

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

Implicaciones geológicas y geomorfológicas del valle del río Upano y el
puente de la vía Macas – Puyo, Morona Santiago, Ecuador

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero/a en Geología

Presentado por:

ANA MARÍA BRITO MUÑOZ

BRYAN WILLIAM PIEDRA OJEDA

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2021

DEDICATORIA

El presente proyecto de titulación está dedicado a mi ángel y estrella del cielo, mi tía Blanca Brito, quien fue incondicional hasta el último día de su vida cumpliendo el rol de segunda madre para mí, Ana María. A nuestras madres Carmen Brito, Aurora Ojeda y a mi hermana Wendy Piedra, quienes han sido los pilares de nuestra formación tanto personal como profesional y las razones por las cuales seguimos adelante en esta lucha. A los profesores: MSc. David Altamirano, PhD. Maurizio Mulas y al MSc. Eduardo Díaz, por habernos inculcado los conocimientos y habilidades adecuadas para un óptimo desempeño laboral. Por último, a nosotros mismos por haber demostrado empeño, valentía y constancia para lograr poco a poco nuestros ideales.

AGRADECIMIENTOS

A Dios sobre todo las cosas, ya es nuestro mentor de sabiduría, el que nos otorga vida, salud y sobre todo fuerzas para no desfallecer a mitad del camino.

Agradecemos a todos aquellos que han aportado a nuestra formación profesional y han permitido lograr uno de tantos de nuestros objetivos planteados.

A nuestra familia por habernos apoyado tanto psicológica como económicamente durante toda la vida académica.

Queremos agradecer finalmente al MSc. David Altamirano y al PhD. Maurizio Mulas por haber sido participes en el desarrollo del presente proyecto ya que, con sus conocimientos, orientaciones y enseñanzas hicieron posible la realización este trabajo.

DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Ana María Brito Muñoz y Bryan William Piedra Ojeda* damos nuestro consentimiento para que la ESPOl realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"



Ana María Brito Muñoz



Bryan William Piedra
Ojeda

EVALUADORES

MSc. David Altamirano
PROFESOR DE LA MATERIA

MSc. David Altamirano
PROFESOR TUTOR

PhD. Maurizio Mulas
COTUTOR

RESUMEN

En los últimos 5 años, el río Upano ha presentado escenarios que contribuyen el aumento de la peligrosidad debido a factores como las fuertes e intensas precipitaciones y los productos volcánicos del Sangay, causantes del desbordamiento de sus aguas y modificación del cauce del río. Estas modificaciones han provocado frecuentes socavaciones en la vía Macas – Puyo (E45) afectando directamente al desarrollo socioeconómico de la comunidad. La disponibilidad de estudios geológicos en la zona no otorga la suficiente información para comprender el comportamiento del río, por lo que se planteó evaluar la dinámica fluvial en el periodo de 1987-2020 mediante el uso de imágenes satelitales Landsat y Sentinel 2 para la relación de los cambios geomorfológicos. La información servirá de soporte para futuras investigaciones de mitigación y gestionamiento territorial. La cuenca del río Upano se caracterizó mediante parámetros morfológicos obtenidos por herramientas SIG. Se empleó el NDVI para la extracción del río en el periodo de estudio mediante el filtrado Tasseled Cap. Se emplearon porcentajes de sedimentación y erosión, índice de barras para visualizar los cambios en el cauce del río. El río presenta tres zonas diferentes: baja sinuosidad, trezada y meándrica, caracterizadas por el índice de sinuosidad y pendiente longitudinal del cauce. La tasa de sedimentación reflejó mayor presencia de sedimentos en el año 2020 que en años anteriores, lo que reafirma la hipótesis de que la influencia del volcán Sangay, junto con las intensas precipitaciones son factores detonantes de eventos de crecidas.

Palabras Clave: geomorfología, dinámica fluvial, SIG, NDVI, Tasseled Cap

ABSTRACT

In the last 5 years, Upano river has presented sceneries that incite riskiness on account of factors such as deep and strong precipitations and volcanic Sangay's products, causing the overflowing of its waters and modification of the riverbed. Those modifications have caused strong undermines in Macas – Puyo roads (E45) affecting directly to socioeconomic development. The geological studies availability in this area does not provide enough information to understand the behavior of the river, so it was proposed to evaluate the fluvial dynamics in the period 1987-2020 through the use of Landsat and Sentinel 2 satellite images to compare the geomorphological changes. The collected information will serve as support for future mitigation and land management research. The Upano river basin was characterized by morphological parameters obtained by GIS tools. The NDVI was used for the extraction of the river in the study period through the Tasseled Cap filtering. Sedimentation and erosion percentages, bar index were used to visualize the changes in the river's course. The river has three different zones: low sinuosity, braided and meandering, characterized by the sinuosity rate and the river's course longitudinal slope. The sedimentation rate reflected a greater presence of sediments in 2020 than in previous years, which reaffirms the hypothesis proposed: the influence of the Sangay volcano, together with the intense rainfall, are triggers for flood events.

Key words: geomorphology, fluvial dynamics, GIS, NDVI, Tasseled Cap

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
ABSTRACT	II
ÍNDICE GENERAL	III
ABREVIATURAS.....	V
SIMBOLOGÍA.....	VI
ÍNDICE DE FIGURAs	VII
ÍNDICE DE TABLAS.....	IX
CAPÍTULO 1.....	1
<i>1.Introducción.....</i>	<i>1</i>
1.1 Descripción del problema	2
1.2 Justificación del problema	4
1.3 Ubicación del área de estudio	5
1.4 Objetivos	6
1.4.1 Objetivo general.....	6
1.4.2 Objetivos específicos	6
1.5 Marco teórico.....	6
1.5.1 Geología regional.....	6
1.5.2 Geología local.....	9
1.5.3 Clima y precipitación.....	12
1.5.4 Sistema Fluvial.....	13
1.5.5 La geomorfología dentro del sistema fluvial.....	18
1.5.6 Cuencas hidrográficas.	23
1.5.7 Sensores remotos y procesamiento de imágenes.	35
CAPÍTULO 2.....	44
<i>2.Metodología.....</i>	<i>44</i>
2.1 Fase I. Actividades Preliminares	45
2.1.1 Búsqueda y selección bibliográfica.....	45
2.1.2 Adquisición de datos.....	45
2.2 Fase II. Desarrollo y aplicación de técnicas	47

2.2.1	Procesamiento de datos con ArcGis.....	47
<i>CAPÍTULO 3.....</i>		<i>51</i>
<i>3.Resultados y análisis.....</i>		<i>51</i>
3.1	Parámetros morfológicos de la cuenca del río Upano.....	51
3.2	Parámetros asociados al río Upano.	55
3.2.1	Cauce principal	56
3.2.2	Clasificación del río.....	57
3.2.3	Erosión y sedimentación.....	63
3.2.4	Serie temporal de sedimentación/erosión.....	67
3.3	Caso de estudio: Puente Macas – Puyo.....	68
3.4	Error Tasseled Cap	71
<i>CAPÍTULO 4.....</i>		<i>72</i>
<i>4.Conclusiones Y Recomendaciones.....</i>		<i>72</i>
Conclusiones.....		72
Recomendaciones.....		74
BIBLIOGRAFÍA.....		75
APÉNDICES.....		83

