
Priorización de microcuencas

en los Andes ecuatorianos
usando parámetros morfométricos,
WSA y GIS

Prioritization of micro-watersheds
in the Ecuadorian Andes using
morphometric parameters, WSA and GIS

Diego A. Damián Carrión

Universidad Nacional del Chimborazo,
Instituto de Ciencia, Tecnología, Investigación
y Saberes, Riobamba, Ecuador

Carmen O. Márquez

Universidad Nacional del Chimborazo,
Facultad de Ingeniería, Riobamba, Ecuador /
Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias
Forestales y Ambientales, Mérida, Venezuela
cmarquez@unasch.edu.ec; omarquez@ula.ve

Víctor J. García

Universidad Nacional del Chimborazo,
Facultad de Ingeniería, Riobamba, Ecuador /
Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias,
Mérida, Venezuela
vgarcia@unasch.edu.ec; vgarcia@ula.ve

Celso G. Recalde Moreno

Universidad Nacional del Chimborazo,
Facultad de Ingeniería, Riobamba, Ecuador
crecalde@unasch.edu.ec

Marcos V. Rodríguez Llerena

Universidad Nacional del Chimborazo,
Instituto de Ciencia, Tecnología, Investigación
y Saberes, Riobamba, Ecuador

Johana E. Ayala

Universidad Nacional del Chimborazo,
Instituto de Ciencia, Tecnología, Investigación
y Saberes, Riobamba, Ecuador

Resumen

El propósito es desarrollar un esquema de priorización y análisis de la fragilidad a factores geomorfológicos que viabilizan la erosión en cuatro microcuencas (MC), en una región montañosa y escarpada de la cordillera de los Andes ecuatorianos. Se cuantificaron los aspectos lineales de área y de relieve de cada una de las áreas de afectación de la red hidrográfica de las MC. Se encontró un modelo que permitió estimar los valores del Índice de Prioridad que demanda cada MC. Los resultados muestran que la microcuenca Pulpito (MCP) y la microcuenca Jubal (MCJ) son altamente susceptibles a erosión. Los factores de riesgo en la MCP, la MCJ y en la microcuenca Zula (MCZ) están más relacionados con procesos geomórficos fluviales. Mientras que en la microcuenca de Ozogoche (MCO), los factores de riesgo se encuentran relacionados con procesos geomórficos asociados a movimientos de masas.

Palabras clave: caracterización morfométrica; Índice de Prioridad; geosistemas montañosos; cordillera de los Andes; riesgos geomórficos.

Abstract

The purpose of this article is to develop a prioritization and sensitivity analysis of geomorphologic factors that contribute to erosion. We study four micro-watersheds (MW) in a rugged and mountainous region of the cordillera of the Ecuadorian Andes. The linear, areal and relief aspects in each of the MW hydrographic network areas were quantified. A model that estimates priority indices for each MW was found. The results show that Pulpito micro-watershed (PMW) and Jubal micro-watershed (JMW) are highly susceptible to erosion. The risk factors in PMW, JMW and Zula micro-watershed (ZMW) are more related to fluvial geomorphic processes. While in Ozogoche micro-watershed (OMW) the risk factors are more related to geomorphic processes associated with mass movements.

Key words: morphometric characterization; priority index; mountain geosystems; Andes mountain range; geomorphic hazards.

1. Introducción

Las cuencas hidrográficas (CH) son unidades de territorio que contienen un conjunto común de cauces y ríos que drenan, por lo general, a un gran cuerpo de agua (Black, 2005). Las CH en los geosistemas montañosos con frecuencia proveen recursos y servicios relevantes que incluyen el suministro de agua limpia y de agua para centrales hidroeléctricas, entre otros. Sin embargo, los geosistemas montañosos son más vulnerables que otros geosistemas a un mayor espectro de perturbaciones y su recuperación después de una alteración es, con frecuencia, muy lenta. No obstante, las funciones claves de las regiones montañosas en el funcionamiento de las CH son frecuentemente desestimadas (Korner & Ohsawa, 2005). En general, el suministro de los recursos y servicios que proveen las CH en los geosistemas montañosos depende de la estabilidad de pendientes y del control de la erosión y escorrentía que proveen una cobertura vegetal saludable. Así, por ejemplo, la erosión es un factor de gran relevancia en el manejo sostenible de la CH, pues acelera la tasa de degradación del suelo e influencia la escorrentía y puede conducir a inundaciones en las partes bajas de una cuenca.

La identificación de áreas preferenciales para la realización de trabajos de monitoreo, conservación y el establecimiento de medidas de control que se encuentren orientadas al mantenimiento de una dinámica sustentable de la CH en geosistemas montañosos en los Andes ecuatorianos no es una tarea fácil. En general, estas cuencas se encuentran en áreas de difícil acceso, poseen una topografía de grandes desniveles, con climas extremos y se dispone de muy poca información sobre ellas. La tarea

se complica si se considera que, con frecuencia, hay que distribuir recursos escasos entre varias opciones de acción, lo que hace que las instituciones encargadas del manejo no puedan actuar con igual intensidad y eficiencia en todas las áreas. En este contexto, resulta de gran relevancia el uso de métodos que asistan en la toma de decisiones, que sean capaces de asignar pesos numéricos a opciones donde el juicio subjetivo de cantidades y cualidades constituye una parte importante del proceso de decisión.

Una revisión de trabajos más recientes muestra que algunos autores usan los parámetros morfométricos (PM) para extraer solo conclusiones del funcionamiento de CH en un contexto con un alcance intrínsecamente limitado. Por ejemplo, Lama *et al.* (2015) realizaron un análisis de los PM de una cuenca montañosa al noreste de la India usando GIS. Los autores concluyen que los valores altos de frecuencia de cauces, acompañados con valores altos de la densidad de la red de drenaje, indican que la cuenca tiene un potencial alto para la escorrentía, a pesar de exhibir un hidrograma de descarga con valores máximos bajos, lo que configura un escenario de interés para el desarrollo del recurso agua superficial.

El alcance del análisis con los PM se puede ampliar significativamente si varios de los parámetros se integran en un solo indicador o índice que sea reflejo de la dinámica de la CH, y que facilite la visualización cuantitativa de cualidades específicas de los sistemas hidrológicos. En este sentido, uno de los métodos más usados implica promediar valores de prioridad asignados a cada PM, en concordancia con criterios de valoración de expertos que responden al objetivo del estudio. Usualmente, este único

indicador se incorpora a un sistema que orienta el análisis y/o la toma de decisiones en un escenario con múltiples dimensiones de diferente naturaleza.

Así, por ejemplo, Mishra & Rawat (2015) desarrollaron un esquema de priorización para evaluar 21 MC basado en factores responsables de erosión en el suelo. La priorización se realiza con base en índices de suelo, vegetación, topografía y PM. Todos estos parámetros se integraron y evaluaron para identificar áreas vulnerables a erosión en el suelo.

Malik & Bhat (2014) integraron información de sensores remotos, factores socioeconómicos y observaciones de campo en un ambiente GIS para identificar cuencas que exhiben un impacto antropogénico severo, así como para identificar los principales factores que contribuyen a la degradación. Los autores concluyen que la priorización de cuencas hidrográficas se ha convertido en un proceso inevitable en la planificación y manejo efectivo de recursos naturales.

El método de promediar valores de prioridad tiene la desventaja que homogeniza las cualidades y características físicas de la CH en un valor promedio, desestimándose la información que puede aportar el patrón de valores de los parámetros morfométricos (PM). Un método alternativo, que procura capturar las bondades del patrón de valores de los PM, involucra un análisis de correlación estadística entre los diferentes PM y encontrar un modelo estadístico que permita estimar los valores del Índice de Prioridad que demanda cada CH (Aher *et al.*, 2014). Al igual que en el caso del método de promediar valores de prioridad, este único indicador se puede incorporar a un sistema que oriente el análisis y/o toma de decisiones en

un escenario con múltiples dimensiones de diferente naturaleza.

La priorización de CH ha ganado importancia en el manejo de recursos naturales, especialmente en el contexto del manejo de cuencas y sub-cuencas. Así, el manejo integral de las cuencas ha emergido a nivel mundial como el modelo preferido para la planificación del manejo. En este escenario, la cuenca hidrográfica es considerada una unidad geográfica básica para la planificación mientras que se integran factores económicos, sociales, ecológicos y políticas de gobernanza con métodos de análisis más complejos para desarrollar el mejor plan.

En este contexto se pueden citar los siguientes trabajos: Patel & Srivastava (2015) analizaron 13 MC usando los PM y un sistema de soporte de decisiones basado en la evaluación de múltiples criterios (EMC). El propósito de los autores fue identificar sitios adecuados para ubicar estructuras de captación de agua, utilizando un modelo digital de elevación en un ambiente GIS para realizar una descripción cuantitativa de la geometría de las MC. Después del análisis proponen posibles sitios para ubicar estructuras de captación de agua en la MC que exhiben mayor posibilidad de degradación.

