deslizamientos superficiales pertenecen. Esto ayudará a comprender los procesos y factores desencadenantes asociados a los deslizamientos superficiales.

Evaluación del potencial de riesgo: Identificando los deslizamientos ocurridos, se evaluará el potencial de riesgo de los deslizamientos superficiales clasificados. Esto implicará analizar la proximidad de los deslizamientos a zonas de interés como viviendas y su acceso vial a ellas, con el fin de determinar el grado de peligro que representan.

Recomendaciones de gestión: Con base en la caracterización y evaluación de los deslizamientos superficiales, se puede dar recomendaciones para evitar los riesgos. Estas podrían incluir medidas preventivas, técnicas de estabilización de laderas o estrategias de planificación territorial para reducir la exposición y vulnerabilidad frente a los deslizamientos.

Figura 8 Zona de Cumbe con Deslizamientos visibles.



Nota. Los deslizamientos superficiales son visibles en los terrenos de Cumbe. Fuente: Google Earth (consultado en octubre de 2023).

Mediante Google Earth, en la Figura 8, se puede observar imágenes del 2023 de Cumbe, en la cual se nota con relativa claridad los deslizamientos superficiales que han ocurrido hasta el año mencionado. Resulta una guía de calidad para el desarrollo del inventario y mapeo de los deslizamientos en la Cuenca Hidrográfica del Río Cumbe.

Figura 9 *Mapa satelital de Cumbe importado a QGIS.*



Fuente: Tomado de QGIS, (octubre de 2023).

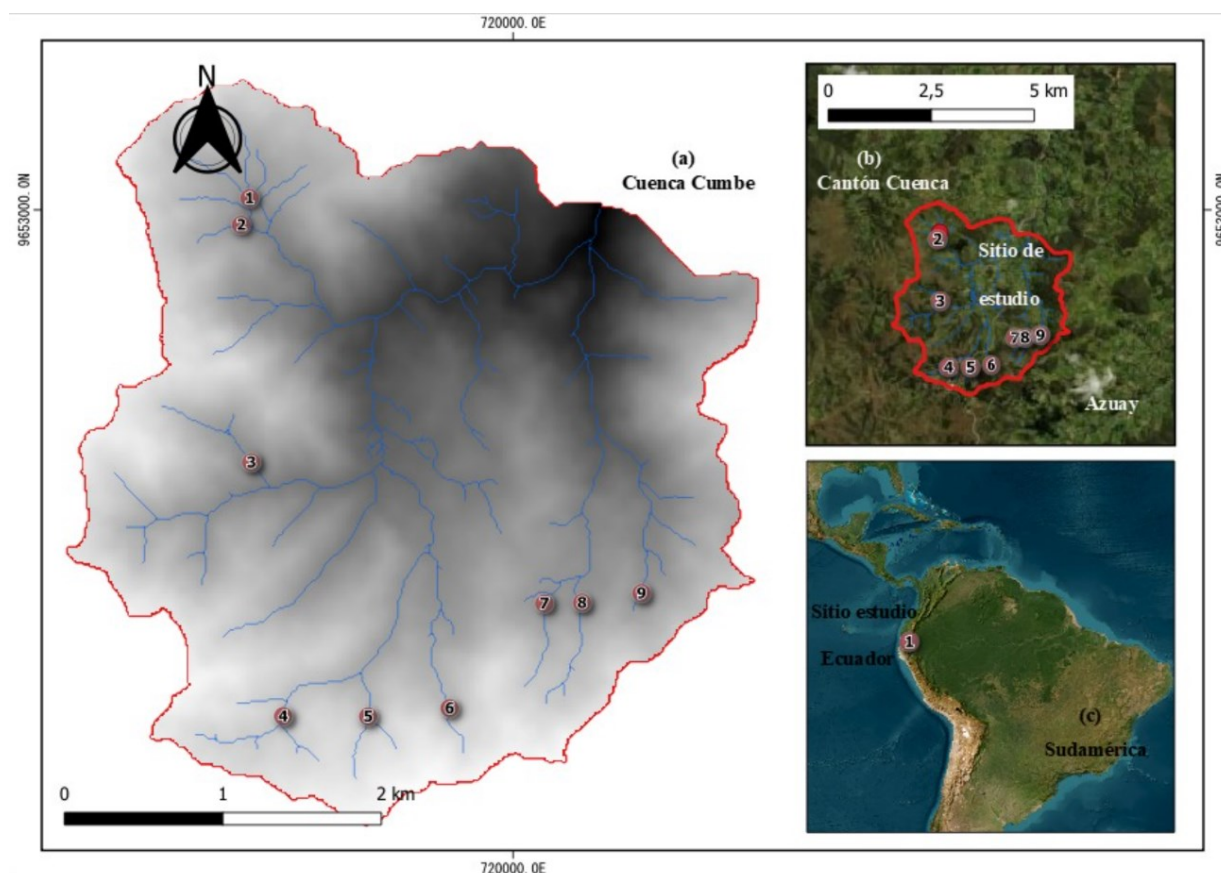
La Figura 9, indica que QGIS permite importar el mapa satelital de Cumbe, el cual servirá de ayuda para identificar de manera puntual los deslizamientos existentes en la zona de estudio.

4.3 Paquete de trabajo 3: Determinación del área de iniciación de las nacientes de los ríos en la Cuenca del Río Cumbe.

Este objetivo se centra en determinar el área de iniciación de las nacientes de agua en la Cuenca Hidrográfica del Río Cumbe, para comprender los procesos fluviales y contribuir a la gestión sostenible de los recursos hídricos en la región.

Para la realización de este paquete de trabajo, se dirige el estudio hacia la zona alta de Cumbe, la cual se encuentra delimitada en la figura 10.

Figura 10 Delimitación de la subcuenca en la parte alta de Cumbe.



Nota. Se muestra la subcuenca que será objeto de estudio para la iniciación de ríos.

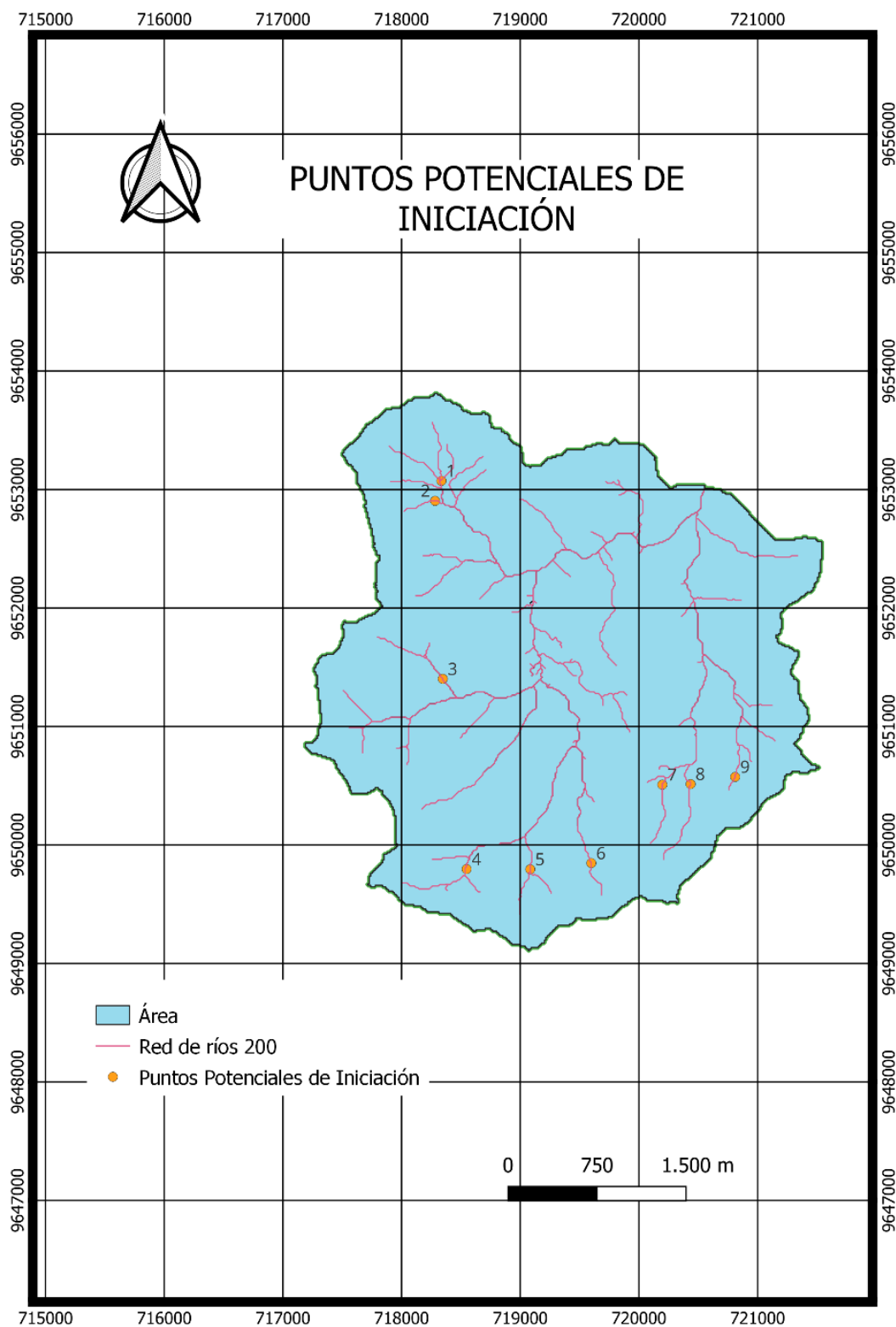
Fuente: Autores.

Identificación de las fuentes de agua: Se realizará un estudio para identificar las fuentes de agua y los puntos de inicio de los ríos en la cuenca alta. Esto implica la recolección de datos de la topografía y la geología de la región.

El estudio consiste en identificar patrones de canales y analizar la relación entre la densidad de canales y la pendiente del terreno. Se considera que las áreas con alta densidad de canales y pendientes más bajas son las áreas de inicio de escorrentía (Lucà et al., 2014).

En la siguiente figura se muestra el mapeo del área de iniciación de ríos:

Figura 11 *Puntos Potenciales de Iniciación de Ríos en la Cuenca de Cumbe.*



Nota. Puntos potenciales de iniciación de ríos de color naranja debidamente enumerados, dentro de la subcuenca de la parte alta de Cumbe. Fuente: Autores.

Mapeo del área de iniciación: Utilizando los datos recopilados, se obtiene un mapeo potencial del área de iniciación de los ríos en el área de estudio, como lo demuestra la Figura 11. Esto permite visualizar y comprender la distribución espacial de las fuentes de agua y los patrones de flujo en la región.

Verificación in situ: Se procederá a visitar las cuencas altas para verificar las áreas de iniciación de los ríos obtenidas en el programa QGIS. La visita debe ser con previo permiso a los moradores de la zona y con herramientas GPS para ubicarnos.

Obtención de la red de ríos:

Se partió desde un Modelo Digital de Elevación (MDE) 12.5 x 12.5m.

Se utiliza la herramienta Watershed para llevar a cabo la delimitación de cuencas hidrográficas en el área de estudio. Este paso es fundamental para comprender la estructura de la red de drenaje y proporciona la base necesaria para los análisis subsiguientes.

Se utiliza la herramienta `r.stream.extract` en GRASS GIS, la cual realiza la extracción de la red de transmisión.

La herramienta `r.stream.extract` extrae secuencias tanto en formato ráster como vectorial a partir de una entrada obligatoria elevación mapa y una entrada opcional Mapa de acumulación.

La herramienta `r.stream.extract` en GRASS GIS, se utiliza en el análisis hidrológico y geomorfológico para extraer información específica de la red de drenaje generada mediante el análisis de flujo en una cuenca.

Esta herramienta opera en un modelo de elevación digital (DEM) con el cual se analiza la topografía de una cuenca hidrográfica y se obtiene información detallada sobre la red de drenaje.

Funciones principales de la herramienta:

- Extracción de Parámetros Hidrológicos:

Permite extraer una variedad de parámetros hidrológicos, como longitud de arroyos, área de cuencas, densidad de corrientes, entre otros parámetros que son cruciales para comprender la dinámica del agua en una cuenca.

- Generación de Red de Drenaje:

Facilita la creación de una red de drenaje detallada. Se puede obtener información sobre la jerarquía de los arroyos, la longitud del arroyo principal, la densidad de la red, entre otros.

- Caracterización de Cuenca:

Se obtiene información sobre la forma y características geomorfológicas de la cuenca, lo que es esencial para comprender cómo el agua se mueve y se acumula en la cuenca.

- Análisis de Conectividad Hidrológica:

Ayuda a analizar la conectividad entre diferentes partes de la cuenca. Se puede identificar áreas que son más críticas para el flujo de agua y entender cómo estas áreas contribuyen al sistema hidrológico en general.

Estas funciones son esenciales para lograr nuestro objetivo encontrando una red clara desde las nacientes de los ríos.