ABREVIATURAS

DEM	Modelo Digital de Elevación
DoD	Diference of DEMs
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
GAD	Gobierno Autónomo Descentralizado
GCD	Geomorphic Change Detection
IGM	Instituto Geográfico Militar
MNDWI	Índice de Agua de Diferencia Normalizada Modificada
MTOP	Ministerio de Transporte y Obras Públicas
ND	Digital Number
NDVI	Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada
NDWI	Índice de Agua de Diferencia Normalizada
SHP	Shapefiles
SIG	Sistemas de Información Geográfico
SIGTIERRAS	Información de Tierras Rurales e Infraestructura Tecnológicas
SNI	Sistema Nacional de Información
TSG	Teoría General de Sistemas
USGS	United States Geological Survey
UTM	Universal Trasnversal Mercator
WGS	World Geodetic System

SIMBOLOGÍA

A_c :	Área de la cuenca
CO:	Cordillera Occidental
CR:	Cordillera Real u Oriental
D_d :	Densidad de drenaje
F_f :	Índice de Horton
Fm:	Formación Geológica
K_G :	Índice de Gravelius
km:	Kilómetros
L_c :	Longitud de la cuenca
m:	Metros
msnm:	Metros sobre nivel del mar
OB:	Cuenca Oriente
P_c :	Perímetro de la cuenca
px:	Píxel
R_B :	Relación de bifurcación
R_e :	Relación de elongación
T_c :	Tiempo de concentración
VI:	Valle Interandino

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Reportaje vía twitter de la condición de la vía Macas – Puyo. [Primicias, 2020]	3
Figura 1.2 Socavamiento a causa del desbordamiento río Upano en mayo 2021. [Diario El Telégrafo, 2021]	4
Figura 1.3 Ubicación de la zona de estudio. [Autores]	5
Figura 1.4 Esquema geológico – estructural del Ecuador mostrando sus regiones: Antearco costero, Cordillera Occidental, Valle Interandino, Cordillera Oriental y Cuenca Oriente, respectivamente. [Berc et al., 2005]	7
Figura 1.5 Mapa Geológico de la Región Macas. [Legrand et al., 2005]	10
Figura 1.6 Clasificación de patrones de canales [Rosgen, 1996]	16
Figura 1.7 Geometría de meandros [J. H. García, 2014]	17
Figura 1.8 Geomorfología aplicada a estudio de sistemas fluviales [García, 2014]	18
Figura 1.9 Variables morfológicas del sistema fluvial definidas en la escala espaciotemporal. [Stevaux & Latrubesse, 2017]	19
Figura 1.10 Erosión y sedimentación en ríos meándricos. [Villota, 2005]	20
Figura 1.11 Almacenamiento de sedimentos en estructuras de barras [Robert, 2003]	23
Figura 1.12 Representación esquemática de la variación de propiedades de un canal dentro de una cuenca de drenaje. [Robert, 2003]	25
Figura 1.13 Patrón de drenaje dendrítico [Charlton, 2008]	26
Figura 1.14 Patrón de drenaje paralelo. [Charlton, 2008]	27
Figura 1.15 Patrón de drenaje Trellis [Charlton, 2008]	27
Figura 1.16 Patrón de drenaje rectangular [Charlton, 2008]	28
Figura 1.17 Patrón de drenaje radial [Charlton, 2008]	28
Figura 1.18 Modelos de clasificación de cuencas de acuerdo con varios autores [Aramburu et al., 2014]	31
Figura 1.19 Curva hipsométrica asociada	34
Figura 1.20 Espectro electromagnético [Bautista et al., 2004]	37
Figura 1.21 Pixeles en una imagen satelital ampliada [Arango et al., 2005]	38

Figura 1.22 Ejemplo de restauración radiométrica [Eastman, 2012]	39
Figura 1.23 Diferencia de DEMs para la obtención de las tasas de sedimentación. [Williams et al., 2011]	43
Figura 2.1 Esquema metodológico del proyecto. [Autores]	44
Figura 2.2 Comparación de índices en un tramo del río Upano del año 1987. [Autores]	50
Figura 3.1 Curva Hipsométrica de la cuenca del río Upano. [Autores]	54
Figura 3.2 Visualización en 3D de la cuenca tipo valle mostrando las cordilleras de los Andes y Cutucú. [Autores]	54
Figura 3.3 Cauce principal en el período 1987 – 2020. [Autores]	55
Figura 3.4 Visualización del lecho del río. [Autores]	56
Figura 3.5 Zonas definidas para la clasificación del río Upano. [Autores]	57
Figura 3.6 Perfil Longitudinal Zona 1. [Autores]	58
Figura 3.7 Subzonas pertenecientes a la Zona 2. [Autores]	59
Figura 3.8 Perfil Longitudinal Subzona 1. [Autores]	60
Figura 3.9 Perfil Longitudinal Subzona 2. [Autores]	60
Figura 3.10 Perfil Longitudinal Subzona 3. [Autores]	61
Figura 3.11 Zona 3: Desplazamientos de los meandros años 1987 y 2020. [Autores] ..	62
Figura 3.12 Sedimentación/erosión ocurrida desde el año 1987 – 1994, enfocado en el sector Macas. [Autores]	64
Figura 3.13 Sedimentación/erosión ocurrida desde el año 1994 – 2020, enfocado en el sector Macas. [Autores]	65
Figura 3.14 Comparación de tasa de sedimentación/erosión para el periodo de estudio. [Autores]	66
Figura 3.15 Serie temporal de sedimentación 1987 – 2020. [Autores]	67
Figura 3.16 Mapa de la vía Macas – Puyo [Autores]	69
Figura 3.17 Áreas concesionadas alrededor de la vía Macas – Puyo. [Autores]	70
Figura 3.18 Comparación entre método Tassled Cap y de forma manual por el operador [Autores]	71
Figura 4.1 Radio de curvatura correspondiente a la zona 3. [Autores]	83

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Criterios para clasificación de ríos. Modificada de [Rosgen, 1994]	16
Tabla 1.2 Forma de Cuencas asociada al coeficiente	31
Tabla 2.1 Características de la obtención de las imágenes satelitales. [Autores]	46
Tabla 3.1 Parámetros morfológicos de la cuenca del río Upano. [Autores]	51
Tabla 3.2 Continuación tabla 3.1	52
Tabla 3.3 Desplazamientos de los meandros en el período 1987 – 2020. [Autores].....	63
Tabla 3.4 Eventos de Sedimentación/Erosión para el período 1987 – 2020. [Autores].	65
Tabla 3.5 Continuación tabla 3.4	66
Tabla 4.1 Calculo de sinuosidad zona 3	84
Tabla 4.2 Continuación Tabla 4.1	85

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

El Ecuador dispone de una red hídrica rica en fuentes de captación de agua como ríos, lagos, aguas subterráneas, acuíferos, etc., debido a las altas precipitaciones que se suscitan en la época lluviosa. La red hídrica ecuatoriana está constituida mayormente por ríos que nacen en Los Andes que producen dos vertientes principales: la vertiente Occidental, que abarca los ríos de la Costa y Sierra con desembocaduras al Océano Pacífico y la vertiente Oriental que la conforman otra parte de los ríos de la Sierra y Amazonía con afluencias en el Amazonas.