Rahaman *et al.* (2015) realizaron una priorización de sub-cuencas apoyada en PM y en un sistema de toma de decisiones basado en la EMC, fundamentado en un APJ y en lógica difusa (*Fuzzy*). Los autores concluyen que el APJ fundamentado en lógica difusa es un método práctico para la identificación de áreas que demandan alta prioridad y, que es útil para implantar mejores prácticas de manejo, así como la constitución de planes de manejo del recurso agua y/o suelo,

conservación y desarrollo de agricultura sostenible.

Aher *et al.* (2013) realizaron una priorización de sub-cuencas fundamentada en PM y en un sistema de toma de decisiones basado en la EMC, a través de un APJ y lógica difusa. Los autores concluyen que la metodología desplegada es una técnica viable para la toma de mejores decisiones en la identificación de unidades de monitoreo y evaluación.

Sin embargo, la gran mayoría de los métodos modernos de análisis y manejo de riesgos parten del estudio de susceptibilidad y vulnerabilidad a agentes que viabilizan el riesgo (UN-ISDR, 2004; Van Westen, 2013). Esta tarea demanda una gran cantidad de información, y la colección de esta información requiere de herramientas tecnológicas avanzadas, grandes cantidades de recursos; es una tarea de mucha labor que consume gran cantidad de tiempo.

El objetivo de este trabajo es evaluar de manera efectiva y eficiente la vulnerabilidad a la erosión de cuatro micro cuencas (MC) en una región montañosa y escarpada de la cordillera de los Andes ecuatorianos. El propósito es desarrollar un esquema de priorización y análisis que sea coherente con la fragilidad que exhibe cada una de las MC a factores geomorfológicos que viabilizan la erosión.

Para alcanzar nuestro objetivo se procedió a realizar la caracterización morfométrica de las cuatro MC. Para esto, se cuantificaron los aspectos lineales de área y de relieve de cada una de las áreas de afectación de la red hidrográfica de las MC. Los PM se agruparon, según su relación (directa o inversa), con factores que viabilizan la erosión. Luego se procedió a una primera asignación de

valores de prioridad. Se realizó un análisis de correlación estadística entre los diferentes PM. Se encontró un modelo que permitió estimar los valores del Índice de Prioridad que demanda cada MC.

2. Materiales y métodos

2.1. Área de estudio

El área de estudio está localizada en una zona de relieve muy irregular, tipo montañoso y escarpado en los Andes ecuatorianos, ubicada en la parroquia Achupallas, en el suroeste del Parque Nacional Sangay, provincia de Chimborazo, Ecuador. Está situada a 300 km al sur de la ciudad de Quito, abarca una superficie de 1.016 km² que se encuentran en el rectángulo definido por las coordenadas UTM (X= 743089.8; Y= 9760133.5) y (X=782504.2; Y= 9715844.1). En el área se encuentra la red fluvial de cuatro MC identificadas como microcuenca Ozogoché (MCO), microcuenca Zula (MCZ), microcuenca Jubal (MCJ) y microcuenca Pulpito (MCP), (**Figura 1**).

La MCO surte el cauce principal del río Pastaza que desemboca en los afluentes del río Amazonas. La MCZ surte al cauce principal del río Guayas que desemboca en el océano Pacífico, mientras que las MCJ y MCP surten el cauce principal de la cuenca Santiago, que desemboca en los afluentes del río Amazonas. Los drenajes sobre la cota 3.600 son de tipo rectangular, mayormente amplios, con poca incisión y en forma de U, mientras que por debajo de esta cota son de tipo dendrítico, mayormente estrechos, con profunda incisión y en forma de V (Gobierno Autónomo Descentralizado Parroquia Rural de Achapalla, 2015).

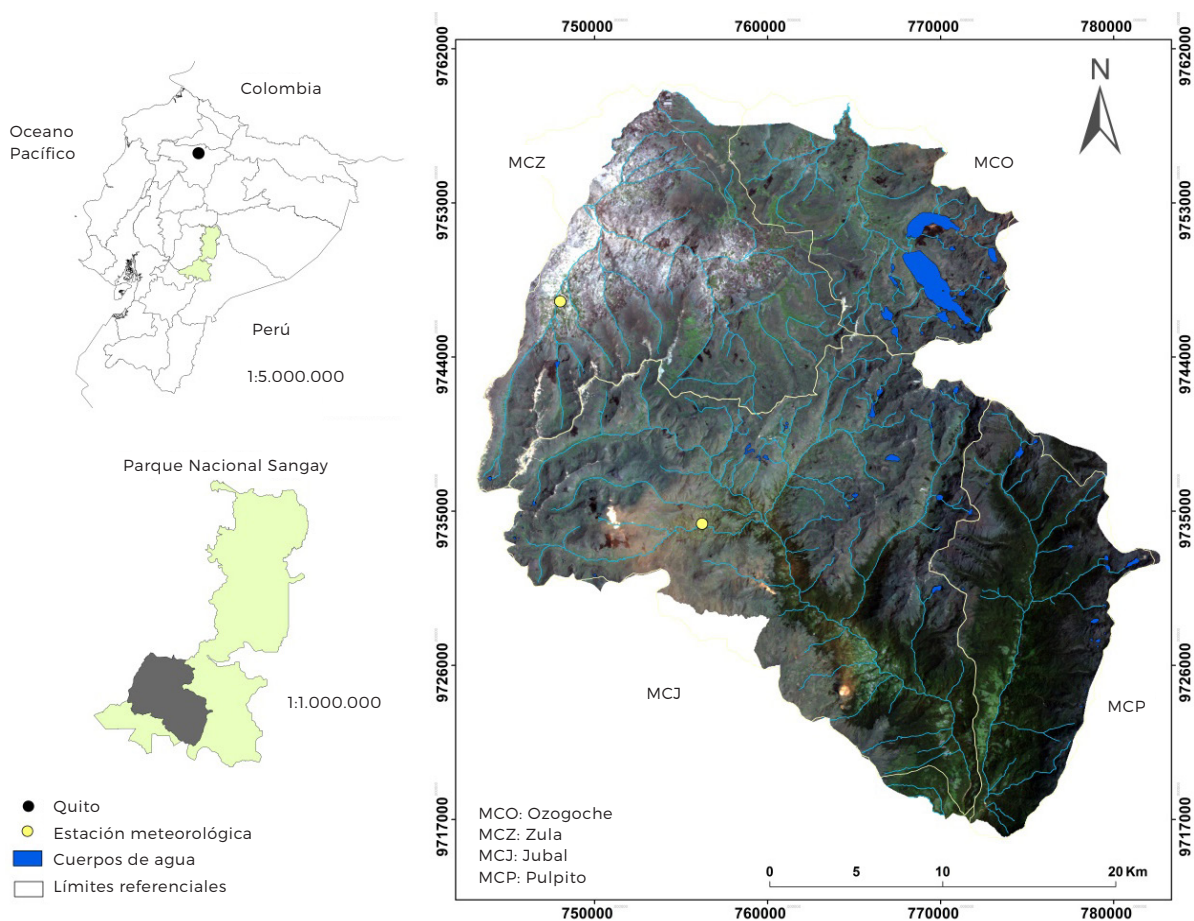


Figura 1 Mapa del área donde se ubican las microcuencas estudiadas

La topografía de la zona es irregular. La MCO exhibe un nivel de pendiente mayoritariamente de ondulado a inclinado (5 % a 25 %). La MCZ muestra una pendiente que va de ondulado (5 % a 12 %) a escarpado (30 % a 50 %), dominando el carácter inclinado (12 % a 25 %). La MCJ exhibe un nivel de pendiente que va de inclinado (12 % a 25 %) a muy escarpado (50 % a 90 %), predominando las pendientes inclinadas (12 % a 25 %) con una presencia importante de pendientes mayores a 30 %. La MCP presenta pendientes que van de inclinado (12 % a 25 %) a escarpado (30 % y 50 %), destacando las pendientes escarpadas.

La MCO tiene un rango de elevaciones que van de 3.608 a 4.124 msnm. La MCZ exhibe un rango de elevaciones que van de 3.093 a 4.124 msnm. La MCJ muestra un rango de elevaciones que van de 2.062 a 4.124 msnm, con predominio de elevaciones de 3.093 a 3.608. La MCP presenta alturas que van de 2.162 a 3.608 msnm dominando las elevaciones que van de 3.093 a 3.608 msnm.

El área de estudio está ubicada en el nudo de Azuay entre las hoyas de Chanchán y del Cañar. El nudo de Azuay es un macizo montañoso constituido por estructuras geológicas transversales elevadas, caracterizadas por una gran diversidad de relieves.

Es una zona de transición dominada por valles con profunda incisión y lomas de fuertes pendientes, donde es difícil distinguir la cordillera Real (constituida por un armazón de rocas antiguas, volcano-sedimentarias pertenecientes a una serie calco-alcalina-andesita-dacita) y la cordillera Occidental (constituida por rocas metamórficas que se corresponde con la serie de andesita-dacitariodacita), (Stern, 2004). En esta zona de transición se encuentran regiones fisiográficas atravesadas por ríos que drenan hacia las cuencas del Pacífico y del Atlántico. Entre las cordilleras Occidental y Central aparecen altiplanos formados por numerosos valles; constituyen una serie de cuencas deprimidas intra-andinas; se trata de graben o fosas de origen tectónico rellenas con una alternancia de sedimentos fluvio-lacustres, localmente fluvio-glaciares cuaternarios (areniscas, arenas, conglomerados, arcillas) y de origen volcánico (coladas, lahares, proyecciones, cineritas, cenizas cementadas o cangahua), (Winckfl, 1982).