Modo de operación según QGIS:

Según la información proporcionada por la ayuda de QGIS, las celdas NULL (que no tienen datos) en el mapa de entrada elevación se ignoran, los valores cero y negativos son datos de elevación considerados válidos. Para evitar distorsiones, se deben llenar las brechas en el mapa de elevación que se encuentren dentro del área de interés, con la herramienta `r.fillnulls`.

En el análisis hidrológico, todas las celdas que no son NULL y que no tienen un valor de cero en el mapa de depresiones se considerarán auténticas depresiones. Es importante mencionar que las corrientes no se desviarán fuera de estas depresiones identificadas. Si una región está designada como depresión, pero el modelo de elevación no refleja una depresión en esa área, las corrientes no se detendrán allí. Para asegurar la coherencia, si empleamos mapas de acumulación de flujo y de depresiones reales, se espera que el mapa de acumulación de flujo coincida con el mapa de depresiones. Esto garantiza que el flujo no se extienda más allá de las depresiones indicadas. En caso de que se proporcione un mapa de depresiones, se aconseja utilizar la acumulación de flujo calculada internamente para una mayor precisión en el análisis hidrológico.

La opción de umbral define el valor mínimo de acumulación que activará una nueva secuencia, siendo opcionalmente modificado.

La opción `stream_length` define la longitud mínima de la corriente en número de celdas para segmentos de corriente de primer orden. Todos los segmentos de corriente de primer orden más cortos que `stream_length` se eliminarán.

Con esta opción, se pretende crear dos mapas, uno con valor alto y otro con bajo valor, para entender la variación en las redes de drenaje generadas y comparar los resultados en campo.

El mapa raster de dirección de salida contiene la dirección del flujo para todas las celdas no NULL en la elevación de entrada. La dirección del flujo sigue el tipo D8 con un rango de 1 a 8. Multiplicar los valores por 45 proporciona los grados CCW desde el Este. Durante el adelgazamiento, la dirección del flujo se ajusta, tomando atajos y omitiendo células eliminadas en el procedimiento de adelgazamiento.

Extracción de Corriente:

Si no se proporciona ningún mapa de acumulación, la acumulación de flujo se determina con un análisis hidrológico similar a `r.cuenca`, utilizando el algoritmo MFD (FD8) según Holmgren 1994, similar a `r.cuenca`. La opción de umbral determina el número de corrientes y la complejidad de las redes de corrientes. Cada vez que la acumulación de flujo alcanza el umbral, se genera una nueva corriente que se inicia y se rastrea aguas abajo hasta su punto de salida. Como en `r.watershed`, la acumulación de flujo se calcula como el número de celdas que drenan a través de una celda.

Definición de una Región de Interés:

El procedimiento de extracción de corriente puede restringirse a una región de interés específica, como una subcuenca, estableciendo la región computacional con `g.region` y/o creando una máscara. Dicha región de interés debería ser una zona de captación completa, porque debe incluir el área aguas arriba de un punto de salida y debe estar amortiguada con al menos una celda.

El mapa ráster `stream_raster` de salida almacena las corrientes extraídas, donde los valores de las celdas codifican una ID única para cada segmento de flujo.

5. Resultados

A continuación, se demuestran los resultados obtenidos para los 3 paquetes de trabajo impuestos.

5.1 Resultados del paquete de trabajo 1

En el proceso, se aplicaron algoritmos y técnicas en el software QGIS para calcular índices como el de pendiente, rugosidad y elevaciones, utilizando los datos topográficos mencionados. Se creó un mapa de pendientes para representar la inclinación del terreno. Se destaca la importancia de las irregularidades topográficas, como elevaciones, depresiones y pendientes pronunciadas, que pueden influir en la amplificación de movimientos sísmicos y en el daño a estructuras. Se realizaron tablas de valores que indican comparaciones entre los índices de terreno lo cual representa una herramienta para la elaboración del mapa geomorfológico.

Posteriormente, se realizó un análisis detallado de los índices de terreno obtenidos, identificando y cartografiando unidades geomorfológicas como laderas y valles. Se puso énfasis en las zonas que podrían indicar la presencia de procesos geológicos activos, como deslizamientos superficiales.

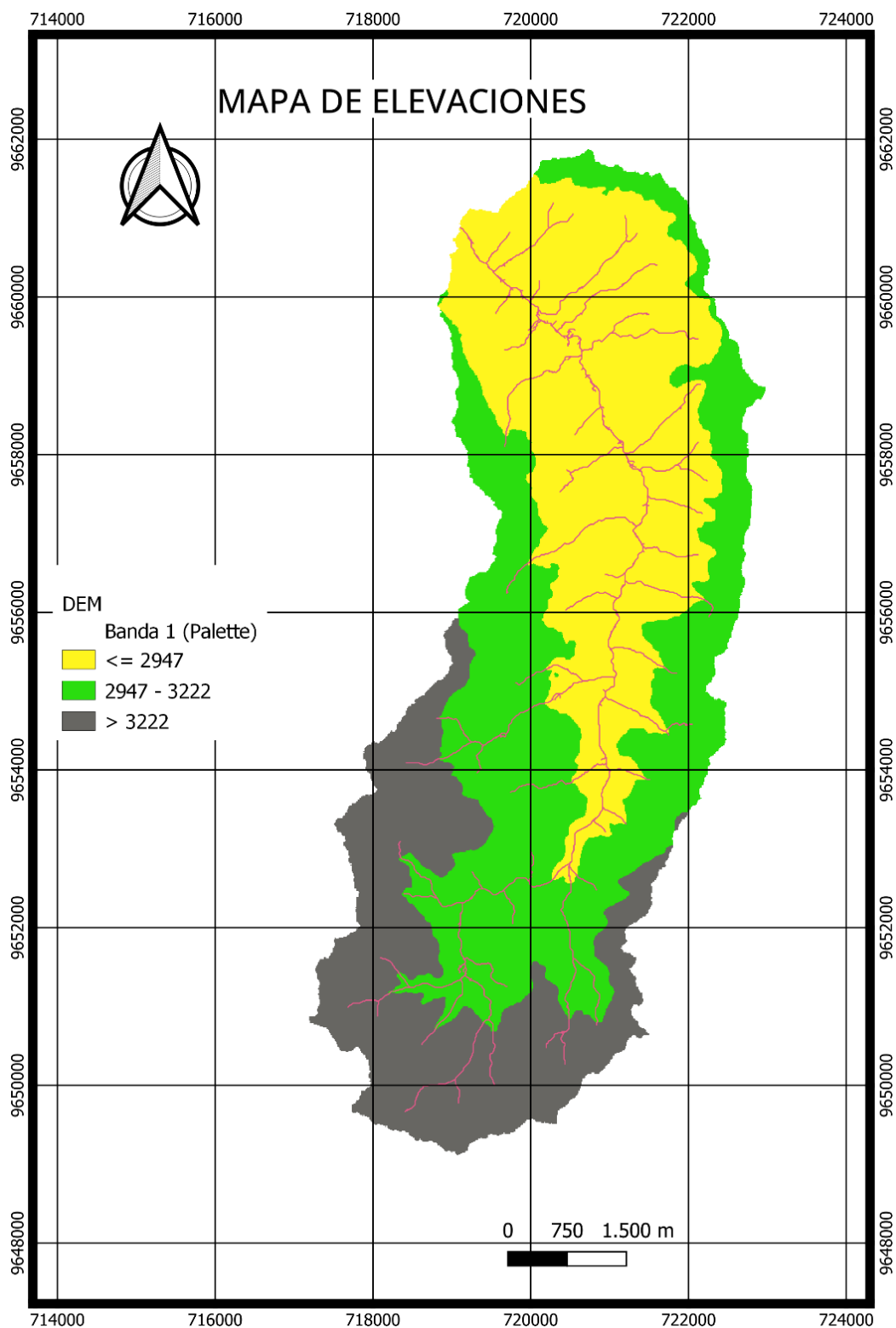
Luego, se elaboró un mapa geomorfológico de la Cuenca Hidrográfica del Río Cumbe utilizando los resultados del análisis e interpretación de los datos. Este mapa visualiza las unidades geomorfológicas identificadas y proporciona información valiosa para la gestión del territorio, incluyendo la comparación y análisis de patrones espaciales y relaciones entre los diferentes índices de terreno.

Cálculo de índices de terreno

Índice de elevación

En la figura 12 se observa la Cuenca Hidrográfica del Río Cumbe clasificada en intervalos iguales según su altura, de color amarillo se encuentra la “Cuenca Baja”, que tiene menos de 2947 msnm. De color verde se visualiza la “Cuenca Media” que tiene un rango de altura entre 2947 y 3222 msnm. Y por último la “Cuenca Alta” con elevaciones de más de 3222 msnm.

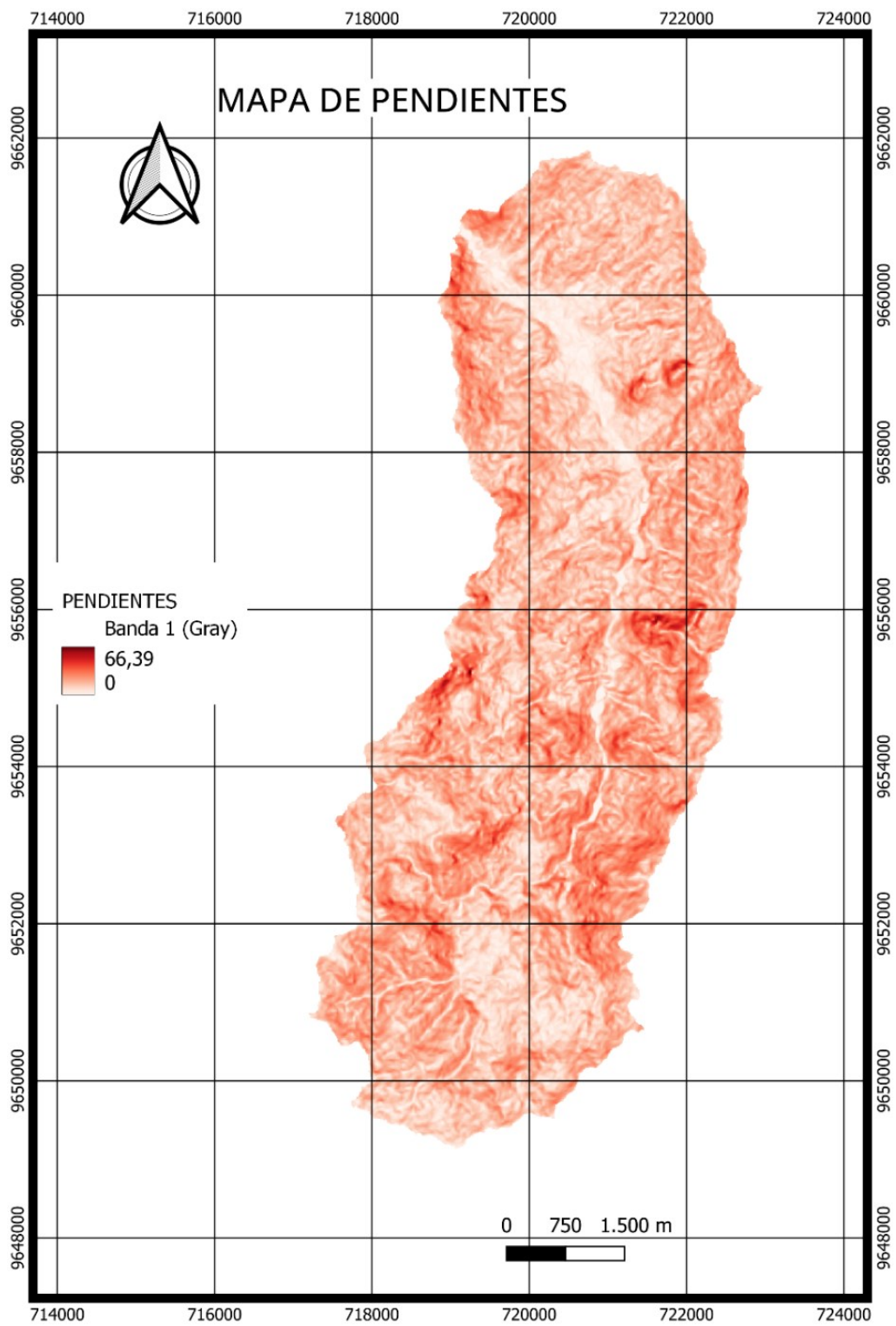
Figura 12 Mapa de elevaciones



Nota. El mapa de elevaciones permite visualizar con facilidad los rangos de altura de la Cuenca Hidrográfica del Río Cumbe. Fuente: Autores

Índice de pendientes

Figura 13 Mapa de índice de pendientes



Nota. El valor de pendiente más alto expresado en grados es de 66.39. Fuente: Autores.

En la figura 13 se puede observar el mapa de pendientes, con un rango de colores de blanco a rojo, siendo los colores blancos los que indiquen pendientes bajas, y los colores rojizos las más altas.

El índice de pendientes indica la inclinación del terreno en diferentes ubicaciones de la Cuenca. Las áreas con alta concentración de colores oscuros en el mapa indican pendientes pronunciadas, mientras que áreas más claras representan terreno más plano.