El río Upano está comprendido entre dos cordilleras Los Andes y Cutucú; naciendo en la Laguna Negra en los Andes a 3600 metros [m] de altura, trazando bruscamente una curvatura que se dirige hacia el sur, y que durante aproximadamente 80 kilómetros [km], origina un valle parcialmente recto de 1 – 2,4 km de ancho (Rostain, 2012). Sigue un corredor, definido al occidente por los Andes y al oriente por la cordillera Cutucú. Presenta un lecho pedregoso de 0,5 a 2 km de ancho, rodeado por grandes y escarpados barrancos que van desde los 70 a 100 m de altura, producto de alta actividad sísmica del sector. Su curso de agua sigue un recorrido rectilíneo, desembocando en el río Namangotza (Rostain & De Saulieu, 2019).

El Valle del Upano está dominado por el volcán Sangay a 5230 m de altitud y 10 – 12 km de diámetro en su base por lo que representa un alto nivel de riesgo en la vida de los habitantes debido a sus erupciones que, pueden llegar a ser muy devastadoras en todo lo alto de su entorno (Rostain, 2012).

Generalmente, la particularidad caudalosa de las corrientes de agua, en conjunto a la intensa erosión producidas por las altas crecidas, son los factores que han influenciado directamente en los cambios de la morfología de los cauces y que, a su vez, bajo estas condiciones han logrado acelerar este proceso. Si bien, el incremento ocupacional de las llanuras aluviales, la negligente empatía de las concesiones

mineras aledañas, la construcción de hidroeléctricas cercanas y la falta de control en libre aprovechamiento del suelo aguas arriba han acabado por alterar drásticamente dicha morfodinámica fluvial. (García & Cutillas, 2014)

La problemática que se tratará durante el presente trabajo de investigación será la incidencia que tienen: primero, el puente situado sobre la vía Macas – Puyo (E45); segundo, el incremento del caudal del río Upano en época de altas precipitaciones y la presencia de productos piroclásticos provenientes del volcán Sangay, que generan el represamiento y desbordamiento de sus aguas que tienen como efecto el colapso de alcantarillas, ocasionando socavamientos de baja a alta magnitud en un tramo de esta vía; siendo estos también, los factores que influyen en la dinámica fluvial del río. La falta de estudios geológicos adecuados ha ocasionado inconvenientes como el cierre de la vía afectando al transporte y comercio, lo cual representa amenazas a la calidad de vida de los habitantes de la Ciudad de Macas y sus alrededores.

Finalmente, de acuerdo con la problemática establecida, este trabajo tiene como finalidad evaluar la dinámica fluvial del río Upano mediante el uso de imágenes satelitales Landsat y Sentinel 2 para relacionar los cambios geomorfológicos con los eventos de inundación en el 2021, generando una base de información para futuros estudios y que permitan una óptima planificación territorial y gestionamiento integral contra fenómenos naturales.

1.1 Descripción del problema

El 25 de septiembre del 2020, el Servicio Nacional de Riesgos reportó un desbordamiento del río Upano en el trayecto de la vía Macas – Puyo que ocasionó un socavón, dejándola parcialmente inhabilitada (Primicias, 2020). En la Figura.1.1 se puede observar la noticia notificada vía Twitter:



Figura 1.1 Reportaje vía twitter de la condición de la vía Macas – Puyo. [Primicias, 2020]

En el presente año el río Upano ha aumentado considerablemente su caudal en consecuencia de las constantes lluvias que se dieron desde el mes de marzo. El aumento del caudal mantuvo en alerta a las autoridades e instituciones tanto nacionales como locales (Morona Santiago). En el mes de mayo, la vía Macas-Puyo (E45) fue cerrada debido a que tramos del puente sobre el río Upano colapsaron afectando seriamente al transporte y también al desarrollo económico de ciudad de Macas (El Telégrafo, 2021). El tramo afectado se encuentra ubicado en el valle del río Upano, y se puede inferir que los estudios geomorfológicos y geológicos de la cuenca del río son insuficientes o no consideran los efectos del cambio climático y las medidas para combatir sus efectos. En la Figura.1.2 se manifiesta nuevamente el Servicio Nacional de Riesgos, vía twitter, sobre los efectos del desbordamiento de este río:



Figura 1.2 Socavamiento a causa del desbordamiento río Upano en mayo 2021. [Diario El Telégrafo, 2021]

1.2 Justificación del problema

El presente proyecto evalúa la geomorfología fluvial del río Upano, es decir, los cambios que ha producido el cauce del río a través del tiempo por efecto de factores climatológicos y antrópicos; y que, por medio de imágenes satelitales se podrá evidenciar lo mencionado, determinando las áreas más expuestas a estas variaciones morfológicas.

Las zonas con mayor exposición servirán como herramienta para diversos gestionamientos de mitigación y una óptima y consolidada planificación territorial por

parte de las entidades municipales y prefecturas provinciales. Además, la información generada permitirá establecer zonas favorables para futuros levantamientos, diseño y construcción de puentes, favoreciendo al desarrollo socioeconómico del lugar, salvaguardando la vida útil de la carretera y la de los habitantes

1.3 Ubicación del área de estudio

El área de estudio corresponde a un tramo de la vía Macas – Puyo del río Upano ubicada a 2,3 km del centro de la ciudad de Macas, provincia de Morona Santiago, centro – sur del Ecuador (Figura 1.3). La cuenca hidrográfica de este río posee una superficie de 3848,8 km², nace en los Andes a una altura de 4000 msnm, su longitud es de aproximadamente 97 km, su lecho varía desde los 500 m hasta los 2 km de ancho y tiene su desembocadura en el río Namangotza. Posee un régimen de alto grado de alimentación pluvial y su lecho pedregoso impide que sea de tipo navegable.