La MCO y MCZ se encuentran principalmente en la formación Pisayambo. Es una formación con secuencias gruesas de lavas y materiales piroclásticos que han devenido en una composición de andesita basáltica y andesita de dos piroxenos. En la cordillera Occidental se encuentran depósitos de andesitas piroxénicas, mientras que en la cordillera Real existe una composición de andesita, dacitas y riolitas (Hall *et al.*, 2008).

La MCJ se encuentra en parte en la Fm. Pisayambo, unidad Alao-Paute (JAa) –cinturón de rocas verdes formadas principalmente por lavas metamórficas y también esquistos pelíticos y grafiticos, cuarcitas y mármoles, venas e intrusiones de calcita–, unidad Maguazo (JAm) rocas metamórfi-

cas de bajo grado; filitas negras a grises, mica-esquistos, pizarras y cuarcitas intensamente plegadas, producto del metamorfismo de rocas volcánicas y volcanodetritos. La MCP se encuentra sobre unidad Alao-Paute (JAa) y unidad Maguazo (JAm).

En la MCO se pueden encontrar cuerpos de agua natural, zonas de páramo y zonas de pasto cultivado, predominando las zonas de páramo, mientras que en la MCZ se localizan zonas de pasto cultivado, zonas de bosque plantado y zonas de páramo. En la MCJ se hallan zonas de páramo, de pasto cultivado, de bosque plantado y de bosque natural, predominando las zonas de páramo. En la MCP se encuentran zonas de páramo y bosque natural.

En la MCO se encuentran dos tipos de ecosistema. Un primer tipo de ecosistema que corresponde con el páramo almohadillas que está asociado con el estrato Herbazal Lacustre Montano Alto, localizado en las zonas de humedales y alrededor de las lagunas. Las especies más frecuentes son: *Valeriana rígida*, *Hypochoeris* sp., *Werneria nubigena*, *Plantago rígida*, *Gentiana sedifolia*, *Azorella pedunculata*, *Plantago australi*. Un segundo tipo de ecosistema se corresponde con el páramo herbáceo que predomina en grandes extensiones, especialmente en el declive de las montañas. Las especies más comunes son: *Cortaderia nítida*, *Calamagrostis intermedia*, *Disterigma empetrifolium*, *Hypericum laricifolium*, *Gentiana cerastoides*.

En la MCZ se localizan cuatro ecosistemas. El primero se manifiesta como un Matorral seco montano que se encuentra en las quebradas y donde las especies de predominancia son: *Opuntia* sp., *Croton callicarpifolius*, *Tillandsia* sp., *Puya hamata*. El segun-

do se revela como Bosque siempre-verde montano alto; se encuentra en los contornos de las quebradas, declives de las montañas en pequeños fragmentos de bosques y muy cerca de las lagunas. La especie más común en este estrato es el Piquil (*Gynoxys halli*). El tercer ecosistema se corresponde con el páramo almohadillas que está asociado con el estrato Herbazal Lacustre Montano Alto, localizado en las zonas de humedales y alrededor de las lagunas. El cuarto ecosistema se corresponde con el páramo herbáceo que predomina en grandes extensiones, especialmente en el declive de las montañas.

En MCJ y MCP se encuentran dos ecosistemas. Uno identificado como Bosque siempre verde montano alto, en el cual encontramos árboles de gran altura, aproximadamente 20 m, cubiertos por una gran abundancia de plantas epífitas de las familias Orchidaceae, Bromeliaceae y Araceae, siendo las más representativas: *Escallonia mytilloidea*, *Escallonia rolloti*, *Weinmannia mariquitae*, *Gaiadendron punctatum* y *Oreopanax semanianus*. El segundo corresponde a un páramo herbáceo que se encuentra localizado en las partes altas de la MCJ y MCP. Las especies más comunes son: *Cortaderia nítida*, *Calamagrostis intermedia*, *Disterigma empetrifolium*, *Hypericum laricifolium* *Geranium cerastoides* (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2012).

Los suelos del área de estudio son de origen volcánico, encontrándose en la mayor parte del área suelos de tipo Andosoles y en menor cuantía Inceptisoles e Histosoles. Las clases texturales características son del tipo limosa, arenosa, franco arenoso. También se pueden encontrar suelos poco desarrollados sobre sustratos rocosos. Las clases texturales características de los suelos de

la MCO son limosas y arcillosas. En la MCO se encuentran suelos poco desarrollados sobre sustrato rocoso. En la MCZ la textura es limosa con inclusiones de arena fina y arena. Los suelos de MCJ son limosos, franco arenosos, franco arcillo arenosos. Los suelos de la MCP presentan una textura franco arenoso limoso. En la MCP los suelos son poco desarrollados sobre sustrato rocoso (Gobierno Autónomo descentralizado Parroquia Rural de Achupalla, 2015).

En la región se pueden describir cinco tipos de uso del suelo: bosque 17 %, páramo 61 %, cultivos 14 %, pastos 6 %, cuerpos de agua 1 % y plantaciones 1 %. Sin embargo: (1) la MCO está casi totalmente cubierta por páramo y cuerpos de agua y conserva los sistemas lacustres; (2) la MCZ es la más intervenida caracterizada por tener la mayor parte de su cobertura cultivos, pastos y plantaciones; y (3) la MCJ y MCP se encuentran bajo bosque y por tener laderas inclinadas son zonas no intervenidas.

En la parte norte del área de estudio, la estación meteorológica Achupallas (INAMHI: M5140) durante el período 2013-2015 registró una temperatura media anual de 10,6 °C, una humedad relativa media anual de 73 % y una precipitación media anual de 694 mm. La estación meteorológica INAMHI: 5140 se encuentra ubicada en las coordenadas UTM 748006 y 9747233. En la parte sur del área de estudio, la estación meteorológica Jubal (INAMHI: M5138), durante el período 2013-2015, registró una temperatura media anual de 8,2 °C, una humedad relativa media anual de 85,6 % y una precipitación media anual de 981 mm. La estación meteorológica INAMHI: 5138 se encuentra ubicada en las coordenadas UTM 756205 y 9734265. Debido al gradiente alti-

tudinal ocurren fríos intensos y heladas en horas de la noche y madrugada, con temperaturas de hasta los 2 °C. En la parte sur es común hablar de llovizna persistente, pero la temporada lluviosa es entre los meses de marzo a julio. La velocidad promedio del viento es de 2.16 ms⁻¹, los vientos máximos se dan en el sector de Ozogoché donde la velocidad máxima llega a los 6 ms⁻¹ (INFOPLAN, 2011; UNACH, 2011).

El área de estudio abarca 4 MC del suroeste del Parque Nacional Sangay. Este parque es una de las áreas protegidas más importantes de la región andina tropical y la tercera más extensa del Ecuador continental. El Parque Nacional Sangay fue declarado en 1983 como Patrimonio Natural de la Humanidad por la UNESCO. Abarca una gran variedad de paisajes inalterados, altos niveles de endemismo y diversidad ecológica y se ubica en una zona de transición, donde convergen las corrientes cálidas y cargadas de humedad procedentes de la amazonia parte Sur, con las frías y secas de la parte Norte de los Andes ecuatorianos. La MCO es un reservorio natural de agua dulce (Sistema lacustre Ozogoché) y aporta su recurso hídrico a las centrales hidroeléctricas Agoyan y San Francisco. La MCZ a la Central Hidroeléctrica Nizag, y la MCJ y MCP a la Central Hidroeléctrica Paute. Sin embargo, factores antropogénicos amenazan la sostenibilidad de estas MC. Por ejemplo, del 2001 al 2012: (1) las áreas orientadas a uso pecuario, agrícola y agropecuario forestal incrementaron 10 %, 8 % y 5 %, respectivamente, mientras que las áreas de conservación y protección disminuyeron un 7 % (Gobierno Autónomo descentralizado Parroquia Rural de Achupalla, 2015).

2.2. Fuentes de información

En este estudio se utilizaron mapas de la base cartográfica digital de INFOPLAN (2011). Los mapas tienen escala nacional 1:1.000.000 y contienen capas o *shapefile* como son cantones, parroquias, vías, ríos, zonas de vida y otros. Estos mapas fueron procesados en un ambiente GIS para extraer el área de estudio, vías, ríos, entre otros. La red natural del sistema de drenaje exhibido en el mapa topográfico fue digitalizado y actualizado usando el modelo digital de elevaciones (MDE) y utilizando herramientas de análisis del programa *ArcGis* 10.2. Los límites de las MC se delinearon tomando como base la línea divisoria del agua, derivadas del modelo digital de elevación en la caja de herramientas del programa *ArcGis* 10.2 y, con el conocimiento de la zona por parte de los técnicos expertos, se procedió a definir el punto de desembocadura del río principal. Así nuestra área de estudio se dividió en cuatro MC.