A continuación, se demuestra los valores de pendientes obtenidos para cada rango de altitud de la Cuenca:

Tabla 1 *Valores de pendientes de la cuenca en estudio*

Tabla de Valores	Rangos de Altura (msnm)	Valores de Pendiente (°)
Cuenca Baja	2672-2887	0 - 17,26
Cuenca Media	2887-3208	17,26 - 43,15
Cuenca Alta	3208-3497	43,15 - 66,39

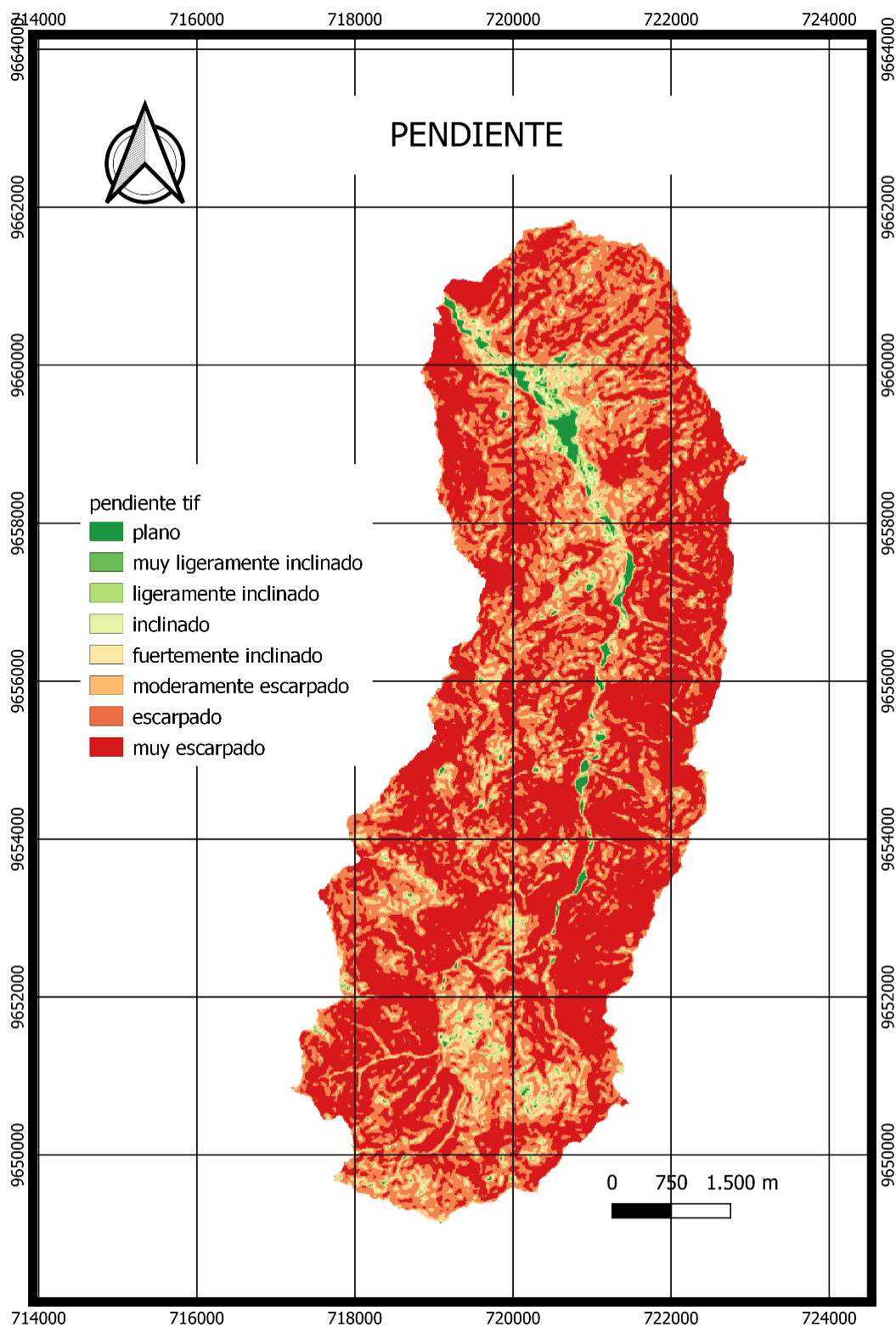
Nota. Los valores de pendiente se relacionan directamente con la altitud del terreno.

Fuente: Autores

En la tabla 1 se determina que en la “Cuenca Baja” los valores de pendiente predominantes son de 0° a 17,26°, en la “Cuenca Media” van desde 17,36° hasta 43,15° y en la “Cuenca Alta” de Cumbe, de 43,15° a 66,39°. Se concluye que la pendiente es directamente proporcional a la altitud.

A continuación, en la Figura 14 se indica el mapa de pendientes clasificado en 8 intervalos, lo que determina una representación más detallada de los índices de pendientes con el fin de obtener precisión en el mapa geomorfológico.

Figura 14 Mapa de pendientes clasificado en intervalos iguales



Nota. La diferencia de colores permite observar a detalle la variación de pendientes a lo largo de la Cuenca. Fuente: Autores.

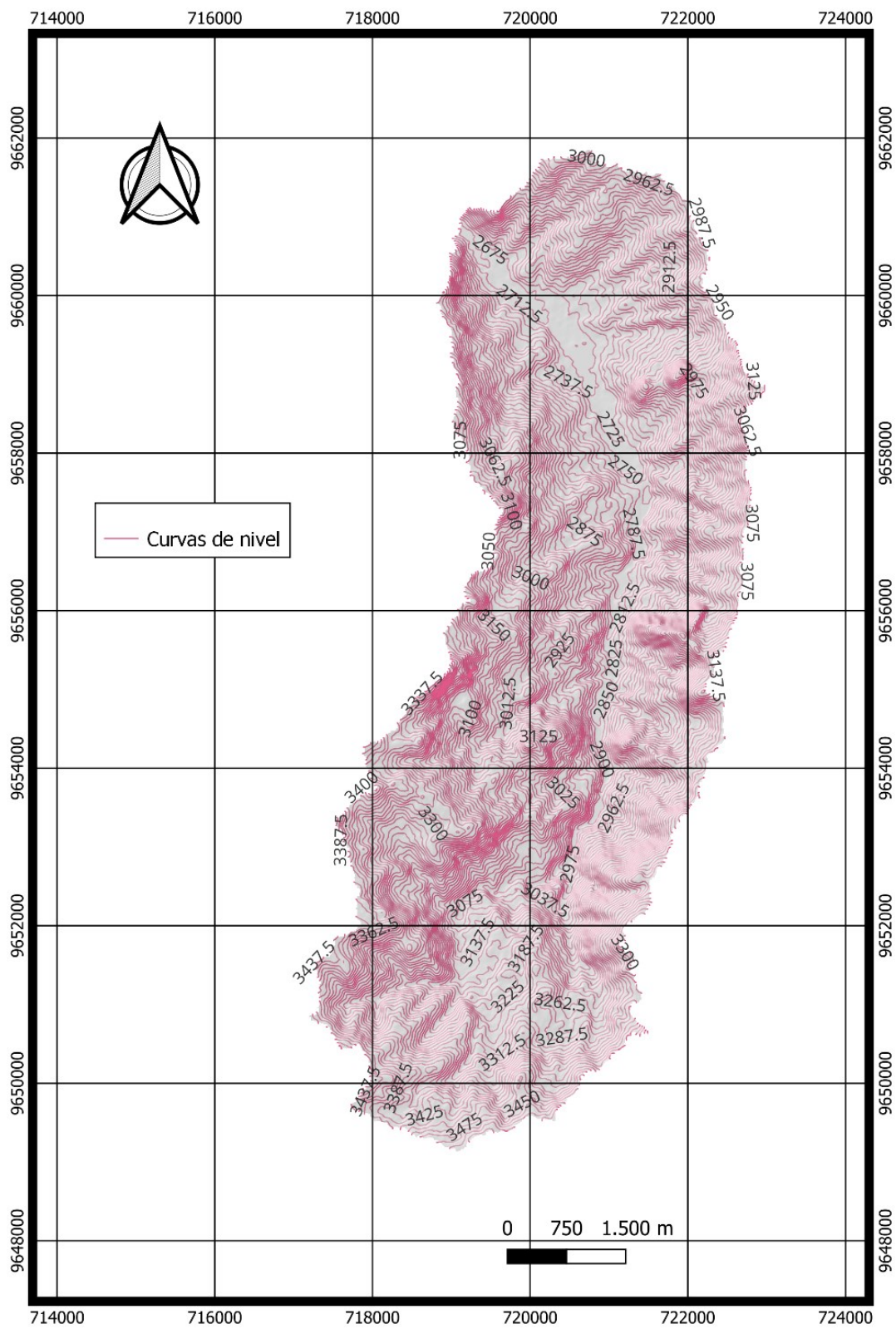
La Figura 14 muestra que a medida que la pendiente del terreno se incrementa, también aumenta la diferencia de elevaciones en el terreno, por lo que se puede identificar fácilmente zonas de Relieve Escarpado.

Curvas de nivel

Las curvas de nivel dan una representación tridimensional del terreno. Al observar estas líneas, se puede visualizar la forma del paisaje, identificando áreas altas, bajas y planas.

A continuación, el mapa de curvas de nivel:

Figura 15 Mapa de curvas de nivel



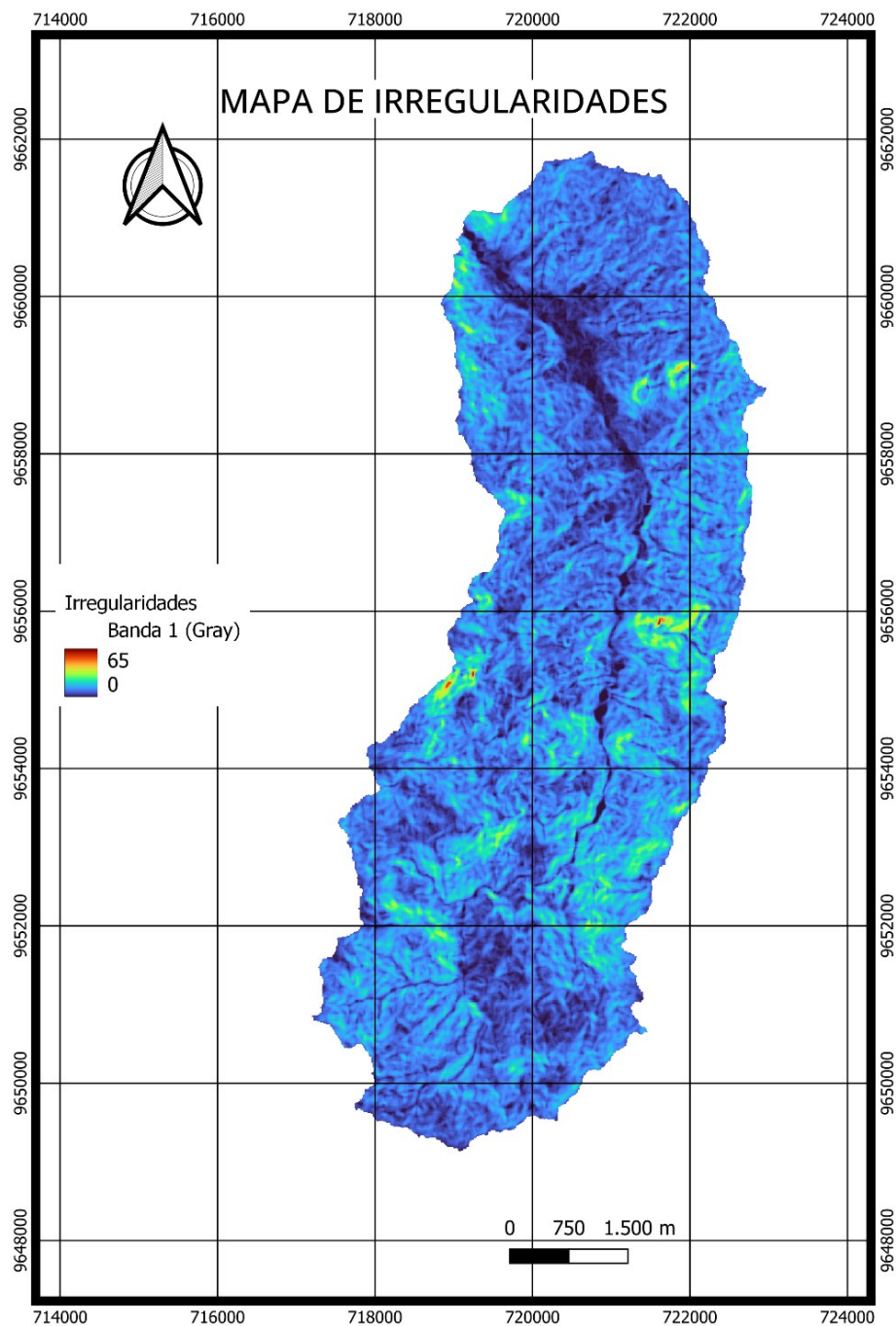
Nota. Las curvas de nivel se representan en líneas de color rojo. Fuente: Autores.