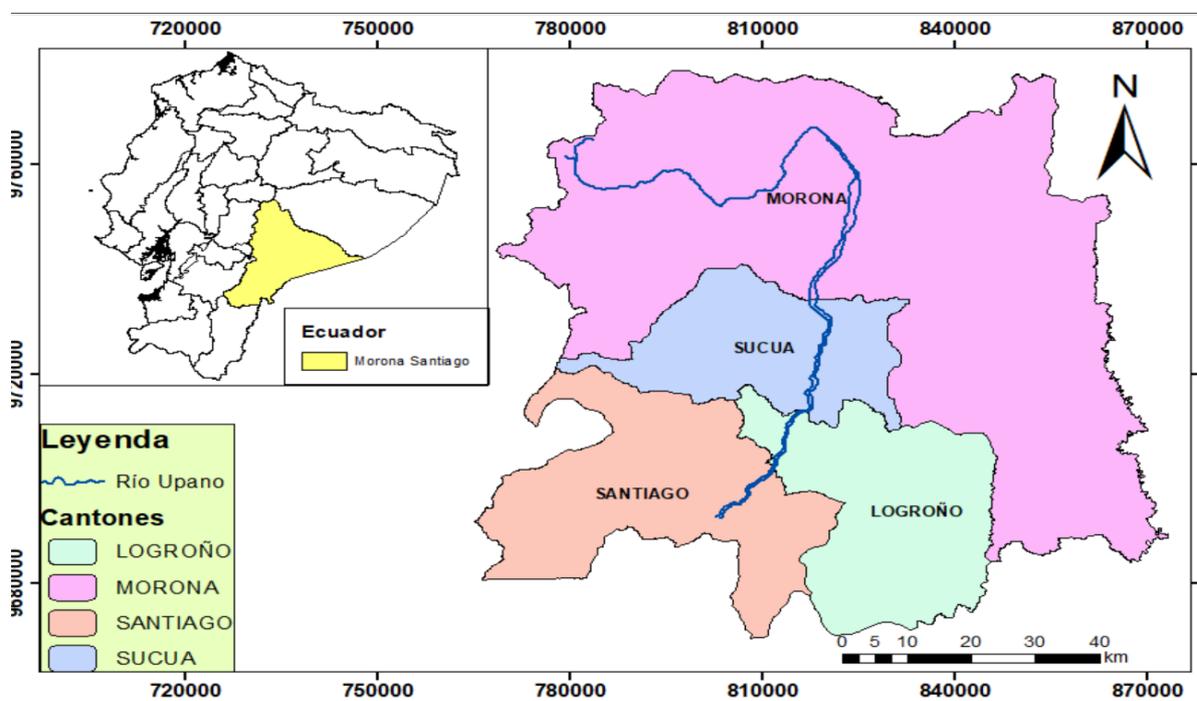


Figura 1.3 Ubicación de la zona de estudio. [Autores]

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Evaluar la dinámica fluvial del río Upano mediante el uso de imágenes satelitales Landsat y Sentinel 2 para la relación de los cambios geomorfológicos con los eventos de inundación en el 2021

1.4.2 Objetivos específicos

- Evaluar la cuenca hidrográfica del río Upano para la caracterización hidrológica y geomorfológica.
- Determinar las variaciones asociadas a procesos de sedimentación/erosión mediante el método “Geomorphic Change Detection” en el perfil longitudinal del cauce principal.
- Realizar análisis multitemporales por medio de teledetección y SIG para la evidencia de cambios geomorfológicos en el lecho del río.
- Definir propuestas que sirvan de herramienta para la gestión integral de inundaciones en el río Upano vía Macas – Puyo.

1.5 Marco teórico

1.5.1 Geología regional

Según las características geológicas y geomorfológicas, el Ecuador está constituido en cinco importantes regiones: 1. El antearco costero, constituido por un basamento de origen oceánico revestido por depósitos de antearco pertenecientes al Paleógeno – Neógeno (Feininger & Bristow, 1980); 2. La Cordillera Occidental [CO], constituida por rocas de carácter ígneo: volcánicas e intrusivas, también posee afinidades geoquímicas de plateau oceánico con presencia de depósitos turbidíticos (Benitez, 1995; Villagomez, 2003); 3. El Valle Interandino [VI], delimitado por las cordilleras Real u Oriental [CR] y la CO, está constituido especialmente por secuencias volcánicas que datan edades del

Plioceno – Pleistoceno recubriendo por completo al basamento (Winkler et al., 2005). Su flanco occidente, está definido por el sistema de falla Calacalí – Pujilí (Hughes & Pilatasig, 2002), parcialmente expuesta a lo largo de la CO; 4. La CR, está conformada por rocas metamórficas con edades del Paleozoico, rocas granitoides y metasedimentarias del Mesozoico (Spikings et al., 2014). La Falla Peltetec separa esta cordillera del VI y es la continuación hacia el sur de la Falla Silvia – Pijao situada en Colombia (Spikings et al., 2014) y 5. La cuenca tras-arco llamada Cuenca Oriente de edad Cretácico tardío – Cuaternario con evolución en el margen de la placa de América del Sur como resultado del crecimiento de la CR (Horton, 2018; Ruiz et al., 2004). La zona Subandina comprende dos grandes eventos de levantamientos de basamento: Levantamiento de Napo al norte, y la compleja estructura de la Cordillera Cutucú al sur, están divididos por la Depresión Pastaza (Legrand et al., 2005). La Cordillera Cutucú esta deformada intensamente por un complejo sistema de fallas inversas. En la Figura.1.4 se observa una representación gráfica de las regiones geológicas del Ecuador:

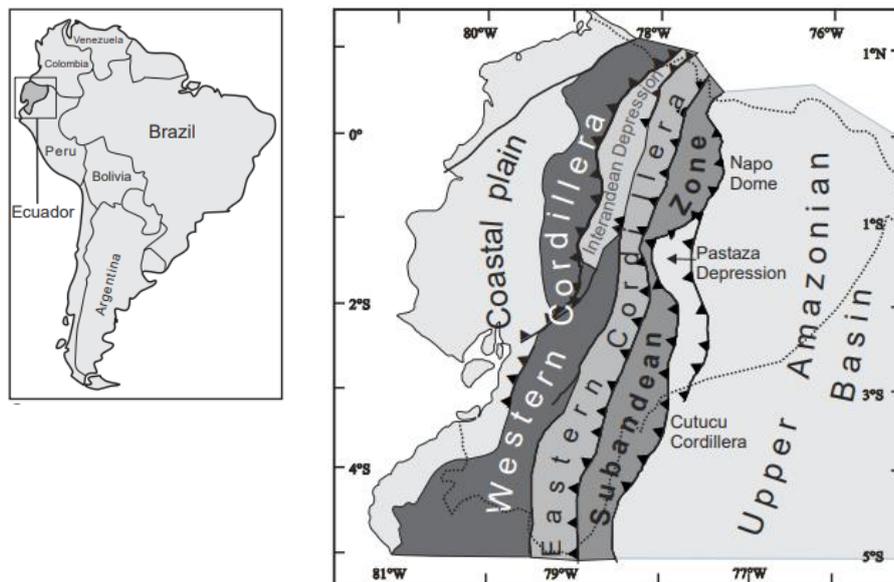


Figura 1.4 Esquema geológico – estructural del Ecuador mostrando sus regiones: Antearco costero, Cordillera Occidental, Valle Interandino, Cordillera Oriental y Cuenca Oriente, respectivamente. [Berc et al., 2005]

La Zona Subandina representa el cinturón de pliegues y cabalgamientos frontal, una región transicional, separando la CR y la Cuenca Oriente [OB]. Esta zona abarca estructuras finas y gruesas cubiertas por depósitos de cima acuñados pertenecientes a la OB (Baby et al., 2013; Ruiz et al., 2007). La transición Subandina a Oriente es importante para comprender la procedencia sedimentaria y la evolución de la cuenca tras-arco y el avance progresivo de nuevas regiones durante el crecimiento orogénico de la cuña (Gutiérrez et al., 2019).