2.3. Herramientas y técnica

Para la delimitación de las MC se utilizó el paquete de herramientas del software *ArcGis* 10.2, teniendo como punto de inicio el MDE de 30m, cuyo pixel cubre una superficie de 900 m², trabajando en el Datum WGS_1984_UTM_Zone_17S. La herramienta *Clip raster* permitió extraer la máscara del DEM que sirve de plantilla general y cubre toda el área de estudio. Del paquete de herramientas *hydrology* se utilizó: *Fill* para rellenar las imperfecciones existentes en la superficie del DEM, de tal forma que las celdas en depresión alcancen el nivel del terreno. *Flow direction* para definir la dirección de flujo de las masas de agua. *Flow*

accumulation define el número de ríos a través de un factor de precisión 0,1 que depende del tamaño de la microcuenca. *Conditional* construye automáticamente la red hídrica. *Stream to Feature* genera un vector del resultado del ráster. *Shapefile tipo punto* para determinar el punto de desfogue de la microcuenca. *Watershed* delinea la microcuenca por cada uno de los segmentos de cauce definidos. *Stream order* crea un ráster del orden de las corrientes, para ello se utilizó el método *Strahler* donde el orden de la corriente se incrementa cuando se cruzan dos drenajes del mismo orden. *Reclassify* para encontrar el área acumulada entre las curvas de nivel cada 50 m, las mismas que sirven para graficar la curva hipsométrica. El criterio de expertos se usó para definir el punto de desembocadura del río principal para la posterior delimitación de cada una de las microcuencas. En el caso de las MCJ y MCP, los puntos de desembocadura corresponden al río Paute, mientras que para las MCZ y MCO se consideró el punto de convergencia del río principal con el límite del área de estudio.

2.4. Análisis del sistema natural de drenaje de las MC

La caracterización morfológica de la geometría de las MC se realizó a través de la cuantificación de: (1) aspectos lineales, (2) aspectos del área y (3) aspectos del relieve. El orden de los afluentes se determinó usando la metodología de Horton (1945) y el orden de los cauces se designó usando el sistema de nomenclatura de Strahler (1957). Los PM primarios: número de afluentes, longitud de afluentes, área, perímetro, longitud del canal principal y longitud de la cuenca

se obtuvieron de la capa del sistema natural de drenaje. Los PM para las MC se calcularon usando las fórmulas que se muestran en el **cuadro 1** en el ambiente *ARC GIS*.

2.5. Priorización de sub-cuencas

Los PM relacionados con aspectos lineales y del área se consideran indicadores que se pueden usar para evaluar el riesgo de erosión (RE), (Aher *et al.*, 2014; Ratnam *et al.*, 2005). En este contexto, se pueden usar los PM para conocer la prioridad de atención que demanda una MC. Para esto, se agrupó el conjunto de valores que se tengan para cada PM. Luego, se le asignó un número entero a cada valor del PM. La magnitud del número entero debe estar en correspondencia con la relevancia que tiene el parámetro para la evaluación del RE. Por ejemplo, si la relación entre un PM particular y el RE es proporcional, entonces se asigna el número uno (indicador de primera prioridad) al valor más alto del conjunto de valores. Se continúa asignando el número dos (indicador de segunda prioridad) al valor inmediatamente inferior al valor más alto y así hasta que se le asigne una prioridad a cada valor del conjunto. Si la relación entre un PM específico y el RE es inversamente proporcional, entonces se le asigna el número uno (indicador de primera prioridad) al valor más bajo del conjunto de valores. El número dos (indicador de segunda prioridad) al valor inmediatamente superior al valor más bajo y así sucesivamente hasta que se le asigne una prioridad a cada valor del conjunto.

Los PM que se utilizaron en esta investigación para conocer la prioridad de atención que demanda cada una de las MC estudiadas son:

Cuadro 1 Definición de los parámetros morfométricos usados para caracterizar los aspectos lineales, de área y relieve de las microcuencas

Parámetros morfométricos	Definición / formula
Aspectos Lineales	
Número total de cauces de orden u (N_u)	Número total de cauces que pertenecen al orden jerárquico u (Strahler, 1964)
Relación de bifurcación (R_b)	$R_b = N_u / N_{u+1}$ (Schumm, 1956) N_{u+1} = Número total de cauces que pertenecen al orden jerárquico $u + 1$.
Longitud del cauce principal (L_m)	Longitud del cauce más largo desde el punto de salida hasta su cabecera.
Longitud total de los cauces de orden u (L_u)	Suma de todas las longitudes de los cauces en el orden u (Horton, 1945)
Longitud promedio de los cauces de orden u (L_{sm})	$L_{sm} = L_u / L_u$ (Strahler, 1964)
Relación de longitudes de cauces (R_L)	$R_L = L_u / L_{u-1}$ Horton, 1945) L_{u-1} = Suma de todas las longitudes de los cauces en el orden $u - 1$.
Longitud del flujo superficial (L_g)	$L_g = 1/(2D_d) L_g$ (Horton, 1945) D_d = Densidad de drenaje.
Longitud de la cuenca (L_b)	Distancia entre punto de salida y el punto más lejano en el límite de la cuenca (Ratnam <i>et al.</i> , 2005).
Perímetro de la cuenca (P)	Longitud de la línea que bordea la cuenca.
Aspectos del Área	
Área de la cuenca (A)	Área encerrada dentro de los límites divisorios de la cuenca
Densidad de la red de drenaje (D_d)	$D_d = \sum L_u / A$ (Horton, 1932)
Constante de mantenimiento del canal (C_m)	$C_m = 1/D_d$ (Schumm, 1956)
Frecuencia de cauces (F_s)	$F_s = (\sum N_u) / A$ (Horton, 1932)
Circularidad relativa (R_c)	$R_c = 4\pi A / P^2$ (Miller, 1953)
Elongación relativa (R_e)	$R_e = \sqrt{4A\pi} / L_b$ (Schumm, 1956)
Factor de forma (R_f)	$R_f = A / L_b^2$ (Horton, 1932)
Forma de la cuenca (B_s)	$B_s = L_b^2 / A$
Coefficiente de compacidad (C_c)	$C_c = (0,2821)P / \sqrt{A}$ (Horton, 1945)
Textura de la red drenaje (R_t)	$R_t = (\sum N_u) / P$ (Horton, 1945)
Aspectos del Relieve	
Relieve total (H)	Máxima distancia vertical entre los puntos más bajos y más altos en la cuenca (Hadley y Schumm, 1961)
Relación del relieve (R_h)	$R_h = H / L_b$ (Schumm, 1956)
Número de rugosidad (R_n)	$R_n = H D_d$

- Aspectos lineales: longitud de flujo superficial y relación de bifurcación.
- Aspectos del área: densidad de la red de drenaje, circularidad relativa, coeficiente de compacidad, factor de forma, textura de la red de drenaje, frecuencia de cauces, forma de la cuenca, elongación relativa y constante de mantenimiento del canal.

Los PM relacionados con aspectos lineales son considerados factores que viabilizan la erosión; así, mientras más alto sea su valor numérico más viable es la erosión (Ratnam *et al.*, 2005). Los PM relacionados con aspectos del área son considerados factores que *no* viabilizan la erosión, así, mientras más alto es su valor numérico menos viable es la erosión.

En esta investigación se utilizó el método denominado WSA (por sus siglas en inglés referidas a «*Weighted Sum Analysis*»), propuesto por Aher y otros (2014) para conocer la prioridad de atención que demanda una MC cuando se evalúa su vulnerabilidad a ciertos factores de riesgo. El método se detalla a continuación:

- 1) Se construyó la matriz de valores de prioridad (p) que se identificó como MVP, constituida por m filas y n columnas. Donde m corresponde al número máximo de cuencas a analizar y n al número máximo de PM a considerar. Se definió las variables auxiliares c y j , con c tomando valores entre 1 y m , y j tomando valores entre 1 y n . La prioridad p es un número entero que debe estar entre 1 y m , que se le asignó de manera que $p = 1$ se interpreta como la primera prioridad (la más alta prioridad), $p = 2$ como la segunda prioridad y así sucesivamente. El valor de p que se asignó al PM « j » en la sub-cuenca « C » se identificó como $p_{c,j}$. Para asignar la prioridad p se agrupó todos los valores calculados del PM « j » y se ordenaron de menor a mayor y se asignó p según corresponda con el criterio seleccionado.
- 2) Con la MVP se calculó la matriz de coeficientes de correlación (MCC) entre las prioridades asignadas a los PM del conjunto de cuencas a estudiar, constituida por i filas y j columnas, donde $i = j = n$. Cada uno de estos coeficientes se identificó como « $C_{i,j}$ » que representa el coeficiente de correlación entre los valores de los PM « i » y « j » codificados por las prioridades e identificados por el superíndice p .

- 3) Se calcularon los valores a_i que resultan de dividir la suma de todos los coeficientes de correlación en cada columna j de la MCC (SC_j) entre la suma de todos los SC_j (TSC), así:

$$a_j = \frac{SC_j}{TSC} = \frac{\sum_{i=1}^n C_i}{\sum_{j=1}^n SC_j} \quad (1)$$

- 4) Se calculó el Índice de Prioridad (IP) de la cuenca « c »:

$$IP_c = a_1 p_1 + \dots + a_n p_n = \sum_{j=1}^n a_j p_{k,j} \quad (2)$$

- 5) Los valores numéricos del IP se ordenan de menor a mayor y se le asignó la primera prioridad (más alta prioridad) a la SC con el IP de menor valor. La segunda prioridad a la SC con el IP inmediatamente superior al anterior y así sucesivamente hasta haberle asignado prioridades a todas las SC.