El mapa de curvas de nivel de la Figura 15, proporciona información detallada sobre la elevación y la topografía del terreno. Estas curvas conectan puntos con la misma elevación y se presentan en intervalos regulares. Lo que resulta importante para el detalle en la elaboración del mapa geomorfológico.

Cada curva de nivel indica un nivel constante de elevación. Entre el intervalo de estas curvas hay 12.5 metros, con lo que se puede estimar la altura relativa de las elevaciones y depresiones en el terreno. En los lugares donde se observa la proximidad de numerosas líneas de contorno indican mayor altura, permitiendo captar que se trata de montañas ya sea medianas o empinadas, lo que resulta según su altura; vertientes irregulares, relieve montañoso y relieve escarpado. En cambio, en las partes donde dos líneas están considerablemente separadas, representa una topografía más suave, indicando una menor inclinación del terreno, lo que da como resultado terrazas bajas.

Índice de irregularidades

Figura 16 Mapa de índice de irregularidades.



Nota. La rugosidad se presenta como el grado de irregularidad en la superficie.

Fuente: Autores.

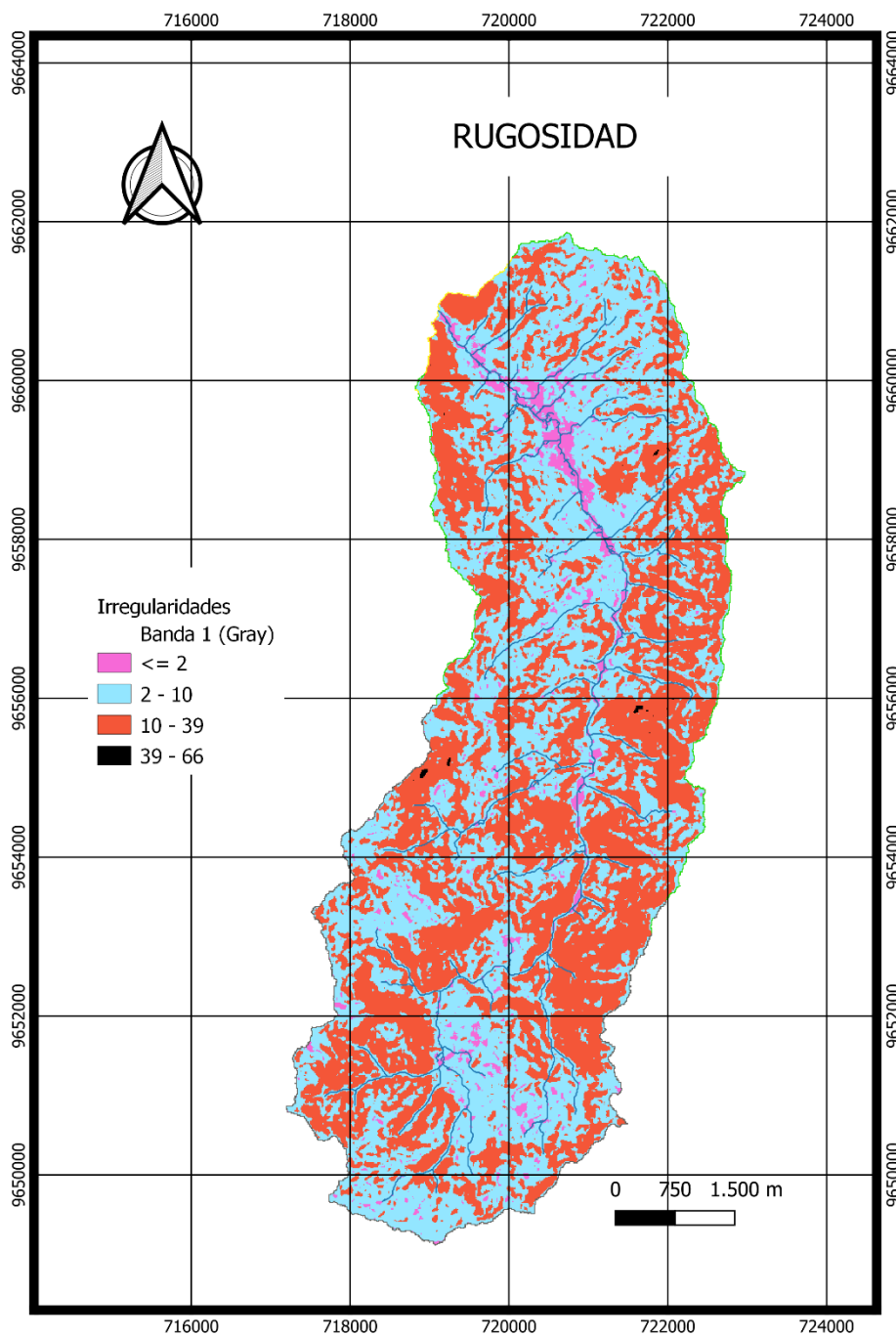
El mapa de índice de irregularidades de la Figura 16 proporciona información sobre la variabilidad o la falta de uniformidad en la superficie del terreno. El índice de irregularidades sirve para identificar y cuantificar patrones de terreno que pueden indicar cambios en la forma del paisaje, ayudando a identificar fácilmente montañas empinadas o de relieve escarpado.

El índice resalta de color amarillo a rojo, áreas donde el terreno tiene cambios abruptos o irregulares. Esto incluye áreas con crestas afiladas, valles profundos u otras características topográficas distintivas.

Un índice bajo, como el de color azul oscuro, indica áreas de terreno más homogéneo y suave, como lo es el caso de la zona urbana de Cumbe, en donde se pueden notar valores desde 0 a 15 aproximadamente, mientras que un índice alto sugiere terreno más variado y accidentado, como es el caso de las zonas de rojo, que nos dan valores cercanos al 65, lo que significa que la máxima diferencia de elevación que existe entre celdas de un píxel central y sus celdas circundantes es de 65 metros.

Para comprender mejor la distribución de la rugosidad en la Cuenca, se realizó el mapa de la figura 17, que demuestra las irregularidades del terreno clasificadas en rangos de intervalos iguales, de menor a mayor.

Figura 17 Mapa de rugosidad clasificado



Nota. El mapa de rugosidad clasificado por intervalos demuestra una mejor visión del nivel de irregularidad de terreno a lo largo de la Cuenca. Fuente: Autores.

Tabla 2 Zonas donde predomina cada nivel de rugosidad.

Rangos de Rugosidad	Nivel de Rugosidad	Zonas donde predomina
0 - 2	Bajo	Cuenca Baja
2 - 10	Medio	Toda la Cuenca
10 - 39	Medio Alto	Cuenca Media
39 - 66	Alto	Zonas de transición de Cuenca Media a Cuenca Alta

Nota. El nivel de irregularidad en el terreno es variable a lo largo de la Cuenca Hidrográfica del Río Cumbe. Fuente: Autores.

La Tabla 2 indica las zonas donde predomina la rugosidad clasificada por niveles. El nivel de rugosidad bajo predomina en la Cuenca Baja, con valores de 0 a 2 metros de máxima diferencia de elevación en su terreno, lo que quiere decir que no tiene muchas variaciones en su elevación.

El nivel “Medio” predomina en la Cuenca Media, con un rango de 2 a 10 metros de diferencia de elevación, lo que indica la presencia de Colinas Medianas y Vertientes Cóncavas.

El nivel “Medio Alto” de rugosidad se encuentra presente en la mayor parte de la Cuenca, este indica que hay diferencias de elevación de 10 a 39 metros.

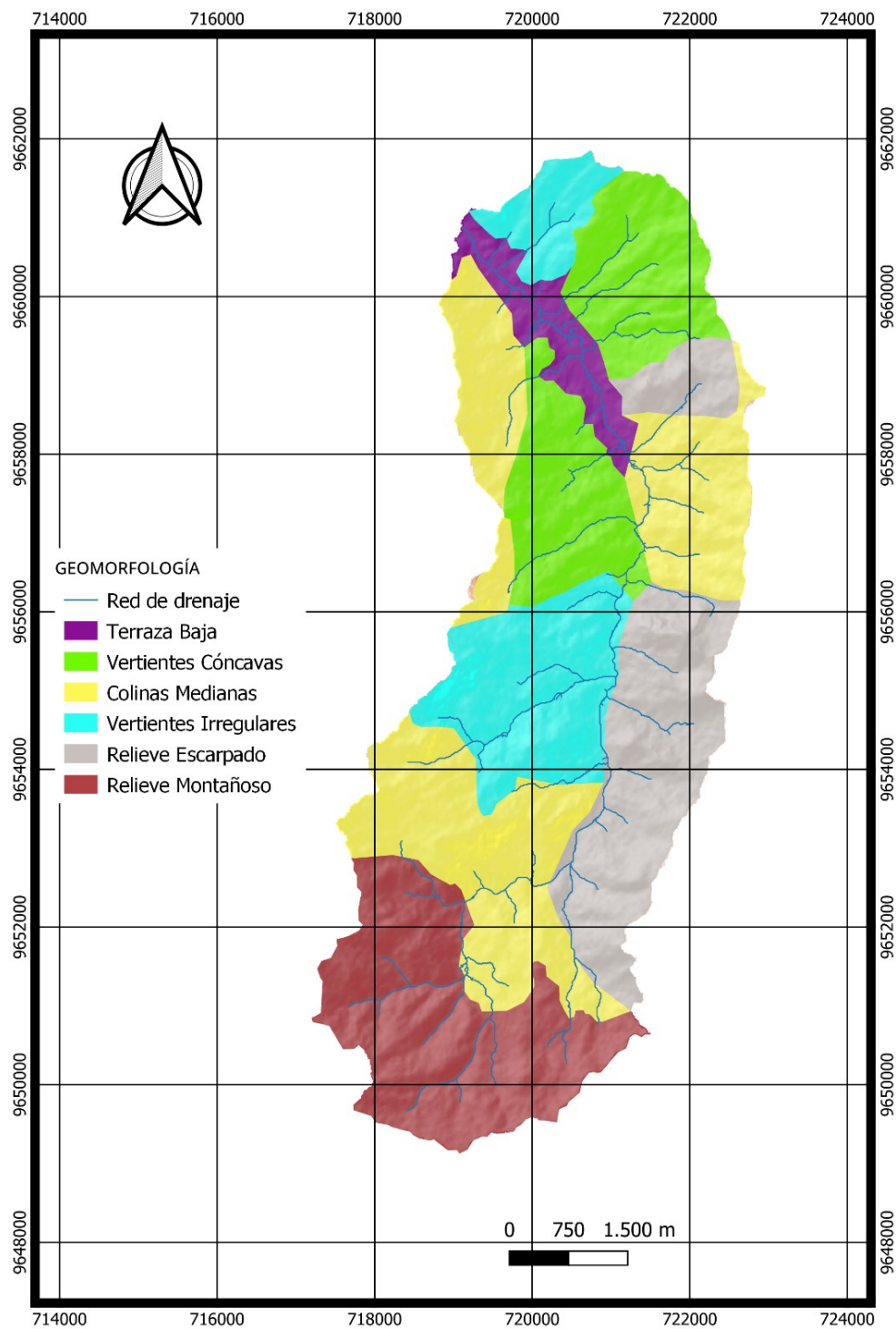
El nivel “Alto” está determinado por cambios bruscos de elevación, lo que se presenta entre la transición de la Cuenca Media a la Cuenca Alta. Con un rango de 39 a 66 metros de elevación, de las cuales se observan minuciosas partes negras en la Figura 16.

Elaboración del mapa geomorfológico actualizado

Para realizar el mapa geomorfológico de la cuenca del Río Cumbe, se utilizó los cálculos de los índices de terreno y el material de estudio de mapas previos. Para optimizar la calidad y la información proporcionada por el mapa, se trabajó con un modelo de elevación digital preciso: 12.5 x 12.5 metros.

A continuación, se indica el mapa geomorfológico actualizado mediante la comparación de índices de terreno calculados y obtención de patrones espaciales:

Figura 18 Mapa geomorfológico actualizado.



Nota. El mapa Geomorfológico de la Cuenca Hidrográfica del Río Cumbe se representa con varios tipos de terrenos anteriormente identificados mediante los índices de terreno. Fuente: Autores.

A continuación, se muestra la Tabla 3, en la que se indican patrones espaciales, valores de los índices de terreno con los que se concluyó en los diferentes elementos del mapa geomorfológico de la Figura 18.

Tabla 3 *Análisis de patrones espaciales.*

Geomorfología	Zonas de identificación	Rangos de Altura (msnm)	Valores de Pendiente (°)	Rugosidad (m)
Terraza Baja	Cuenca Baja	2672 - 2737	0 - 17.26	0 - 6
Vertientes Cónavas	Transiciones de Cuenca Baja a Cuenca Media	2737 - 3208	17.26 - 43.15	0 - 39
Colinas Medianas	Rugosidad Media	2737 - 3208	17.26 - 43.15	6 - 20
Vertientes Irregulares	Rugosidad Media a Alta	2737 - 3497	17.26 - 66.39	6 - 66
Relieve Escarpado	Pendiente Alta	2737 - 3497	43,15 - 66.39	39 - 66
Relieve Montañoso	Cuenca Alta	3222 - 3497	43.15 - 66.39	39 - 66

Nota. Las relaciones entre los principales índices de terreno logran constituir una visión detallada en la Cuenca Hidrográfica del Río Cumbe. Fuente: Autores.