La Cuenca Oriente es una cuenca tras-arco activa que evolucionó como producto de la subsidencia por flexión inducida debido al engrosamiento de la corteza Andina. Lindera con la cuenca Putumayo al sur de Colombia y con la cuenca Santiago – Marañón al norte de Perú; acumula los productos de la denudación andina y la incorporación gradual de nuevas regiones fuente durante la invasión de cabalgamientos (Martin-Gombojav & Winkler, 2008; McGroder et al., 2015; Ruiz et al., 2007; Wolaver et al., 2015). Contiene aproximadamente 4.5 km de depósitos clásticos. La sucesión Cretácico – Cenozoica recubre flujos de lavas basáltica a riolítica, depósitos piroclásticos de la Fm. Misahuallí al oeste y depósitos clásticos tobáceos y no marinos de la Fm. Chapiza al este (Romeuf et al., 1995). Esta sección volcanoclástica presenta espesores hasta los 600 m, está cubierta discordantemente por la Fm. Hollín comprendiendo 150 m depósitos de marea fluvial a marino de arenisca cuarzosa y capas esporádicas de carbón que indican el comienzo de las condiciones marinas a largo plazo (Baby et al., 2014; Dashwood & Abbotts, 1990; Tschopp, 1953). El Grupo Napo de edad del Cretácico Superior incluye secuencias transgresivas de arenisca marina poco profunda, calizas y lutitas ricas en materia orgánica (Gutiérrez et al., 2019). Una discordancia separa al Grupo Napo marino de la Fm. Tena no marina de edad Maastrichtiano – Paleoceno, la cual está constituida por 750 m de red fluvial de limolitas intercaladas con arenisca limosa (Dashwood & Abbotts, 1990; Toro & Jaillard, 2005; Tschopp, 1953). Este cambio brusco en la depositación expone condiciones diferentes de la cuenca y fuentes de sedimentos para la Fm. Tena, definiendo una transición a las condiciones de la cuenca de antearco (Baby et al., 2014; Horton, 2018; Jaillard & Soler, 1996; Martin-Gombojav & Winkler, 2008; Ruiz

et al., 2007; Toro & Jaillard, 2005). Sobre la Fm. Tena, se encuentra la Fm. Tiyuyacu del Paleoceno – Eoceno, de grano grueso y con espesores de 200 – 800 m (Baby et al., 2013; Christophoul et al., 2002)

Dentro del Cuaternario, se crea un vasto abanico que se abre hacia el este en la depresión Napo – Pastaza, que se fragmentan en una configuración de tipo mesas escalonadas bajando de manera gradual desde la cumbre de los Andes hasta la llanura de la Amazonía; notable presencia de dos volcanes, el Reventador situándose hacia el flanco de la CR y el Sumaco que atraviesa el domo del Napo (CONGOPE & BID, 2019).

1.5.2 Geología local

El valle del Upano está constituido por sedimentos producto de rocas volcánicas, específicamente andesitas y basaltos, con presencia de suelos de carácter sedimentario sobre cenizas recientes y antiguas con altos porcentajes de aluminio y potasio (Rostain, 2012).

Localmente, el área de estudio se localiza sobre el valle del Upano que separa la CR al oeste y la cordillera Cutucú al este. Dentro del marco geológico de la zona Subandina presenta estructuras dominantes con dirección norte a sur perteneciendo al Levantamientos Napo y cordillera Cutucú separados por la Depresión Pastaza y la cordillera del Cóndor (Legrand et al., 2005). El constante movimiento entre placas tectónicas da indicios de alta actividad sísmica y volcánica. Constituida por sedimentos de edades del Cretácico Superior al Cuaternario, siendo estos, depósitos volcánicos, fluviales y lahares procedentes del Volcán Sangay (Tapia, 2019). En la Figura 1.5 se observa la geología regional de Macas según Legrand et al. (2005):

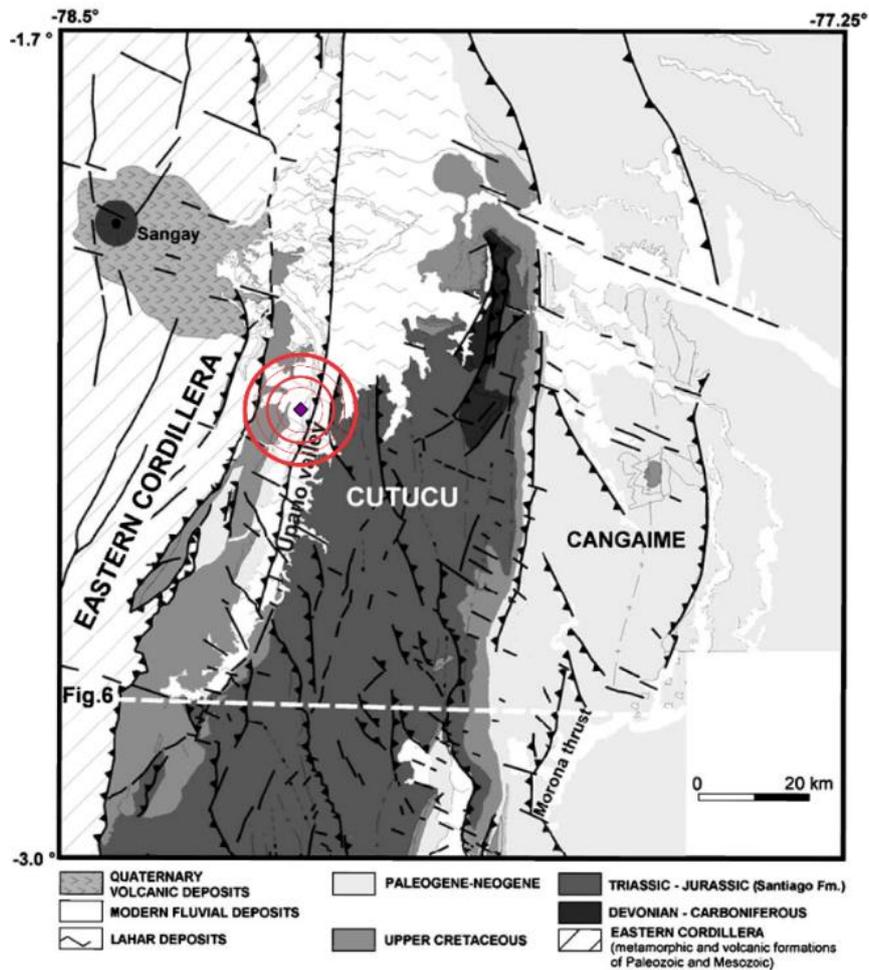


Figura 1.5 Mapa Geológico de la Región Macas. [Legrand et al., 2005]

Las formaciones que afloran dentro de la zona de interés generalmente son: Fm. Mera, Fm. Mesa, Fm. Tena, Fm. Napo y la Unidad Upano.