3. Resultados y discusión

3.1. Análisis del sistema natural de drenaje de cuencas

El análisis morfométrico permite conocer algunas de las características físicas de las cuatro MC estudiadas mediante el estudio de las particularidades de sus aspectos de relieve, de área y longitudinales (Kulkarni, 2015). Este análisis permite hacer comparaciones entre las distintas MC que ayudan a entender el funcionamiento hidrológico y orientan sobre los aspectos que se deben atender para su manejo.

3.1.1. Aspectos lineales

Los aspectos lineales involucran mediciones de longitud. Tienen una relación directa con

la viabilidad de erosión (Ratnam *et al.*, 2005). Los parámetros área, perímetro, longitud de la cuenca y longitud del canal principal de la redes de drenaje se muestran en el **cuadro 2**.

3.1.1.1. Longitud total de los cauces de orden u (L_u): En el **cuadro 3** se puede observar que el número de cauces en la MCZ exhibe una relación inversa con el número de orden (menor número de orden - mayor número de cauces), mientras que en las MCO, MCJ y MCP no se cumple esta relación, lo que indica que el flujo de los cauces ocurre desde gran altitud, con variaciones litológicas y pendientes moderadamente empinadas (Nag, 1998; Srinivasa *et al.*, 2004).

3.1.1.2. Orden del cauce principal (u): La clasificación de los cauces en un orden jerárquico es importante para señalar el tamaño y escala de la cuenca. Los cauces principales de las MCO, MCZ y MCJ son de 5° orden y cubren un área de 84.779 ha y la MCP es de 4° orden y cubre 16.846 ha (**Cuadro 2 y Cuadro 3**). La variación en el orden y dimensiones de las MC se asocia principalmente con condiciones topográficas/fisiográficas de la región.

3.1.1.3. Relación de bifurcación (R_b): Los valores promedios del radio de bifurcación son: 4,70 (MCO); 3,63 (MCZ); 3,00 (MCJ) y 2,69 (MCP). Estos valores sugieren que la estructura geológica de las MC en estudio no perturba los patrones de drenaje y que estas MC se encuentran cubiertas por una densa vegetación (**Cuadro 4**), (Patel & Srivastava, 2015).

3.1.1.4. Relación de longitudes de cauce (R_L): En general, el valor de R_L exhibe una dismi-

nución cuando el orden del cauce cambia de bajo a alto, lo que indica que el desarrollo de los cauces se encuentra en una fase joven retardada (**Cuadro 4**). La relación de bifurcación entre órdenes de cauces sucesivos varía debido a diferencias en la pendiente y condiciones topográficas, y tiene una relación importante con el flujo de descarga superficial y el estado de erosión de la cuenca (Sreedevi *et al.*, 2009).

3.1.1.5. Longitud de flujo superficial (L_g): Representa la distancia que recorre el agua sobre la superficie antes de concentrarse y definir un cauce. Usualmente se refiere al flujo de agua precipitada que se mueve sobre la superficie y conduce a un cauce que, generalmente, depende de la longitud de la pendiente y condiciones de la cobertura de la tierra. La longitud de flujo superficial afecta el desarrollo hidrológico y fisiográfico del drenaje de la cuenca. Los valores de flujo superficial se muestran en el **cuadro 4** y son: 0,81 (MCO); 0,57 (MCZ); 0,55 (MCJ) y 0,52 (MCP). Los valores más altos indican un proceso de escorrentía más lento, mientras que valores bajos son indicativos de procesos de escorrentía más rápidos.

3.1.2. Aspectos del área

En el análisis de los aspectos de área intervienen mediciones planimétricas, además de mediciones lineales, solo se considera la forma de la cuenca, sin considerar su relieve.

3.1.2.1. Frecuencias de cauces (F_s): Los resultados del análisis se muestran en el **cuadro 5**, donde se puede apreciar que los valores varían de 1,66 (MCO), 1,93 (MCZ), 2,66 (MCJ) y 2,67 (MCP). El valor más alto sugiere que

en la MCP tiene un potencial alto para una mayor escorrentía (Lama *et al.*, 2015).

3.1.2.2. Factor de forma (R_f): Los valores del factor de forma fluctúan entre 0,67 (MCO), 0,87 (MCZ), 0,39 (MCJ) y 0,35 (MCP), (**Cuadro 5**). Valores pequeños del factor de forma indican una cuenca con forma más elongada, mientras que valores más cercanos a uno indican cuencas con formas más circu-

lares. En las cuencas alargadas, los caudales máximos son más fáciles de manejar que en cuencas con formas más circulares.

3.1.2.3. Elongación relativa (R_e): Los valores de elongación relativa fluctúan entre 0,92 (MCO), 1,05 (MCZ), 0,70 (MCJ) y 0,67 (MCP), (**Cuadro 5**). Las características de la descarga de cualquier cuenca son controladas por su elongación relativa. La elongación relativa

Cuadro 2 Parámetros de la red de drenaje de las microcuencas

Unidad	Área (ha)	Perímetro (km)	Longitud de la cuenca (L_b), km	Longitud del cauce principal (L_m), km
MCO	14997	59,43	15,00	20,60
MCZ	26816	93,67	17,60	25,00
MCJ	42966	119,48	33,25	46,08
MCP	16846	71,12	22,00	29,70

Cuadro 3 Número de cauces y longitud total de cauces en los distintos órdenes

Unidad	Número total de cauces de orden u (L_b)						Longitud total de los cauces de orden u (L_u), m					
	1	2	3	4	5	T	1	2	3	4	5	T
MCO	135	49	13	48	4	249	42600	29400	7790	12400	780	92940
MCZ	282	107	93	31	4	517	101000	73200	39000	16500	4050	233180
MCJ	555	282	200	24	84	1145	190000	99800	68700	9080	25020	392910
MCP	225	126	21	77	-	449	85300	47500	5690	22800	-	161270

Cuadro 4 Valores de la relación de bifurcación y de longitudes de cauces

Unidad	Relación de bifurcación (R_b)					Relación de longitudes de cauces (R_L)				Longitud del flujo superficial (L_g), km^2 / km
	1/2	2/3	3/4	4/5	Valor Medio	2/1	3/2	4/3	5/4	
MCO	2,76	3,77	0,27	12,00	4,70	0,69	0,26	1,59	0,06	0,81
MCZ	2,64	1,15	3,00	7,75	3,63	0,72	0,53	0,42	0,25	0,57
MCJ	1,97	1,41	8,33	0,29	3,00	0,53	0,69	0,13	2,76	0,55
MCP	1,79	6,00	0,27	-	2,69	0,56	0,12	4,01	0,00	0,52

también determina la forma de la cuenca y se pueden clasificar con base en este valor: circular (0,9 - 1), oval (0,8 - 0,9), menos alargada (0,7 - 0,8), alargada (0,5 - 0,7), más alargadas (<0,5), (Parveen, 2012). Regiones con valores bajos de elongación relativa son susceptibles de mayor erosión, mientras que regiones con valores altos están relacionadas con una capacidad alta de infiltración y baja erosión. Los valores bajos de elongación relativa que exhiben la MCP y la MCJ indican que son cuencas con formas alargadas más susceptibles a erosión.

3.1.2.4. Circularidad relativa (R_c): La circularidad relativa está influenciada por la duración y frecuencia de los cauces, la estructura geológica, el uso del suelo, el clima, el relieve y la pendiente de la cuenca. Los valores de circularidad relativa fluctúan entre 0,38 y 0,53 (**Cuadro 5**). El pico de máximo caudal se alcanzará en menor tiempo en las MCZ (0,38) y MCJ (0,38), mientras que en las MCP (0,42) y MCO (0,53) el pico de máximo caudal tomará más tiempo.

3.1.2.5. Densidad de la red de drenaje (D_d): Este parámetro está relacionado con la dinámica de la cuenca, con la estabilidad de la red hidrográfica y con el tipo de escorrentía en la superficie, así como con la respuesta de la cuenca a la caída de lluvia abundante en corto tiempo. La densidad de la red de drenaje influencia de manera importante el hidrograma de descarga de la cuenca. En el **cuadro 5**, se muestran los valores de densidad de drenaje de las cuatro MC estudiadas, siendo los valores iguales a 0,62 (MCO); 0,87 (MCZ); 0,91 (MCJ) y 0,96 (MCP). Una mayor densidad de drenaje se relaciona con un subsuelo *menos* permeable que favorece el flujo

en el cauce antes que el flujo en ladera (escorrentía), lo que resulta en un menor tiempo de respuesta de la cuenca y, por consiguiente, el valor máximo del hidrograma de descarga se alcanza en corto tiempo. Mientras que la MCO exhibe la menor densidad de drenaje (0,62) y este valor se relaciona con un subsuelo *más* permeable que no favorece el flujo en el cauce y favorece más el movimiento del agua a través del subsuelo, lo que resulta en que el valor máximo del hidrograma de descarga se alcance en mayor tiempo. Mientras más alta es la densidad de la red de drenaje más alta será la vulnerabilidad a la erosión (Mishra y Rawat, 2015). Así, la MCP exhibe la alta vulnerabilidad a la erosión, seguida por la MCJ, MCZ y MCP.