Análisis de los elementos del mapa geomorfológico de la Figura 18:

Terraza Baja:

En el mapa geomorfológico de la Figura 18, las terrazas bajas tienen un mínimo índice de elevación, pendiente y rugosidad. Elemento que se representa en el mapa como áreas de terreno plano o ligeramente inclinado y están asociadas con zonas donde reside la población humana. Estas áreas sugieren estabilidad y son propicias para actividades urbanas. La terraza baja se formó con índices de altitud de menos de 2737 msnm.

Vertientes Cóncavas:

Las vertientes cóncavas se visualizan como laderas que presentan una curvatura hacia adentro, como un cuenco. Estas se identificaron en zonas donde se trasciende de la Cuenca Baja a la Cuenca Media, y representa una rugosidad de nivel medio, de hasta 39 metros de diferencia de elevación.

Colinas Medianas:

En el mapa, las colinas medianas se presentan como elevaciones de tamaño moderado que suavemente rompen la uniformidad del terreno. Con una altura intermedia, pendientes de hasta 43° e irregularidades de hasta 20 metros.

Vertientes Irregulares:

Las vertientes irregulares se identifican como áreas con cambios variables en la pendiente, lo que representa un nivel de rugosidad alto de hasta 66 metros de diferencia de elevación. Lo que indica una topografía diversa y compleja.

Relieve Escarpado:

El relieve escarpado se identifica en el mapa por áreas de pendientes pronunciadas de hasta 66° y cambios bruscos en la elevación de hasta 66 metros. Estas regiones representan barrancos, cañones u otras formas de terreno abrupto.

Relieve Montañoso:

Las áreas de relieve montañoso se destacan por elevaciones significativas de hasta 3497 metros, representan la mayor parte de la Cuenca Alta, lo que indica la presencia de cadenas montañosas o colinas de gran tamaño.

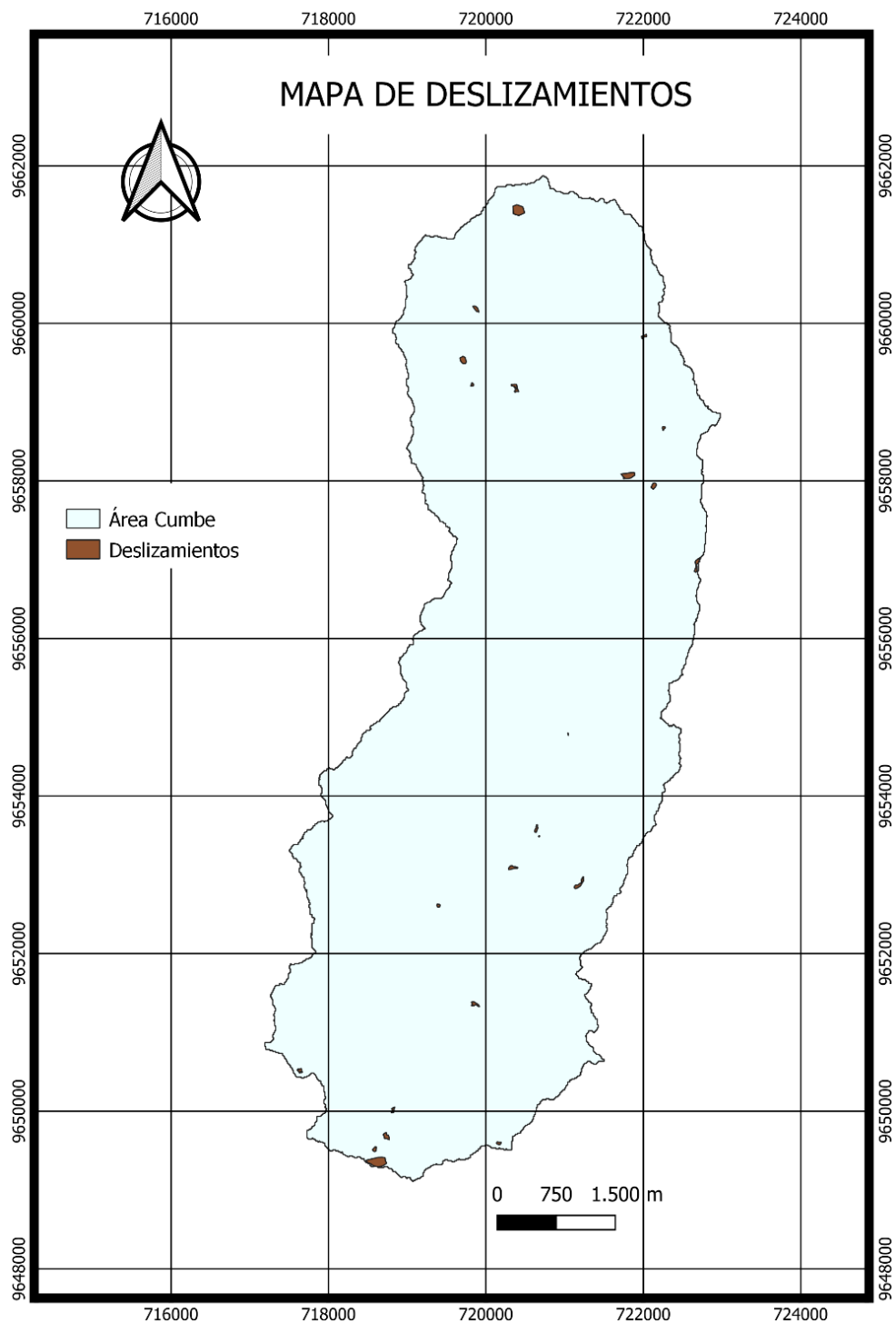
Cada uno de estos elementos geomorfológicos contribuye a la complejidad y la belleza del entorno de la Cuenca Hidrográfica del Río Cumbe, proporcionando una visión a detalle para la planificación del uso del suelo y la comprensión de los procesos naturales que han dado forma a la región. Se destacó la importancia de la directa proporcionalidad entre la altitud del terreno y su pendiente.

5.2 Resultados del paquete de trabajo 2

Esta metodología se centra en la clasificación de los deslizamientos superficiales en la Cuenca Hidrográfica del Río Cumbe, Cuenca-Ecuador, con el propósito de comprender su distribución, características geomorfológicas y evaluar su potencial de riesgo para el suelo de la zona.

Mapa de deslizamientos en Cumbe

Figura 19 Mapa de deslizamientos superficiales en la Cuenca del Río Cumbe.



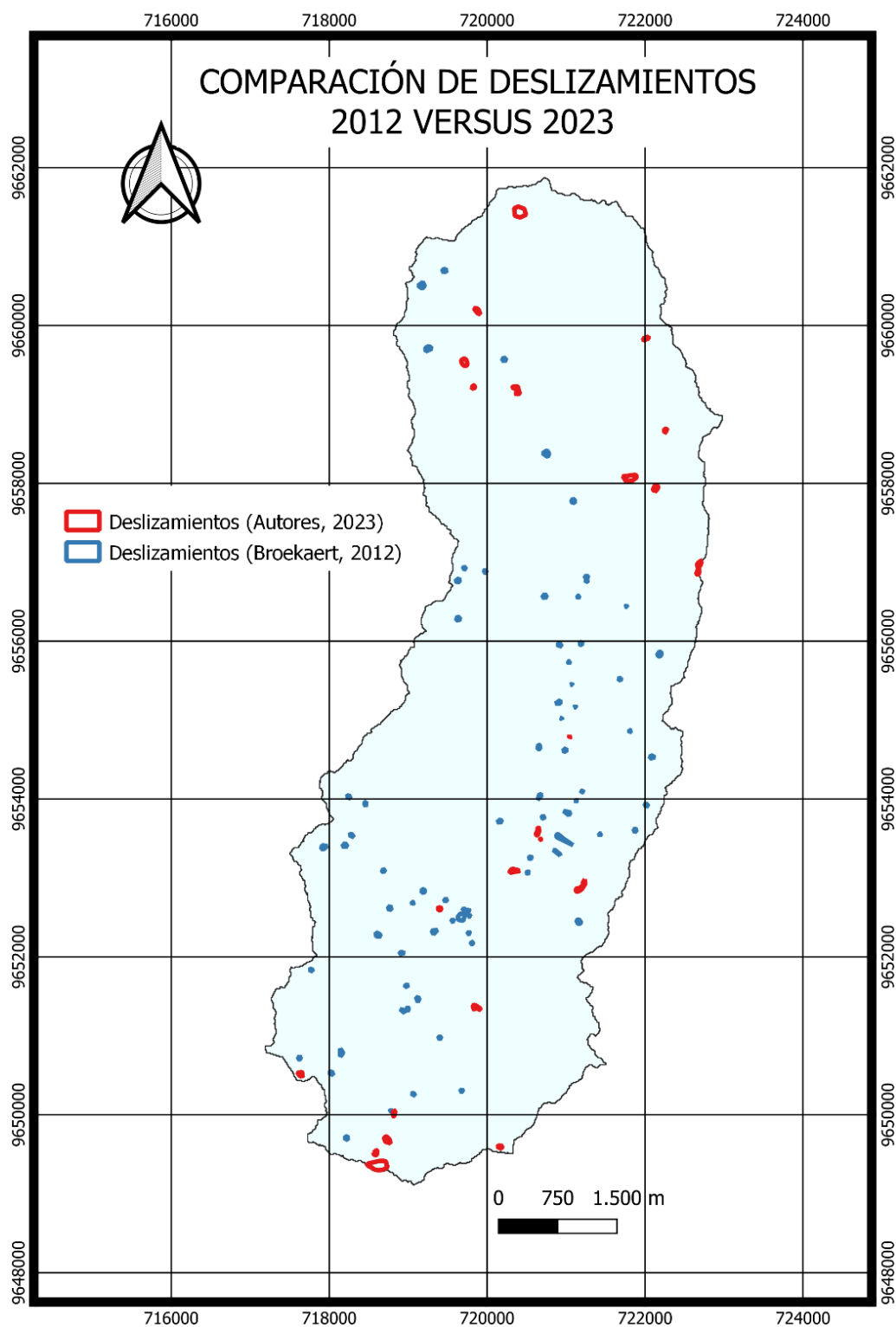
Nota. Se puede observar la delimitación de la cuenca en estudio junto a los deslizamientos mapeados con ayuda de QGIS (noviembre de 2023). Fuente: Autores.

La Figura 19 muestra polígonos de color café que pertenecen a las áreas donde se visualiza un deslizamiento superficial, estas cubren un total de 952 m². Lo que indica la baja incidencia de deslizamientos teniendo en cuenta que la Cuenca tiene aproximadamente 44km². Se concluye que los deslizamientos superficiales en 2023 constituyen un 0.002% del total de la superficie terrestre de la Cuenca del Río Cumbe.

Comparación con mapas previos

A continuación, se muestra la Cuenca del Río Cumbe junto con los deslizamientos superficiales identificados en 2 diferentes años.

Figura 20 Deslizamientos superficiales de 2012 y 2023.



Nota. Los deslizamientos superficiales de 2023 no se superponen a los de 2023.

Fuente: Sander Broekaert (2012) y Autores (2023).

La comparación de los mapas de deslizamientos superficiales entre 2012 y 2023 revela cambios significativos en la cobertura terrestre a lo largo de los últimos años. Los polígonos identificados por Sander Broekaert en 2012 parecen haber experimentado una transformación considerable en la última década, restaurando su cobertura vegetal.

A continuación, se demuestra un ejemplo:

Figura 21 *Polígonos de deslizamientos de 2012 sobrepuestos en el mapa satelital de 2023.*



Nota. El polígono de color azul (Broekaert, 2012) representó un deslizamiento en el año de su creación.

Uno de los hallazgos notables es la aparente recuperación de áreas afectadas por deslizamientos en 2012. En los mapas actuales de 2023, estos polígonos ahora están cubiertos por vegetación, lo que sugiere un proceso de regeneración natural o intervenciones de restauración ambiental.

Análisis de deslizamientos actuales

Para facilitar el entendimiento de la distribución de los deslizamientos, se utilizó una tabla de atributos, la cual presentó datos sobre las áreas afectadas. La Tabla 4 presenta datos acerca de las áreas de los deslizamientos, lo cual es importante para poder analizar qué tan graves y de qué tipo son. Además, se complementó con herramientas como Google Earth (Consultado en diciembre de 2023) que proporcionan información actualizada y visualización en 3D para una mejor apreciación del terreno y la gravedad de los deslizamientos.