1.5.2.1 Formación Mera

Conformada de jóvenes terrazas, depósitos del Cuaternario tales como abanicos de piedemonte, arcillas y areniscas tobáceas referentes a la última eventualidad de levantamiento y fallamiento. Al oriente, los sedimentos que constituyen las terrazas varían de espesor, disminuyendo de tamaño de grano y poca altitud (Núñez, 2003).

1.5.2.2 Formación Mesa

Constituida por altas terrazas con edades del Plioceno – Pleistoceno e intercalaciones de arcillas y areniscas tobáceas. Presenta capas de conglomerados de mayor grosor con estratificación cruzada. La formación Rotuno se la considera dentro de esta debido que tiene forma de mesa fuertemente dislocada. Situada sobre la unidad Chambira y recubierta por sedimentos de la Fm. Mera (Núñez, 2003).

1.5.2.3 Formación Tena

De edad del Maastrichtiano – Paleoceno. Las conforman arcillas abigarradas de tonalidades rojas – marrones, mostradas en superficie de ese color debido a su exposición en superficie y, de color gris – verdosas en profundidad. Contiene también, lutitas y limolitas con cierto carácter calcáreo, areniscas cuarzosas situadas en la base y en tope; presencia de margas y calizas arenosas en menor cantidad (piritosas). De ambiente deposicional continental con incursiones marina (Núñez, 2003).

No hay evidencia suficiente para hablar de discordancia angular entre las Fm. Tena y Napo, pero está presente un hiato sedimentario en medio producto de la erosión en la parte más superior de la Fm. Napo (Faucher et al., 1975). Con potencia diversa, en aumento de norte a sur, 400 a 600 m (Núñez, 2003).

1.5.2.4 Formación Hollín

De edad del Aptiano Medio – Albiano Medio. Compuesta por areniscas blancas y lutitas, porosidad alta, granulometría variable, con apariencia sacaroidal, existe estratificación cruzado y ripple marks. Procede de un ambiente deposicional continental, fluvial en la base y estuarino en el tope (Núñez, 2003). Se la ha separado en tres miembros:

- **Miembro Inferior**, contacto gradacional normal en presencia de areniscas gruesas.

- **Miembro Medio**, consiste en limo – arcillosos con materia orgánica.
- **Miembro Superior**, lo conforman areniscas glauconíticas con intercalación de lutitas negras.

1.5.2.5 Formación Napo

De edad del Albiano Inferior – Campaniano Inferior. Aflora longitudinalmente al este de la cordillera Cutucú. La conforman sucesiones de lutitas negras, calizas grises a negras y areniscas calcáreas. Con espesores variables de 200 – 700 m. Su ambiente deposicional es marino (Baldock, 1982). Dividida en cuatro miembros:

- **Napo Basal**, conformada por intercalaciones de areniscas – lutitas – calizas.
- **Napo Inferior**, la conforman areniscas, lutitas, margas y en menor cantidad calizas con espesores medianos de 60 a 250 m.
- **Napo Medio**, comprenden calizas grises de estratificadas y masivas de espesores de 75 – 90 m.
- **Napo Superior**, sucesión de argilitas de color oscuro, duras, lutitas grises – verdosas con intercalaciones de calizas y areniscas, sus espesores van de 0 – 320 m aproximadamente.

1.5.2.6 Unidad Upano

De edad del Jurásico. Constituida meta andesitas, grauvacas, esquistos gráficos y pelíticos. Perteneciente a la División Salado, que abarca esquistos verdosos y rocas meta volcánicas relacionadas a las de la Fm. Misahuallí (Litherland et al., 1994).

1.5.3 Clima y precipitación

El clima que prevalece durante todo el año es el muy húmedo subtropical ya que posee temperaturas anuales que van desde 18 a 22,8 °C, recolectando una precipitación media

anual de 2000 a 3000 mm, siendo los meses marzo, abril, septiembre y octubre los que presentan mayor precipitación.

1.5.4 Sistema Fluvial

1.5.4.1 Concepto de sistema.

La idea de un sistema se encuentra asociada a la Teoría General de Sistemas (TSG), fue introducida por Ludwig Von Bertalanffy antes de la existencia de ciencias como la cibernética, ingeniería de sistemas y otras ciencias relacionadas. Se desarrolló como contraparte de la visión mecanicista de la física clásica que buscaba resolver fenómenos dentro de determinadas unidades elementales gobernadas por “invisibles” leyes de la naturaleza. La TSG por tanto se enfoca en el estudio de las partes y la interacción dinámica de cada una sobre la otra, esto permite el desarrollo de principios unificadores, que lleva a la meta de la unidad de la ciencia (Bertalanffy, 1968).

Respecto a lo anterior, se puede definir a un sistema como un conjunto de subsistemas cuyas variaciones resultarían en variaciones sobre los demás, así como en el conjunto, adicional a esto existen respuestas a estas alteraciones lo que produce un ajuste constante y continuo denominado equilibrio dinámico (Church, 2002; Conesa, 1999; Parsons et al., 2009).

1.5.4.2 El río como sistema.

Existe gran variedad de definiciones de río y cada una ligada a diferentes disciplinas, todas ellas imprescindible para su correcta comprensión (Margalef, 1978), según Muñoz, (2009), se puede definir a un río como un sistema de procedencia natural, variante en tiempo y espacio, que se encuentra dominada por una determinada geología y geomorfología, uno o varios cauces tanto superficiales como subterráneos y la interconexión longitudinal y transversal con los diferentes ecosistemas que lo rodean, ya

sea este, natural o antrópico y es también el origen de recursos bióticos, abióticos y culturales.

En palabras sencillas un río es un sistema natural complejo y dinámico que lleva agua, sedimentos y sustrato como parte de su labor. Un río es ante todo dinámica pura, acción y constante cambio (Ollero et al., 2011).