3.1.2.6. Textura de la red drenaje (R_t): Este parámetro da una idea cualitativa del espaciamiento relativo entre cauces en la red de drenaje. Está determinada de manera significativa por la capacidad de infiltración de la cuenca (Horton, 1945) y determina la geomorfología. Los valores de textura de la red de drenaje se muestran en el **cuadro 5**. Strahler (1957) clasificó la textura en muy gruesa, cuando $R_t < 2$; gruesa, cuando $2 \leq R_t < 4$; moderada, cuando $4 \leq R_t < 6$; fina, cuando $6 \leq R_t < 8$ y muy fina, cuando $R_t > 8$. La MCJ exhibe una textura *muy fina* con $R_t = 9,68$, la MCP muestra una textura *fina* con $R_t = 6,31$, la MCZ y MCO tienen una textura *moderada*. Así, las MCP y MCJ exhiben una textura fina relacionada con cauces relativamente más espaciados y suelos poco permeables donde la escorrentía es alta. Mientras que las MCZ y MCO muestran una textura moderada relacionada con cauces moderadamente espaciados y suelos más permeables.

3.1.2.7. Coeficiente de compacidad (C_c): El coeficiente de compacidad es igual a 1 cuando la cuenca tiene la forma de un círculo perfecto y se hace mayor a 1 en la medida en que la longitud de la cuenca (L_b) se incrementa (se hace más alargada). De manera que este es un indicador de la naturaleza alargada de la cuenca. Valores bajos se asocian con *menos* vulnerabilidad a factores de riesgo, mientras que valores altos indican *mayor* vulnerabilidad y representan la necesidad de implantar medidas de conservación. Los valores del coeficiente de compacidad se muestran en el **cuadro 5**, siendo igual a 1,37 (MCO); 1,61 (MCZ); 1,63 (MCJ) y 1,55 (MCP).

3.1.2.8. Constante de mantenimiento del canal (C_m): Se define como el área de superficie requerida (expresada en km^2) por un cauce de un km de longitud; se expresa como km^2/km y es función de la permeabilidad. Mientras *más alto* es el valor de C_m , *más alta* es la permeabilidad y viceversa. Los valores de la constante de mantenimiento de las MC se muestran en el **cuadro 5** y fluctúan entre 1,61 (MCO); 1,15 (MCZ); 1,10 (MCJ) y 1,04 (MCP). Mientras más alto es el valor de C_m más alta es el área de superficie

requerida para mantener un cauce de 1 km de longitud.

3.1.3. Aspectos del relieve

Los aspectos del relieve son indicadores de la dirección del flujo de corriente de agua y representan la progresión de la denudación que está ocurriendo en la cuenca con base en condiciones geofísicas y topográficas del terreno. Los aspectos del relieve considerados en este estudio son: Relieve total (H), Relación del relieve (R_h) y Número de rugosidad (R_n).

3.1.3.1. Relieve total (H): El valor del relieve total es un indicador de la energía potencial que se encuentra disponible para mover agua y sedimentos desde los puntos con mayor altitud. En el **cuadro 6** se muestran los valores de H para las cuatro MC estudiadas y este valor varía entre 1.064 (MCO), 1.949 (MCZ), 2.705 (MCJ) y 2.707 (MCP).

3.1.3.2. Relación del relieve (R_h): Es un indicador de la pendiente global de la MC y es considerado un indicador de la intensidad de los procesos de erosión que están ocurriendo en la cuenca. Valores altos son característicos de regiones montañosas.

Cuadro 5 Parámetros morfométricos relacionados con aspectos del área

Unidad	Frecuencia de cauces (F_s), km^2	Factor de forma (R_f)	Elongación relativa (R_e)	Circularidad relativa (R_c)	Densidad de la red de drenaje (D_d), km^{-1}	Textura red drenaje (R_t), km^{-1}	Coeficiente de compacidad (C_c)	Constante de mantenimiento del canal (C_m)
MCO	1.66	0.67	0.92	0.53	0.62	4,19	1.37	1,61
MCZ	1.93	0.87	1.05	0.38	0.87	5,52	1.61	1,15
MCJ	2.66	0.39	0.70	0.38	0.91	9,58	1.63	1,10
MCP	2.67	0.35	0.67	0.42	0.96	6,31	1.55	1,04

Valores bajos son indicativos de baja capacidad de descarga de la MC y de que existe un buen chance de encontrar agua en el subsuelo (Parveen, 2012). Los valores de R_h para las MC se listan en el **cuadro 6**. Los valores fluctúan entre 0,071 (MCO); 0,111 (MCZ); 0,081 (MCJ) y 0,123 (MCP).

3.1.3.3. Número de rugosidad (R_h): Es un potencial indicador de factores amenazantes de una cuenca, especialmente de peligros relacionados con movimiento de agua y movilización de sedimentos, erosión de pendientes y erosión fluvial (Alcántara-Ayala & Goudie, 2010). Los valores de R_h para las MC se listan en el **cuadro 6**. Los valores fluctúan entre 0,659 (MCO); 1,696 (MCZ); 2,462 (MCJ) y 2,599 (MCP). Los valores altos de rugosidad implican una topografía accidentada y que la MC es propensa a erosión del suelo (Lama *et al.*, 2015). En regiones montañosas, los valores mayores a 1, pero menores a 10, están relacionados con procesos geomórficos fluviales con una posibilidad de incidencia intermedia. Mientras que valores menores a 1, se relacionan con procesos geomórficos relacionados con movimientos (Alcántara-Ayala & Goudie, 2010) de masas con una posibilidad de incidencia alta.

La caracterización morfométrica realizada ha mostrado la relevancia que tienen los aspectos lineales del área y del relieve para caracterizar el comportamiento hidro-topográfico de las MC estudiadas. Sin embargo, para la priorización solo se consideró los parámetros morfométricos relacionados con aspectos lineales y del área, porque los aspectos del relieve ya incluyen intrínsecamente aspectos lineales y del área y se quiso usar la menor cantidad de PM.

3.2. Priorización sobre la base de parámetros morfométricos

En el **cuadro 7** se muestra la MVP para los parámetros morfométricos en correspondencia con cada microcuenca estudiada y con los criterios adoptados para evaluar el RE. Con la MVP calculamos la MCC que se muestra en el **cuadro 8**. También se muestran en este cuadro los valores de los pesos a_i que resultan del análisis de correlación estadística.

En el **cuadro 8** se observa que la frecuencia de cauces muestra una correlación negativa con la relación de bifurcación (-1), con el coeficiente de compacidad (-0,40) y la forma de la cuenca (-0,80). El radio de bifurcación exhibe una correlación negativa con la frecuencia de cauces (-1), con la densidad de la red de drenaje (-1), con la textura de la red de drenaje (-0,80), con la circularidad relativa (-0,40), con el factor de forma (-0,80) y con la elongación relativa (-0,80). La densidad de la red de drenaje muestra una correlación negativa con la relación de bifurcación (-1), con el coeficiente de compacidad (-0,40) y con la forma de la cuenca (-0,80). La textura de la red de drenaje exhibe una correlación negativa con la relación de bifurcación (-0,80), con el coeficiente de compacidad (-0,80) y con la forma de la cuenca (-0,60). La circularidad relativa muestra una correlación negativa con la relación de bifurcación (-0,40) y con el coeficiente de compacidad (-1). La forma de la cuenca muestra una correlación negativa con la relación de bifurcación (-0,80) y con el factor de forma (-1). La elongación relativa exhibe una correlación negativa con la relación de bifurcación (-0,80) y la forma de la cuenca (-1). El coeficiente de compacidad muestra una correlación negativa con la

Cuadro 6 Parámetros morfométricos relacionados con aspectos del relieve

Unidad	Relieve total (H), m	Relación del relieve (R_n)	Número de rugosidad (R_n)
MCO	1064	0,071	0,659
MCZ	1949	0,111	1,696
MCJ	2705	0,081	2,462
MCP	2707	0,123	2,599

Cuadro 7 Matriz de valores de prioridad*

Unidad	Frecuencia de cauces (F_s^p)	Relación de bifurcación (R_b^p)	Densidad de la red de drenaje (D_d^p)	Textura de la red de drenaje (R_t^p)	Circularidad relativa (R_c^p)	Factor de forma (R_f^p)	Elongación relativa (R_e^p)	Coefficiente de compacidad (C_c^p)	Forma de la cuenca (B_s^p)
MCO	4	1	4	4	4	3	3	1	2
MCZ	3	2	3	3	2	4	4	3	1
MCJ	2	3	2	1	1	2	2	4	3
MCP	1	4	1	2	3	1	1	2	4