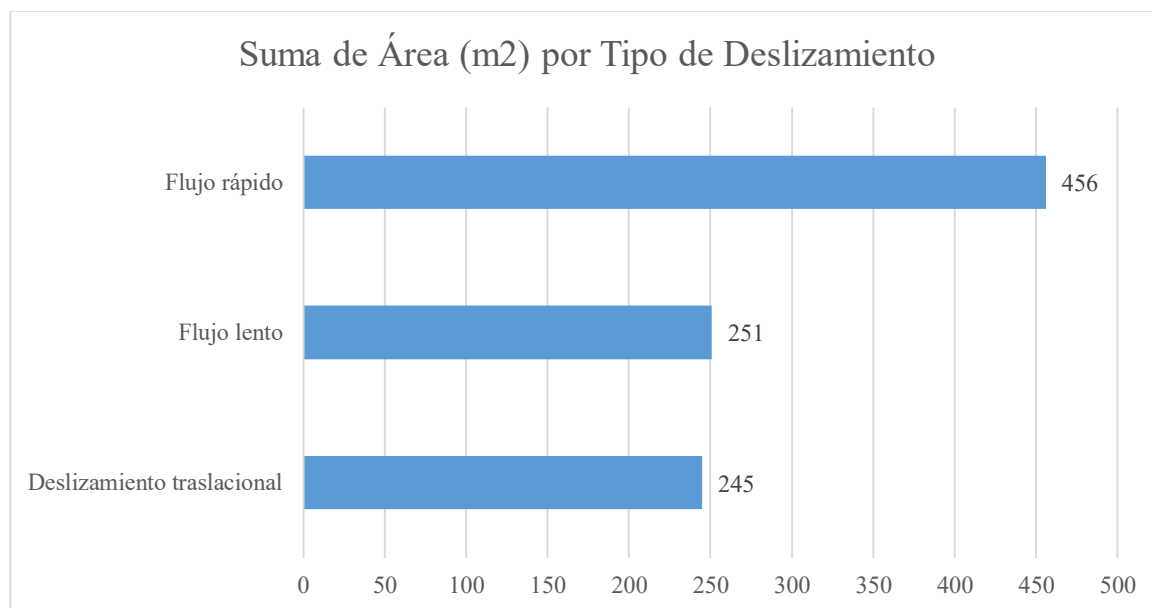
Tabla 4 *Inventario de deslizamientos*

ID	Área (m ²)	TIPO
1	214	Flujo rápido
2	20	Flujo lento
3	40	Deslizamiento traslacional
4	16	Flujo lento
5	15	Flujo lento
6	31	Flujo lento
7	21	Flujo lento
8	12	Flujo lento
9	32	Flujo lento
10	48	Deslizamiento traslacional
11	1	Flujo lento
12	21	Deslizamiento traslacional
13	2	Flujo lento
14	92	Flujo rápido
15	2	Flujo lento
16	45	Deslizamiento traslacional
17	32	Flujo lento
18	11	Flujo lento
19	38	Deslizamiento traslacional
20	53	Deslizamiento traslacional
21	10	Flujo lento
22	18	Flujo lento
23	28	Flujo lento
24	150	Flujo rápido
24	952	Total de Deslizamientos

Fuente: Autores.

El inventario de la Tabla 4 indica para cada deslizamiento; su tipo y área en metros cuadrados. Para realizar un mejor análisis se han simplificado los resultados en la siguiente Figura.

Figura 22 Distribución de áreas por Tipo de Deslizamiento.



Nota. Clasificación de deslizamientos y conteo de su área total. Fuente: Autores.

En la Figura 22, se observa la extensión territorial de cada tipo de deslizamiento. Se destaca la preeminencia del Flujo rápido, abarcando 456 m², lo que representa el 47.9% del área total. Seguido del deslizamiento de flujo lento, con una extensión de 251 m², equivalente al 26.4% del territorio. Por último, el deslizamiento traslacional, con una cobertura de 245 m², representa el 25.7% del área total.

Deslizamientos predominantes en Cumbe

La Cuenca Hidrográfica del Río Cumbe exhibe una variedad de deslizamientos que reflejan procesos geodinámicos significativos. Estos fenómenos son cruciales en la configuración del paisaje, y su análisis proporciona información valiosa para entender la susceptibilidad del terreno a movimientos en masa.

A continuación, se demuestra los tipos de deslizamientos con figuras de Google Earth (enero de 2024) predominantes en Cumbe:

Figura 23 *Deslizamiento de flujo rápido en Cumbe.*



Nota. Intervención de la mano del hombre influye altamente en los procesos de deslizamientos. Fuente: Tomado de Google Earth (enero de 2024).

El deslizamiento de flujo rápido se distingue por un movimiento veloz de materiales con una superficie aparentemente pulida. En Cumbe, representa el 47.9% del área de los deslizamientos totales. La presencia de lluvias intensas y una topografía pronunciada pudo haber contribuido a este fenómeno, que abarca un área extensa con un frente claramente definido.

Figura 24 *Deslizamiento traslacional en Cumbe.*



Fuente: *Tomado de Google Earth (enero de 2024).*

El deslizamiento traslacional de la Figura 24, exhibe un desplazamiento lateral de bloques de suelo. Las líneas de ruptura son evidentes, y la topografía de la ladera puede mostrar una inclinación uniforme o escalonada. En la Cuenca del Río Cumbe, representa el 25.7% del área total de los deslizamientos actuales. La presencia de estratos y condiciones geológicas específicas podría haber desencadenado este tipo de deslizamiento.

Figura 25 *Deslizamiento de flujo lento.*



Fuente: Tomado de Google Earth (enero de 2024).

El deslizamiento de flujo lento se caracteriza por un movimiento gradual, evidenciado por deformaciones en la ladera y la inclinación de la vegetación. Representó el 26.4% del total de deslizamientos de la Cuenca del Río Cumbe. La presencia de suelos arcillosos y procesos a largo plazo, como la actividad sísmica, podrían haber contribuido a este fenómeno, que puede dar lugar a la formación de terrazas en la ladera.

Estos análisis visuales son indicativos de procesos geodinámicos complejos y resaltan la importancia de comprender las causas subyacentes de los deslizamientos para una gestión efectiva del riesgo y la planificación del uso del suelo.

A continuación, se detallan posibles factores desencadenantes de los deslizamientos mencionados.

La Cuenca Hidrográfica del Río Cumbe se ve influenciada por posibles factores desencadenantes que contribuyen a la ocurrencia de deslizamientos. El cambio de uso de suelo, especialmente la conversión de áreas naturales en zonas urbanas o agrícolas, o simplemente la

apertura de vías, pueden alterar la estabilidad del terreno, aumentando la vulnerabilidad a movimientos en masa.

Además, la geología de la zona, con características propensas a este tipo de fenómenos, agrega un componente significativo.

La combinación de precipitaciones intensas, comunes en la región, actúa como un factor detonante, incrementando la saturación del suelo y generando condiciones propicias para deslizamientos. Estos elementos, en conjunto, subrayan la importancia de entender y gestionar estos factores para mitigar los riesgos asociados a movimientos en masa en la Cuenca del Río Cumbe.

Factores Desencadenantes por tipo de deslizamiento:

Deslizamiento de Flujo Rápido: Las lluvias intensas en combinación con la topografía empinada pueden haber desencadenado el deslizamiento de flujo rápido. La velocidad del desplazamiento y la superficie pulida son indicativos de un evento influenciado por eventos pluviales intensos.

Deslizamiento Traslacional: La presencia de líneas de ruptura y el desplazamiento lateral de bloques sugieren la influencia de la geometría de estratos y condiciones geológicas específicas. Factores como la estructura geológica pueden haber contribuido a la ocurrencia de este tipo de deslizamiento.

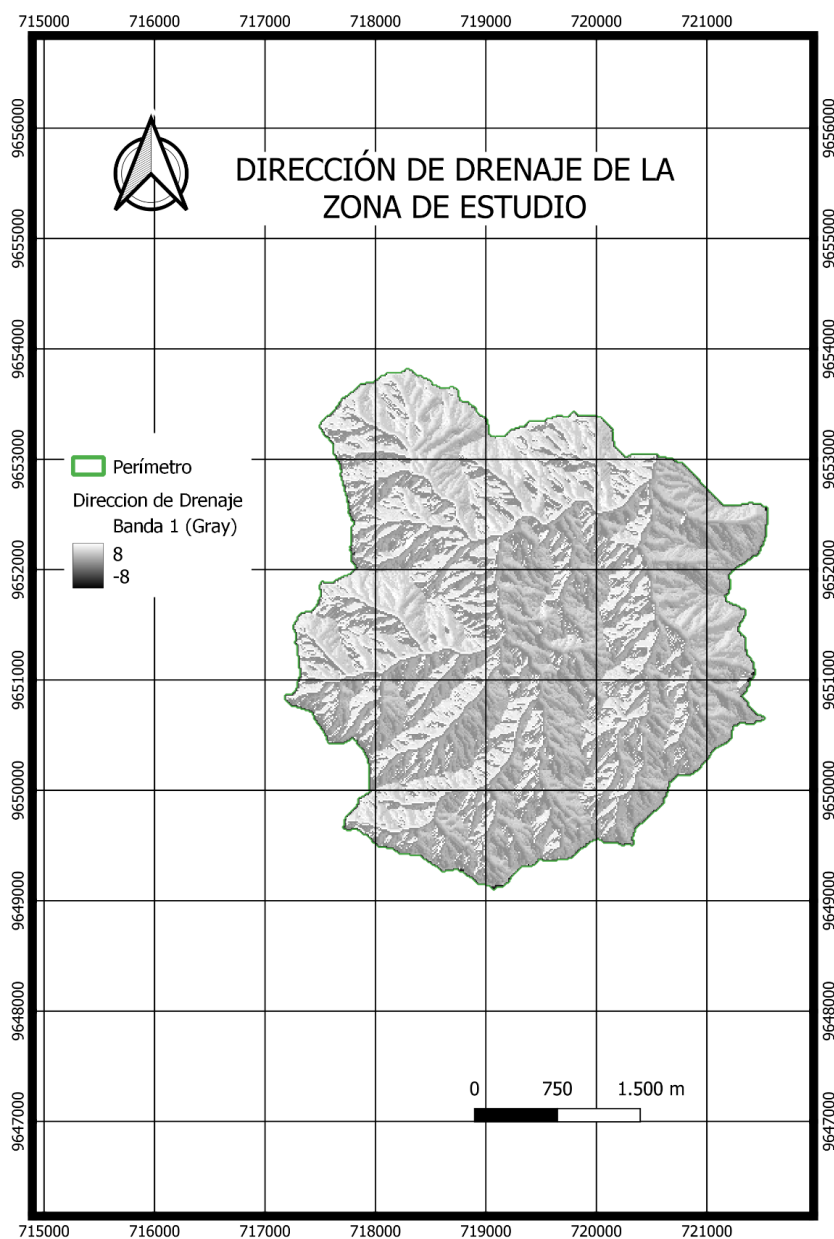
Deslizamiento de Flujo Lento: La presencia de suelos arcillosos y la actividad sísmica a largo plazo pueden haber contribuido al deslizamiento de flujo lento. Este tipo de deslizamiento se caracteriza por movimientos graduales y deformaciones en la ladera, lo que sugiere procesos a largo plazo.

5.3 Resultados del Paquete de Trabajo 3

Análisis de la Red de Drenaje:

Se utilizó herramientas de análisis de red de drenaje para identificar áreas donde la densidad de estas es alta y donde la convergencia de arroyos podría indicar áreas de iniciación de los cauces naturales.

Figura 26 *Dirección de drenaje de la zona de estudio.*



Nota. Dinámica del agua en la Cuenca Alta. Fuente: Autores.

La Figura 26 indica una representación visual de hacia dónde fluye el agua y las partes más claras representan una alta posibilidad de áreas de iniciación de ríos. Esta capa generada en QGIS da inicio a la búsqueda de puntos de iniciación de ríos.

Selección de Puntos de Iniciación:

Se identificó cuidadosamente puntos potenciales de iniciación de ríos en la cuenca alta del río Cumbe. Estos puntos pueden incluir áreas de elevación significativa, manantiales o zonas donde el agua subterránea emerge en la superficie. La herramienta `r.stream.extract` de QGIS fue empleada para este propósito, revelando la red de ríos y destacando posibles puntos de iniciación. En este proceso, realizamos pruebas con diferentes valores para la acumulación de flujo.