Además Ollero & Sánchez, (2007) definen hidrosistema fluvial a un complejo sistema que se compone de cuatro dimensiones que interactúan entre sí:

- **Dimensión longitudinal.** Hace referencia al gradiente topográfico del río analizando desde aguas arriba (máxima pendiente) a aguas abajo (desembocadura), siguiendo las corrientes hídricas.
- **Dimensión transversal.** Encierra todos aquellos ecosistemas que conforman el sistema fluvial: ríos principales a secundarios, brazos abandonados, llanura aluvial, llanura de inundación, etc.
- **Dimensión vertical.** Comprende aquellos ecosistemas que influenciados por la dinámica fluvial resulta en la estratificación de estos en superficie, manteniendo un sinnúmero de interacciones energéticas con las aguas subterráneas.
- **Dimensión temporal.** Remarca todos aquellos cambios que se dan en todos los niveles y pueden ser tanto de origen natural como por actividad del hombre.

1.5.4.3 Clasificación de ríos.

Históricamente ha existido muchos intentos de clasificar ríos, sin embargo, esta dependerá del punto de vista del investigador y de la variable que se considere la más importante, Leopold & Wolman, (1970), basándose en el criterio de la sinuosidad y multiplicidad de canal clasificaron en: Braided (trenzado), Recto y Meándrico a los ríos. Investigadores posteriores agregaron un tercer criterio, el tamaño de grano, añadiendo una cuarta clasificación, denominándose Anastomosado.

- **Braided (Trenzado).** Los ríos trezados consisten en un número de canales separados por islas de gravas que tienden a ser muy móviles, debido a las altas cargas de transporte de carga (Petts & Amoros, 1996), el patrón de trezado es una de las muchas condiciones que un río puede establecerse a sí mismo como resultado del ajuste de una serie de variables y conjunto de controles independientes (Leopold & Wolman, 1970).
- **Recto.** Son ríos con una fuerte estabilidad, se debe principalmente a que los finos sedimentos forman barras estables, permitiendo el mantenimiento de canales rectos, estrechos y profundos (Schumm, 2005). Los canales verdaderamente rectos son tan raros entre los ríos como inexistente (Leopold & Wolman, 1970).
- **Meándricos.** Son canales de un solo hilo que se abren paso valle abajo a través de una serie de arcos de curvas, volviéndose cada vez más sinuoso (Petts & Amoros, 1996). El material transportado usualmente es arena y limo.
- **Anastomosado.** Se identificó inicialmente como una clase transicional de “ríos de grava” que se caracteriza por poseer una sinuosidad baja a media y características combinadas de ríos meándricos y trezados con canales anchos y poco profundos, flanqueados y dividido localmente por barras de grava, o en su defecto canales angostos de energía estable que se dividen y luego, río abajo, vuelven a unirse. Además, se asocian con el hundimiento de cuencas sedimentarias (Petts & Amoros, 1996).

La clasificación según Rosgen, (1994) describe tramos de ríos morfológicamente similares que se dividen en 7 categorías principales de tipos de cauces que difieren en pendiente, relación ancho/profundidad y sinuosidad en varios accidentes geográficos que se muestran en la Figura 1.6 con los respectivos criterios descritos en la tabla 1.1.

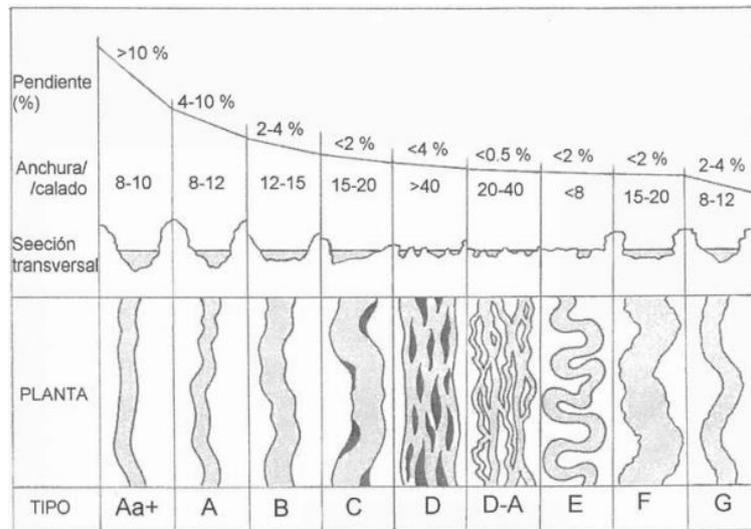


Figura 1.6 Clasificación de patrones de canales
[Rosgen, 1996]

Tabla 1.1 Criterios para clasificación de ríos. Modificada de [Rosgen, 1994]

Tipos de río	Descripción General	Relación W/D	Sinuosidad	Pendiente	Características
Aa+	Escombros muy empinados, profundamente arraigados. corrientes de transporte de escombros.	<12	1 - 1,1	>0,10	Relieve muy alto. Suelo erosional, lecho rocoso. Potencial flujo de escombros.
A	Empinado, ríos en escalón/piscina. Transporte de alta energía	<12	1 - 1,2	0,04 - 0,10	Relieve alto. Suelo erosional o deposicional, formas de lecho rocoso.
B	Pendiente moderada, con piscinas poco espaciadas. Bancos estables.	>12	>1,2	0,02 - 0,039	Relieve moderado. Deposición coluvial y/o suelos residuales. Valles estrechos y de suave pendiente.
C	Pendiente baja. Canales aluviales con llanuras aluviales amplias y bien definidas	>12	>1,4	<0,02	Amplios valles con terrazas, asociado con llanuras aluviales. Canal meándrico bien definido.
D	Canal trenzado con barras longitudinales y transversales. Canal muy ancho con bancos en erosión.	>40	n/a	<0,04	Valles amplios con abanicos aluviales y coluviales. Escombros glaciales. Abundante suministro de sedimentos.
DA	Anastomosis (multicanales). Estrecho y profundo. Relieve delicado con sinuosidades variables.	<40	variable	<0,005	Valles amplios, de baja pendiente con aluvión fino y/o suelos lacustres. Anastomosado. Barras.
E	Poca pendiente, canal meándrico riffle/pool con baja relación ancho/profundidad y poca depostación.	<12	>1,5	<0,02	Amplios valle/prado. Materiales aluviales. Muy sinuoso. Bancos vegetados. Morfología de riffle-pool. W/D baja.
F	Canal meándrico riffle/pool. Baja pendiente con alta relación ancho/profundidad..	>12	>1,4	<0,02	Arraigado en material muy degradado. Alta relación W/D. Meándrico. Inestable con altas tasas de erosión de riberas.
G	Poca pendiente, canal meándrico riffle/pool con baja relación ancho/profundidad y poca depostación.	<12	>1,2	0,02 - 0,039	Morfología Gully, step-pool. Pendiente moderada. Baja relación W/D. Valles estrechos o profundos. Inestable.

1.5.4.4 Geometría de meandros.

Existen dos propiedades geométricas importantes de los meandros y afectan directamente la dinámica de flujo de sedimentos en canales curvos:

- **Radio de curvatura (r_c)**

Se lo define como el radio de un círculo dibujado alrededor de la curva de un meandro (Figura 1.7), por lo que expresa el grado de rigidez de una curva específica, el radio de este círculo se lo denomina radio de curvatura r_c (Robert, 2003).