*Las prioridades asignadas a los PM se han denotado con un superíndice p

Cuadro 8 Matriz de coeficientes de correlación C_{ij}

	F_s^p	R_b^p	D_d^p	R_t^p	R_c^p	R_f^p	R_e^p	C_c^p	B_s^p
F_s^p	1,00	-1,00	1,00	0,80	0,40	0,80	0,80	-0,40	-0,80
R_b^p	-1,00	1,00	-1,00	-0,80	-0,40	-0,80	-0,80	0,40	0,80
D_d^p	1,00	-1,00	1,00	0,80	0,40	0,80	0,80	-0,40	-0,80
R_t^p	0,80	-0,80	0,80	1,00	0,80	0,60	0,60	-0,80	-0,60
R_c^p	0,40	-0,40	0,40	0,80	1,00	0,00	0,00	-1,00	0,00
R_f^p	0,80	-0,80	0,80	0,60	0,00	1,00	1,00	0,00	-1,00
R_e^p	0,80	-0,80	0,80	0,60	0,00	1,00	1,00	0,00	-1,00
C_c^p	-0,40	0,40	-0,40	-0,80	-1,00	0,00	0,00	1,00	0,00
B_s^p	-0,80	0,80	-0,80	-0,60	0,00	-1,00	-1,00	0,00	1,00
$SC_j = \sum_{i=1}^n C_i$	2,60	-2,60	2,60	2,40	1,20	2,40	2,40	-1,20	-2,40
$TSC = \sum_{j=1}^n SC_j$	7,40								
$a_j = \frac{SC_j}{TSC}$	0,351	-0,351	0,351	0,324	0,162	0,324	0,324	-0,162	-0,324

frecuencia de cauces (-0,40), con la densidad de la red de drenaje (-0,40), con la textura de la red (-0,80) y con la circularidad relativa (-1). El factor de forma de la cuenca muestra una correlación negativa con la frecuencia de cauces (-0,80), con la densidad de la red de drenaje (-0,80), con la textura de la red (-0,60), con el factor de forma (-1) y con la elongación relativa (-1).

Con los valores de los pesos a_i y la ecuación (2) se formuló el siguiente modelo para calcular el Índice de Prioridad de cada una de las cuencas estudiadas.

$$IP_c = \left\{ \begin{array}{l} 0,351(F_s^p + D_d^p) + \\ 0,324(R_i^p + R_f^p + R_e^p) + \\ 0,162(R_c^p) \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} 0,351(R_b^p) + \\ 0,324(B_s^p) + \\ 0,162(C_c^p) \end{array} \right\} \quad (3)$$

En la ecuación (3), el superíndice p hace referencia a los valores de prioridad mostrados en la MVP en la **cuadro 7** y el subíndice c hace referencia a la MC en consideración.

En el **cuadro 9** se muestran los valores del Índice de Prioridad calculados usando la ecuación (3). Además, se muestra el rango de prioridad asignado a cada MC en correspondencia con el IP_c calculado. Obsérvese, que se le asignó una prioridad alta a la MC con el IP_c más pequeño, una prioridad media a la MC con el valor de IP_c inmediatamente superior, y así sucesivamente, hasta

que se asigna una prioridad muy baja a la MC con el IP_c más alto.

Los resultados en el **cuadro 9** muestran que la MCP y MCJ son altamente susceptibles a erosión. El área de estas dos microcuencas (MC) representa el 58,86 % del área total, lo que las posiciona como áreas preferenciales para trabajos de conservación en el marco de una planificación y conservación eficiente de las MC de la región. En la **figura 2** se muestra el mapa del área donde se detallan las cuatro MC estudiadas y la prioridad de atención que demanda cada una de ellas. La más alta prioridad la tiene la MCP, lo que significa que exhibe una mayor fragilidad a factores que viabilizan la erosión.

Se puede observar en el **cuadro 9** que un alto porcentaje del área estudiada está constituida por zonas de muy alto a alto riesgo de erosión, siendo el 42,28 % de mediano riesgo y el 16,58 % de alto riesgo.

Los valores calculados del IP_c exhiben una semejanza (afinidad) inversa con los valores calculados del Número de rugosidad R_n . Mientras que el IP_c toma los valores: 5,541 (MCO), 4,486 (MCZ), 0,514 (MCJ) y -0,541 (MCP); el R_n toma los valores: 0,659 (MCO), 1,696 (MCZ), 2,462 (MCJ) y 2,599 (MCP). Lo que da soporte a la tesis de que el Número de rugosidad es un potencial

Cuadro 9 Índice de Prioridad de las microcuencas

Unidad	Índice de Prioridad (IP_c)	Rango de prioridades	Área relativa (%)
MCO	5,541	Muy baja	14,76
MCZ	4,486	Baja	26,39
MCJ	0,514	Alta	42,28
MCP	-0,541	Muy Alta	16,58

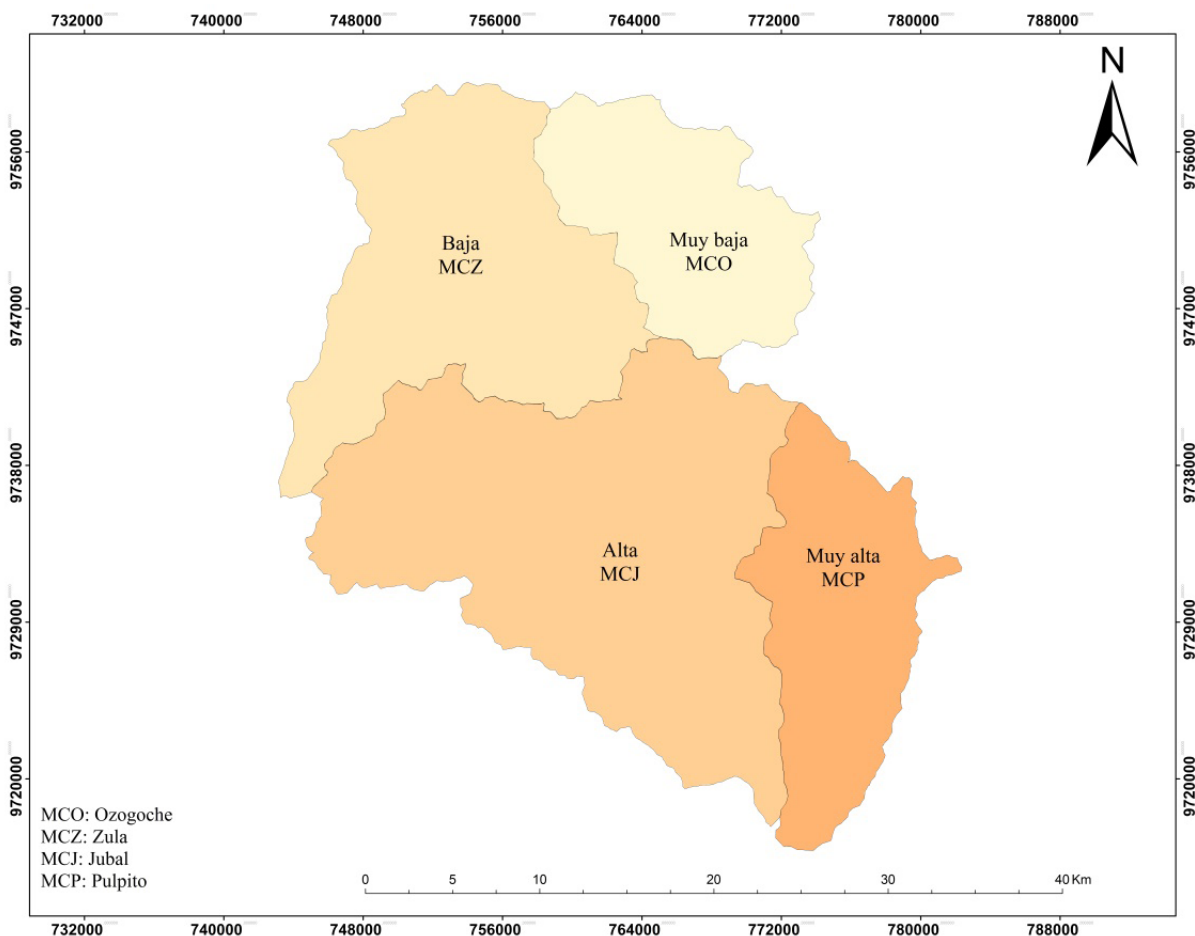


Figura 2 Mapa del área donde se detallan las cuatro MC estudiadas y la prioridad de atención que demanda cada una de las MC

indicador de factores amenazantes, especialmente de peligros relacionados con movimiento de agua y movilización de sedimentos, erosión de pendientes y erosión fluvial (Alcántara-Ayala & Goudie, 2010). En concordancia con el Número de rugosidad y los valores del IP_c calculados, los factores de riesgo en la MCP, MCJ y MCZ están más relacionados con procesos geomórficos fluviales, mientras que en la MCO los factores de riesgo se encuentran relacionados con procesos geomórficos asociados a movimientos de masas.