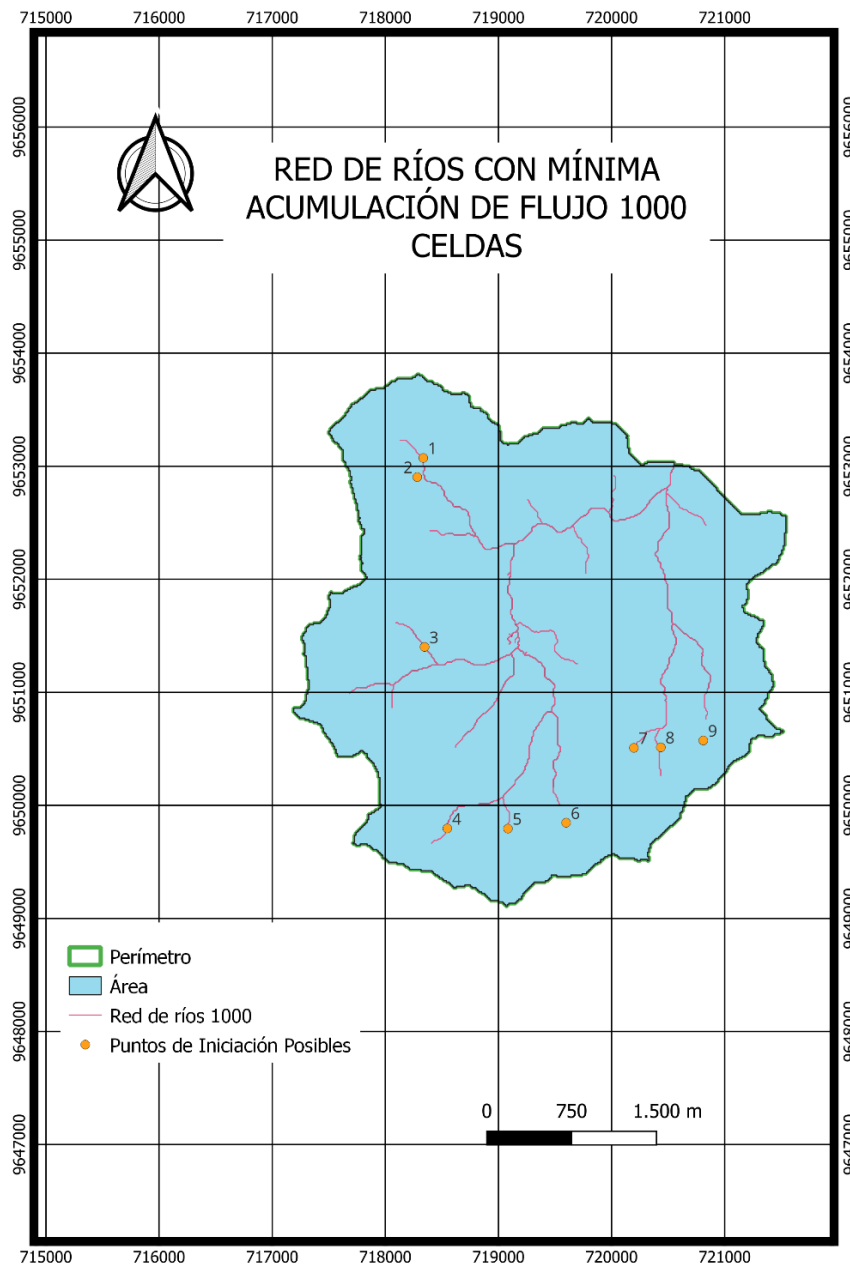
Cabe recalcar, que el parámetro de “acumulación de flujo mínima” en `r.stream.extract` se entiende como la cantidad mínima de flujo acumulado que debe alcanzar para iniciar una nueva secuencia o río. Dado que el Modelo Digital de Elevación (DEM) utilizado en este proyecto tiene una resolución de 12.5 x 12.5 metros, la unidad de esta medida es equivalente a una celda del DEM, es decir, $12.5 \text{ metros} \times 12.5 \text{ metros} = 156.25 \text{ m}^2$. Por lo tanto, si se trabaja con un valor de 200, se considera solo las secuencias de flujo que tengan una acumulación igual o superior a 200 veces la unidad de una celda, que es $200 \times 156.25 \text{ m}^2$ igual a 31250 m^2 .

Pruebas de Sensibilidad o posibles escenarios con `r.stream.extract`:

Configuración 1:

- Mínimo flujo acumulado para el río: 1000

Figura 27 Prueba de sensibilidad en la Cuenca Alta.



Fuente: Autores.

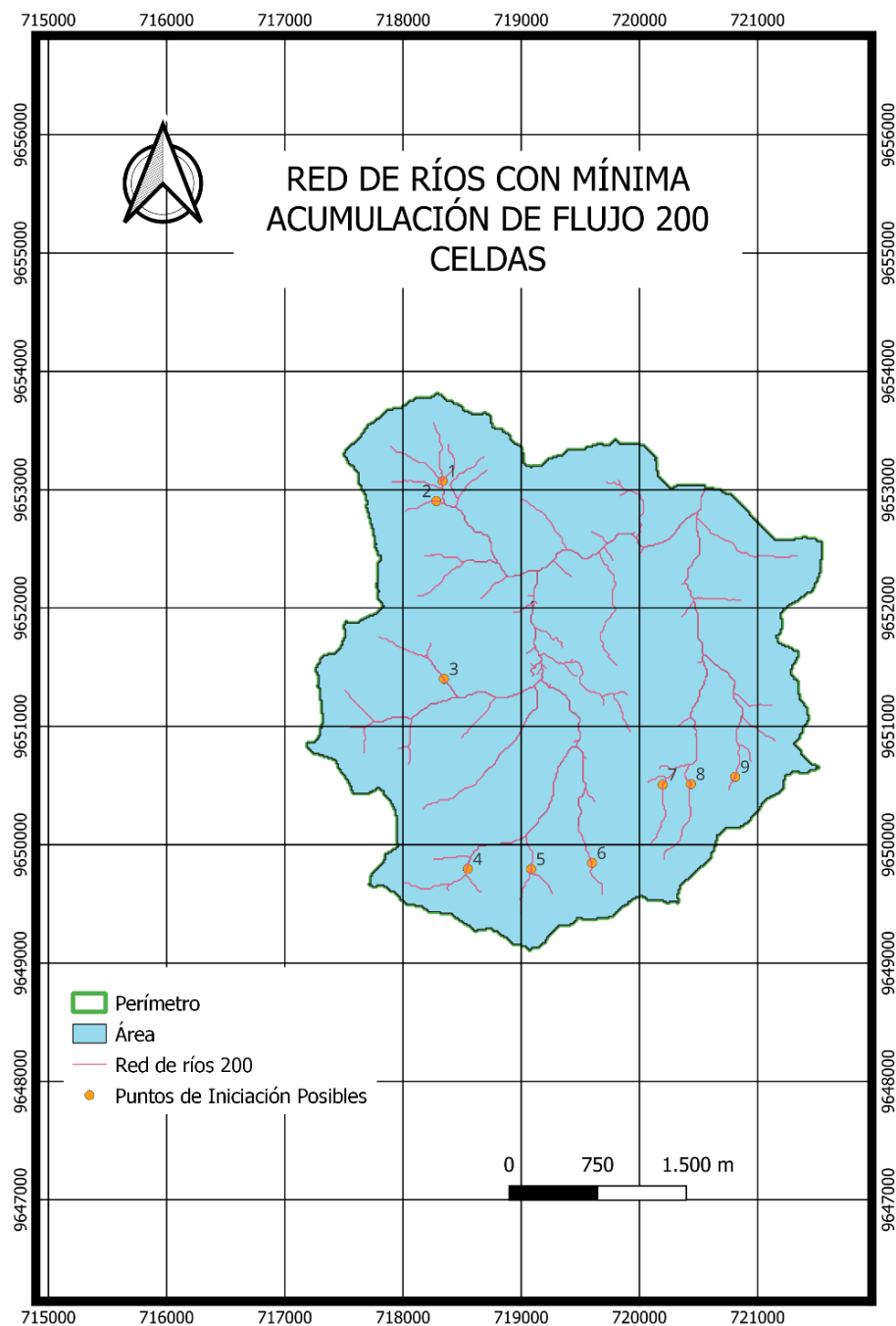
Resultado: Se generó una red de ríos con puntos de iniciación potenciales, destacando áreas de alta acumulación de flujo.

La Figura 27 indica la red de drenaje generada con un valor mínimo de acumulación de flujo de 1000. Esto quiere decir que solo se observa redes donde la concentración de agua es alta.

Configuración 2:

- Mínimo flujo acumulado para el río: 200

Figura 28 Segunda prueba de sensibilidad en la Cuenca Alta.



Fuente: Autores.

Resultado: La red de ríos generada con un mínimo de 200 celdas de acumulación de flujo exhibió una mayor extensión que la anterior

La Figura 28 indica la red de drenaje generada con un valor mínimo de acumulación de flujo de 200. Esto quiere decir que se observan redes incluso donde la concentración de agua es baja, por lo que guía con un alto índice de eficacia hacia los puntos de iniciación de ríos.

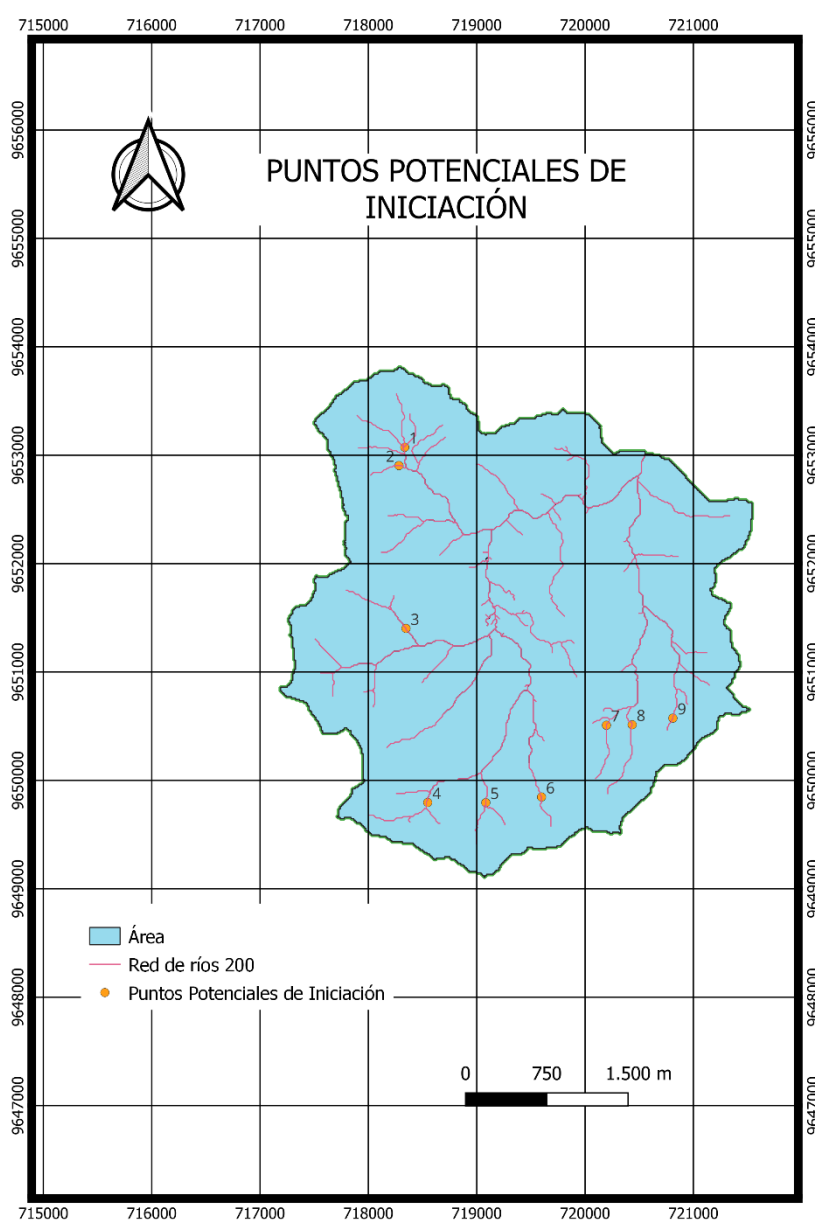
Análisis e Interpretación:

La variación en los resultados entre las dos configuraciones resalta la sensibilidad del modelo a los parámetros seleccionados. Un mayor valor de acumulación de flujo tiende a destacar áreas con un flujo significativo, mientras que un valor menor puede revelar puntos de inicio en áreas con menor acumulación de flujo. Este análisis sensible proporcionó información crucial para comprender la distribución espacial de los posibles puntos de inicio de ríos en la cuenca alta.

Verificación in situ

Con el propósito de validar los resultados, se realizó inspecciones directas en el terreno. La expedición consistió en dirigirse a los posibles puntos de iniciación de ríos identificados durante el análisis. Varios recorridos de campo fueron realizados, siguiendo las rutas hacia estos puntos para verificar la existencia y la precisión de la red de drenaje.

Figura 29 Puntos iniciales donde se hizo el recorrido.



Fuente: Autores.

(Ver Figura 29). En el Punto 1, al acercarnos, se confirmó que es accesible y se pudo visualizar la quebrada. Sin embargo, al avanzar unos metros, se observó que el flujo de agua se volvía subsuperficial, impidiendo seguir su trayectoria.

En el segundo punto del análisis, llegar y visualizar la quebrada resultó más fácil. Se logró explorar aguas arriba hasta encontrar la naciente del agua, que se halló a más de 200 metros del posible punto de iniciación. La característica del suelo es interesante; a unos 60 metros del punto potencial, el flujo superficial parece desvanecerse, pero al avanzar más, se observa cómo recupera su curso hasta encontrar su verdadera naciente. Esto destaca la diversidad y complejidad del comportamiento del agua en el terreno.

En el tercer punto, la forma del suelo revela la presencia de agua subsuperficial. Siguiendo la geomorfología del terreno, se llega al punto donde el agua emerge a la superficie, nutriendo de vida y humedad al pastizal. Esta fuente de agua no solo beneficia a la flora, sino que también sirve como líquido vital para las personas y animales de la zona.

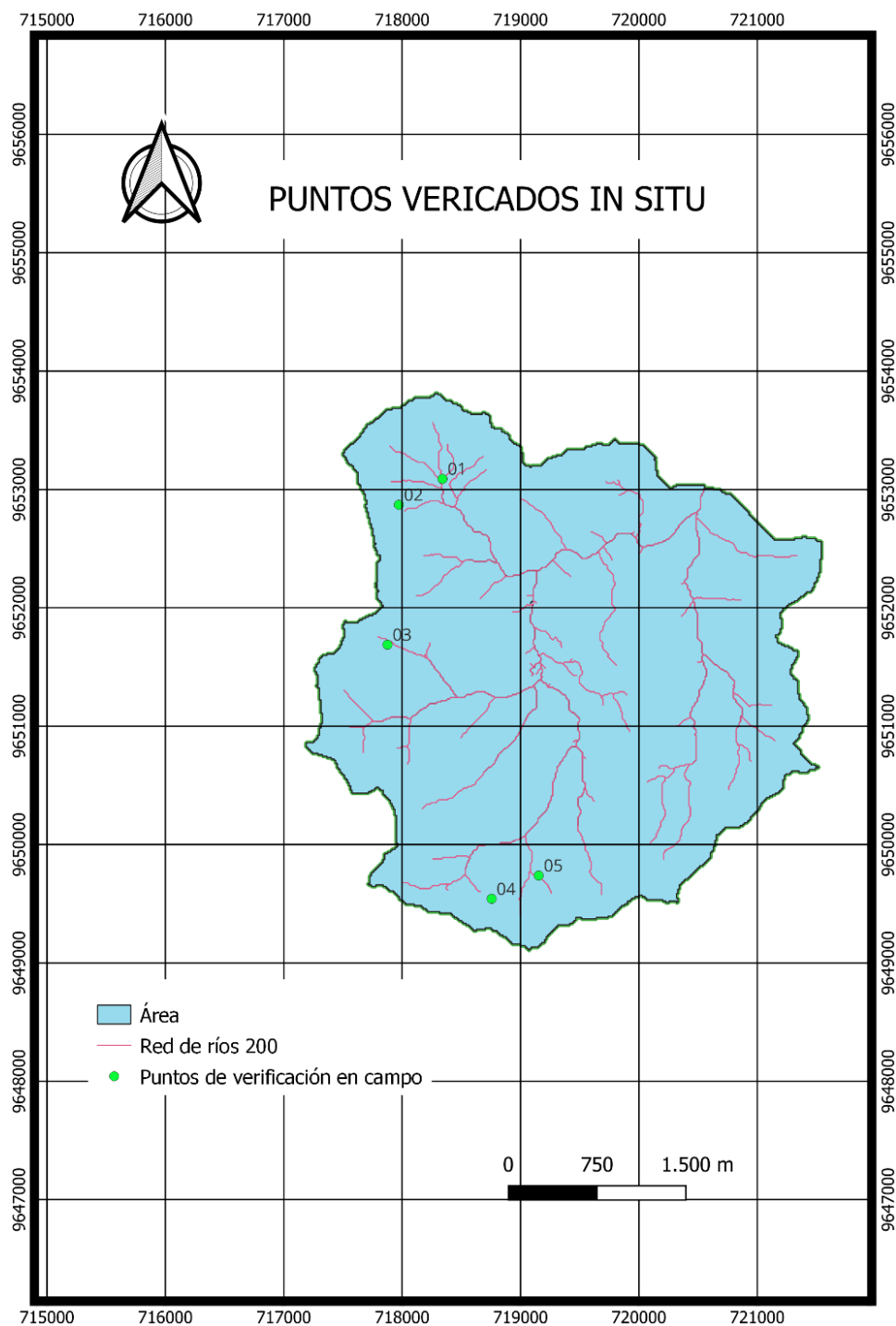
El punto 4 está cerca de una de las carreteras principales por lo que se distorsiona la sensibilidad de visualización debido a la actividad humana, aquí se encontraron fuentes que se pierden dentro del suelo, es decir siguen su trayectoria subsuperficial.

El punto 5 está cerca de una pequeña mina a cielo abierto la cual pudo haber influido en la trayectoria o visibilidad de la quebrada por lo que no se logró visualizar el ojo de agua, asumiendo que se encuentra por debajo de la superficie.

Este proceso de validación en campo resultó esencial para garantizar la fiabilidad de nuestras conclusiones y la coherencia entre los datos recopilados en el análisis remoto y las condiciones reales del terreno.

Generación de Mapas y Visualización: Utilizamos los resultados para generar mapas que muestren los puntos de iniciación de ríos, como indica la Figura 30.

Figura 30 Mapa con puntos corregidos en campo



Fuente: Autores.

Interpretación de resultados

La verificación en campo destacó la diversidad y complejidad de los procesos hidrológicos en el área de estudio. La presencia de flujos subsuperficiales y la influencia de actividades humanas subrayan la importancia de la validación in situ para comprender completamente la dinámica del agua en la cuenca. La generación de mapas basada en estos resultados proporcionó una representación más precisa de los puntos de iniciación de ríos en la cuenca del río Cumbe.

En definitiva, podemos concluir que, la red de drenaje generada con un valor de 200 de acumulación de flujo es válida, ya que nos arroja resultados muy aproximados a los encontrados en campo.

Estos hallazgos son cruciales para la gestión efectiva del recurso hídrico y la toma de decisiones en el ámbito territorial.

6. Conclusiones

Conclusiones del paquete de trabajo 1.

La actualización y mejora del mapa geomorfológico de la Cuenca Hidrográfica del Río Cumbe reveló de manera clara las distintas facetas de su topografía en diferentes niveles. En la Cuenca Baja, resaltan áreas de terreno plano con bajos índices de pendiente y rugosidad, sugiriendo condiciones propicias para actividades urbanas. La Cuenca Media presenta rangos de rugosidad considerables, acompañados de pendientes que alcanzan hasta 43°, añadiendo complejidad y diversidad al paisaje. Y, la Cuenca Alta, se distingue por elevaciones significativas, vinculadas a índices de pendiente y rugosidad elevados, formando cadenas montañosas complejas.

Esta investigación subraya la conexión directa entre el índice de pendiente y los niveles de altitud del terreno, demostrando que áreas con mayores altitudes tienden a tener pendientes más pronunciadas. Además, se observa que la rugosidad es un factor variable a lo largo de la cuenca, indicando la diversidad geomorfológica en diferentes secciones del territorio.

Conclusiones del paquete de trabajo 2.

Los deslizamientos superficiales descritos en esta investigación fueron; deslizamientos de flujo rápido con 456 m², de flujo lento con 251 m² y traslaciones con 245 m². Representando un total de 952 m² dentro de la Cuenca Hidrográfica del Río Cumbe. Se determinó que los posibles factores desencadenantes de este fenómeno son; la geología propensa a movimientos en masa, el cambio de uso de suelo y sobre todo las precipitaciones.

Al comparar esta información con los polígonos identificados por Sander Broekaert en 2012, se evidencia una transformación significativa en la última década, ya que el mapa satelital de 2023 demostró que existió una restauración de la cobertura vegetal.

Conclusión Paquete de trabajo 3

Mediante la generación de redes de drenaje virtual y el recorrido de campo se logró determinar varios puntos de iniciación de ríos en la Cuenca Hidrográfica del Río Cumbe. La verificación en campo arrojó resultados de alta proximidad a la red generada con un valor de acumulación de flujo de 200, por lo que se llegó a la conclusión de que un mayor valor de acumulación de flujo destaca áreas con flujo de agua significativo, mientras que un menor valor revela áreas muy próximas a los puntos de iniciación.

7. Recomendaciones

Recomendaciones del Paquete de trabajo 1

Se recomienda maximizar el análisis de la investigación mediante la inclusión de más aspectos, como el cambio de uso de suelo, erosión, características climáticas y otros factores relevantes que contribuyan a la obtención de más detalle en mapas geomorfológicos futuros

Involucrar a la comunidad local en la gestión y preservación de su entorno es esencial. Fomentar la participación comunitaria puede conducir a prácticas de uso del suelo más sostenibles y aumentar la conciencia sobre los riesgos asociados.

Recomendaciones del Paquete de trabajo 2:

Se recomienda realizar la caracterización geomorfológica de los deslizamientos superficiales en la Cuenca del Río Cumbe, para obtener con más detalle y precisión la razón de su desencadenamiento, incluyendo la evaluación del potencial de riesgo que estas tienen sobre en el territorio.

Considerar medidas de mitigación, como la estabilización de laderas, para reducir el riesgo de deslizamientos en áreas críticas.

Recomendaciones del Paquete de trabajo 3:

Se recomienda aumentar las investigaciones de campo para para validar y ampliar la identificación de áreas o puntos de iniciación de ríos y así poder tener una red de ríos más detallada y actualizada. También se puede combinar con levantamientos topográficos de quebradas y ríos.

8. Referencias bibliográficas

Acosta, J. A. (2015). *Programa de biología aplicada*.

Aristizábal, E., & Yokota, S. (2006). Geomorfología aplicada a la ocurrencia de deslizamientos en el Valle de Aburra.

Chinchilima, J. (2008). *Cumbe*. <https://juliaepesantez.files.wordpress.com/2013/05/cumbe-sugente-y-el-contexto-territorial.pdf>

Feng, C., Faes, M., Broggi, M., Dang, C., Yang, J., Zheng, Z., & Beer, M. (2023). Application of interval field method to the stability analysis of slopes in presence of uncertainties. *Computers and Geotechnics*, 153, 105060. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2022.105060>

Fischer, R., Tamayo Cordero, F., Ojeda Luna, T., Ferrer Velasco, R., DeDecker, M., Torres, B., Giessen, L., & Günter, S. (2021). Interplay of governance elements and their effects on deforestation in tropical landscapes: Quantitative insights from Ecuador. *World Development*, 148, 105665. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2021.105665>

Guerra, A. J. T., Fullen, M. A., Jorge, M. do C. O., Bezerra, J. F. R., & Shokr, M. S. (2017). Slope Processes, Mass Movement and Soil Erosion: A Review. *Pedosphere*, 27(1), 27-41. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(17\)60294-7](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(17)60294-7)

Broekaert, S. (2012). Land use dynamics and the spatial occurrence of shallow landslides in a tropical mountainous catchment, Ecuador. Katholieke Universiteit Leuven.

Lee, M., & Jones, D. (2014). *Landslide Risk Assessment* (1-Second edition).

López, S. (2022). Deforestation, forest degradation, and land use dynamics in the Northeastern Ecuadorian Amazon. *Applied Geography*, 145, 102749. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2022.102749>

Lucà, F., D'Ambrosio, D., Robustelli, G., Rongo, R., & Spataro, W. (2014). Integrating geomorphology, statistic and numerical simulations for landslide invasion hazard scenarios mapping: An example in the Sorrento Peninsula (Italy). *Computers & Geosciences*, 67, 163-172. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2014.01.006>

Ortega, E., Martín, B., Ezquerro, A., & Otero, I. (2015). *Sistemas de información geográfica*. Dextra Editorial S.L.

Rodríguez, E. (2021). *Estudia UANL riesgos por deslizamiento de tierra*. <https://vidauniversitaria.uanl.mx/expertos/estudia-uanl-riesgos-por-deslizamiento-de-tierra/>

- Iñiguez, V., Morales, O., Cisneros, F., Bauwens, W., & Wyseure, G. (2016). Analysis of the drought recovery of Andosols on southern Ecuadorian Andean páramos. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 20(6), 2421-2435. <https://doi.org/10.5194/hess-20-2421-2016>
- Vanacker, V., Vanderschaeghe, M., Govers, G., Willems, E., Poesen, J., Deckers, J., & De Bievre, B. (2003). Linking hydrological, infinite slope stability and land-use change models through GIS for assessing the impact of deforestation on slope stability in high Andean watersheds. *Geomorphology*, 52(3), 299-315. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(02\)00263-5](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00263-5)
- Cotler Avalos, H., Galindo Alcantar, A., Gonzalez Mora, I. D., Pineda Lopez, R. F., & Rios Patron, E. (2013). Cuencas hidrográficas. Fundamentos y perspectivas para su manejo y gestión.
- Chen, M., Huang, D., & Jiang, Q. (2021). Slope movement classification and new insights into failure prediction based on landslide deformation evolution. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 141, 104733. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2021.104733>
- Vascones, M., Mancheno, A., Alvarez, C., Prehn, C., Cevallos, C., & Ortiz, L. (2019). Cuencas hidrográficas.

Alonso, D. (2021, 29 septiembre). Qué es y qué podemos hacer con GRASS GIS. MappingGIS.

<https://mappinggis.com/2016/05/puedo-grass-gis-7/>