4. Conclusiones

La MCP y MCJ han sido identificadas como áreas preferenciales para trabajos de conservación y el establecimiento de medidas de control que se encuentren orientadas al mantenimiento de una dinámica sustentable de las MC. En concordancia con el Número de rugosidad y los valores del IP_c calculados, los factores de riesgo en la MCP, MCJ y MCZ están más relacionados con procesos geomórficos fluviales, mientras que en la MCO los factores de riesgo se encuentran relacionados con procesos geomórficos aso-

ciados a movimientos de masas. Los resultados confirman que el uso de PM, con el método de WSA, configura una herramienta eficiente (en el sentido de que necesita menos información que la que requieren otros métodos) para evaluar de manera rápida la vulnerabilidad y así conocer la fragilidad que exhibe una MC a factores de riesgo (en nuestro caso, factores que viabilizan la erosión). Esto es particularmente relevante si consideramos que nuestra área de estudio es de difícil acceso, posee una topografía de grandes desniveles, con climas extremos, y de la que se dispone de muy poca información. Finalmente, se ha mostrado que el método de análisis desplegado en esta investigación es efectivo identificando MC o unidades hidrológicas que deben ser consideradas unidades de evaluación y monitoreo por la fragilidad que exhiben.

5. Agradecimiento

A la Secretaria Nacional de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación del Ecuador (SENESCYT). Al Vicerrectorado de Postgrado e Investigación de la Universidad Nacional de Chimborazo (UNACH). Por el financiamiento de esta investigación a través del proyecto «Caracterización biogeográfica de la subcuentas hídrica para la adaptación al cambio climático considerando el paisaje cultural andino en la parroquia Achupallas, Cantón Alausí, Provincia de Chimborazo».

6. Referencias citadas

- AHER, P. D.; ADINARAYANA, J. & S. D. GORANTIWAR. 2013. «Prioritization of watersheds using multi-criteria evaluation through fuzzy analytical hierarchy process». *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 15(1): 11-18.
- AHER, P. D.; ADINARAYANA, J. & S. D. GORANTIWAR. 2014. «Quantification of morphometric characterization and prioritization for management planning in semi-arid tropics of India: A remote sensing and GIS approach». *Journal of Hydrology*, 511, 850-860. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.02.028>
- ALCÁNTARA-AYALA, I. & A. S. GOUDIE. 2010. *Geomorphological Hazards and Disaster Prevention*. Cambridge University Press. Cambridge, UK.
- BLACK, P. E. 2005. *Watershed hydrology*. John Wiley & Sons, INC. New York, USA.
- GOBIERNO AUTÓNOMO DESCENTRALIZADO PARROQUIA RURAL DE ACHUPALLA. 2015. *Plan de desarrollo y ordenamiento territorial 2015-2019*. Alausí, Chimborazo, Ecuador.
- HADLEY, R. F. & S. A. SCHUMM. 1961. «Sediment sources and drainage basin characteristics in upper Cheyenne River basin». En: *Water Supply*. pp. 137-196. U.S. Geological Survey, Paper 1531-B. Washington, USA.
- HALL, M. L.; SAMANIEGO, P.; LE PENNEC, J. L. & J. B. JOHNSON. 2008. «Ecuadorian Andes volcanism: A review of Late Pliocene to present activity». *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 176, 1-6. <http://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2008.06.012>
- HORTON, R. E. 1932. «Drainage-basin characteristics». *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 13(1), 350–361.
- HORTON, R. E. 1945. «Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology». *Geological Society of America Bulletin*, 56, 275–370. [http://doi.org/10.1130/0016-7606\(1945\)56](http://doi.org/10.1130/0016-7606(1945)56)
- INFOPLAN. 2011. *Información para el desarrollo - Oficina de planificación de la Presidencia ODEPLAN*. Quito, Ecuador.
- KORNER, C. & M. OHSAWA. 2005. «Mountain Systems». En: *Ecosystems and Human Well-being: Current State and Trends*. pp. 681-716. Islam Press. Washington, D.C
- KULKARNI, M. D. 2015. «The Basic Concept to Study Morphometric Analysis of River Drainage Basin: A Review». *International Journal of Science and Research*, 4(7), 2.277-2.280.
- LAMA, T. D.; SINGH, R. K.; SAIKIA, U. S. & K. K. SATAPATHY. 2015. «Geomorphometric analysis of a hilly watershed in north east India». *International Journal of Agriculture, Environment and Biotechnology*, 8(1), 29-36. <http://doi.org/10.5958/2230-732X.2015.00004.2>

- MALIK, M. I. & M. S. BHAT. 2014. «Integrated Approach for Prioritizing Watersheds for Management: A Study of Lidder Catchment of Kashmir Himalayas». *Environmental Management*, 54, 1.267-1.287. <http://doi.org/10.1007/s00267-014-0361-4>
- MILLER, V. C. 1953. *A quantitative geomorphic study of drainage basin characteristics in the clinch mountain area Virginia and Tennessee*. Columbia University (No. CU-TR-3). New York, USA.
- MINISTERIO DEL AMBIENTE DEL ECUADOR. 2012. *Sistema de Clasificación de los Ecosistemas del Ecuador Continental*. (Eds. R. GALEAS y J. E. GUEVARA). Subsecretaría de Patrimonio Natural. Quito, Ecuador.
- MISHRA, A. K. & K. S. RAWAT. 2015. «A Composite Watershed Prioritization Index (CWPI) Based on Terrain Characteristics , Morphometry and Soil Brightness Index (SBI) Using RS and GIS in Moolbari Watershed , Himachal Pradesh, India». *International Journal of Remote Sensing and GIS*, 4(2), 87-101.
- NAG, S. K. 1998. «Morphometric Analysis Using Remote Sensing Techniques in the Chaka Sub-basin, Purulia District, West Bengal». *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 26(1 & 2), 69-76.
- PARVEEN, R. 2012. «Geomorphometric Characterization of Upper South Koel Basin, Jharkhand: A Remote Sensing & GIS Approach». *Journal of Water Resource and Protection*, 04(12), 1.042-1.050. <http://doi.org/10.4236/jwarp.2012.412120>
- PATEL, D. P. & P. K. SRIVASTAVA. 2015. «Decision Support System integrated with Geographic Information System to target restoration actions in watersheds of arid environment: A case study of Hathmati watershed, Sabarkantha District, Gujarat». *Journal of Earth System Science*, 124 (1), 71-86.
- RAHAMAN, S. A.; AJEEZ, S. A.; ARUCHAMY, S. & R. JEGANKUMAR. 2015. «Prioritization of Sub Watershed Based on Morphometric Characteristics Using Fuzzy Analytical Hierarchy Process and Geographical Information System – A Study of Kallar Watershed, Tamil Nadu». *Aquatic Procedia*, 4, 1.322-1.330. <http://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.172>
- RATNAM, K. N.; SRIVASTAVA, Y. K.; VENKATESWARA RAO, V.; AMMINEDU, E. K. S. R. & MURTHY. 2005. «Check dam positioning by prioritization micro-watersheds using SYI model and morphometric analysis - remote sensing and GIS perspective». *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 33 (1), 25-38. <http://doi.org/10.1007/BF02989988>

- SCHUMM, S. A. 1956. «Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey». *Geological Society of America Bulletin*, 67(5), 597-646.
- SREEDEVI, P. D.; OWAIS, S.; KHAN, H. H. & S. AHMED. 2009. «Morphometric analysis of a watershed of south India using SRTM data and GIS». *Journal Geological Society of India*, 73, 543-552. <http://doi.org/10.1007/s12594-009-0038-4>
- SRINIVASA VITTALA, S.; GOVINDAIAH, S. & H. HONNE GOWDA. 2004. «Morphometric analysis of sub-watersheds in the Pavagada rea of Tumkur District, South India using remote sensing and GIS techniques». *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 32(4), 351-362. <http://doi.org/10.1007/BF03030860>
- STERN, C. R. 2004. «Active Andean volcanism: its geologic and tectonic setting». *Revista Geológica de Chile*, 31(2): 161-206. <http://doi.org/10.4067/S0716-02082004000200001>
- STRAHLER, A. N. 1957. «Quantitative analysis of watershed geomorphology». *Transactions American Geophysical Union*, 38(6), 913-920. <http://doi.org/10.1130/0016-7606>
- STRAHLER, A. N. 1964. «Quantitative Geomorfology of Drainage Basins and Channel Networks». En: T. V. CHOW (Ed.), *Handbook of Applied Hydrology*. pp. 39-76. McGraw-Hill. New York.
- UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO (UNACH). 2011. *Isoyetas en la Provincia del Chimborazo*. Riobamba, Ecuador.
- UNITED NATION - INTERNATIONAL STRATEGY FOR DISASTER REDUCTION (UN-ISDR). 2004. *Terminology of disaster risk reduction*. Geneva, Switzerland. Disponible en: <http://www.unisdr.org/eng/library/lib-terminologyeng{%}>
- VAN WESTEN, C. J. 2013. «Remote Sensing and GIS for Natural Hazards Assessment and Disaster Risk Management». En: J. SHRODER & M. P. BISHOP (Eds.), *Treatise on Geomorphology*. pp. 259-298. Academic Press. San Diego, California, USA. <http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-374739-6.00051-8>
- WINCKFLL, P. A. 1982. «Relieve y geomorfología del Ecuador». En: *Geomorfología*. pp. 3-19. Centro Ecuatoriano de Investigaciones Geográficas. Quito, Ecuador.