- **Sinuosidad (s)**

Robert, (2003), define a la sinuosidad como al grado de meandrización de un canal y, al contrario del radio de curvatura, indica cuan flexible es un canal, se puede obtener su valor con la siguiente expresión:

$$s = \frac{L}{l}$$

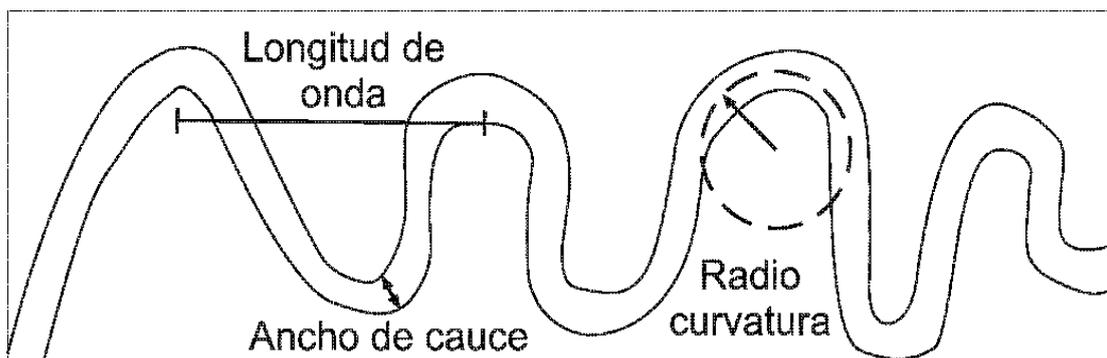


Figura 1.7 Geometría de meandros [J. H. García, 2014]

1.5.5 La geomorfología dentro del sistema fluvial.

La geomorfología tiene un papel fundamental en el medio ambiente fluvial, no se enfoca en realizar solo un análisis descriptivo, sino que al emplearse correctamente puede constituir una poderosa herramienta de diagnóstico del estado del sistema fluvial (Ollero et al., 2011). Un sistema fluvial funciona mediante una relación jerárquica de dominio, con variables dependiente e independientes definidas dentro de las escalas temporal/espacial, incluyéndose aquí también componentes importantes como el clima y geología estructural: litología y tectónica (Figura 1.8).

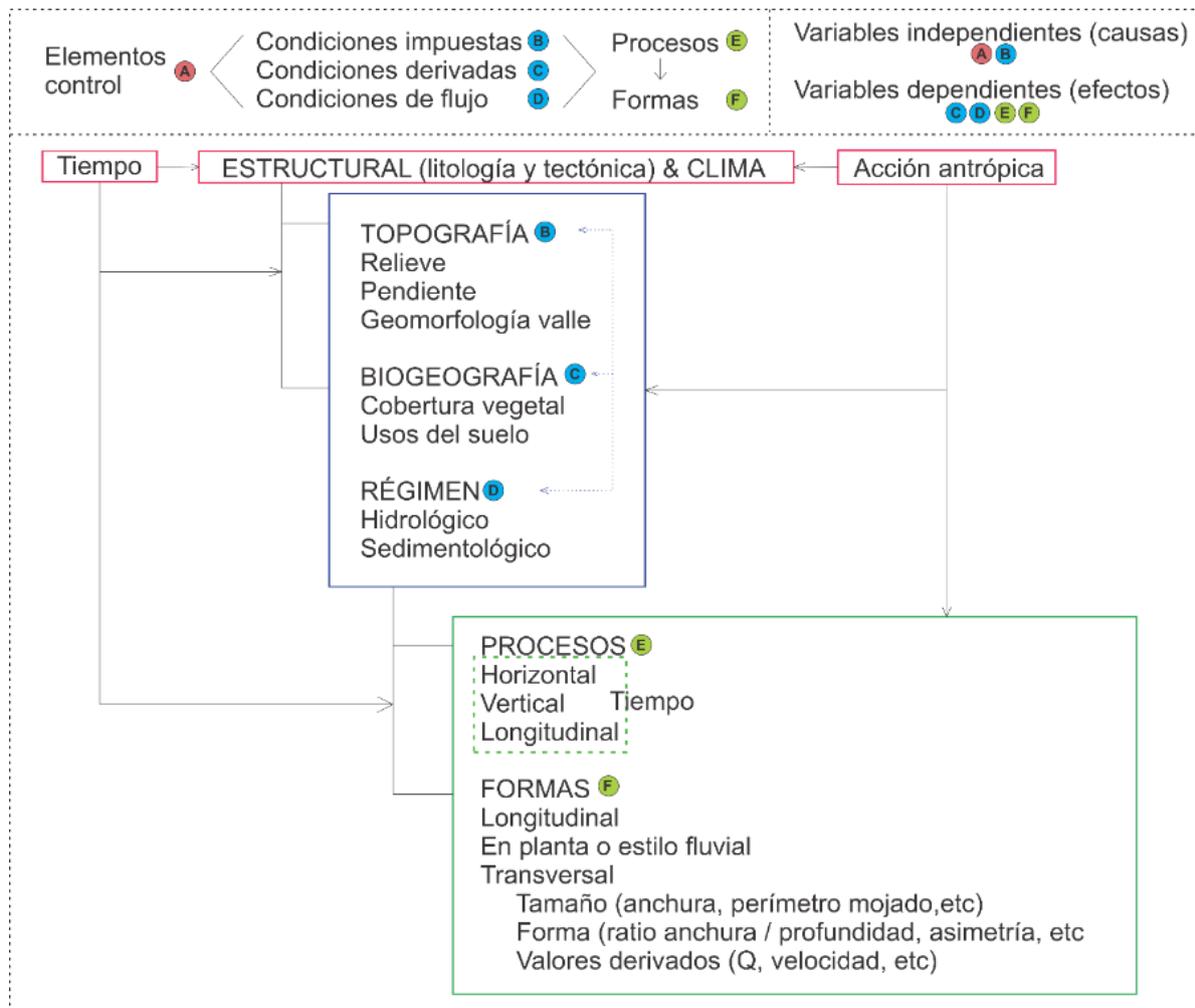


Figura 1.8 Geomorfología aplicada a estudio de sistemas fluviales [García, 2014]

Durante el proceso geomorfológico, el comportamiento caótico de las variables debe ser tal que las perturbaciones sean absorbidas y compensadas de modo que el sistema se mantenga sano y equilibrado.

1.5.5.1 Concepto de escalas espacial – temporal en la geomorfología fluvial.

La idea fundamental sobre las variables geomorfológicas en el contexto espacio – tiempo es el análisis de aquellos eventos que afectan directamente el comportamiento del sistema fluvial, estudiando desde los procesos más locales y efímeros hasta los más regionales y duraderos (Figura 1.9).

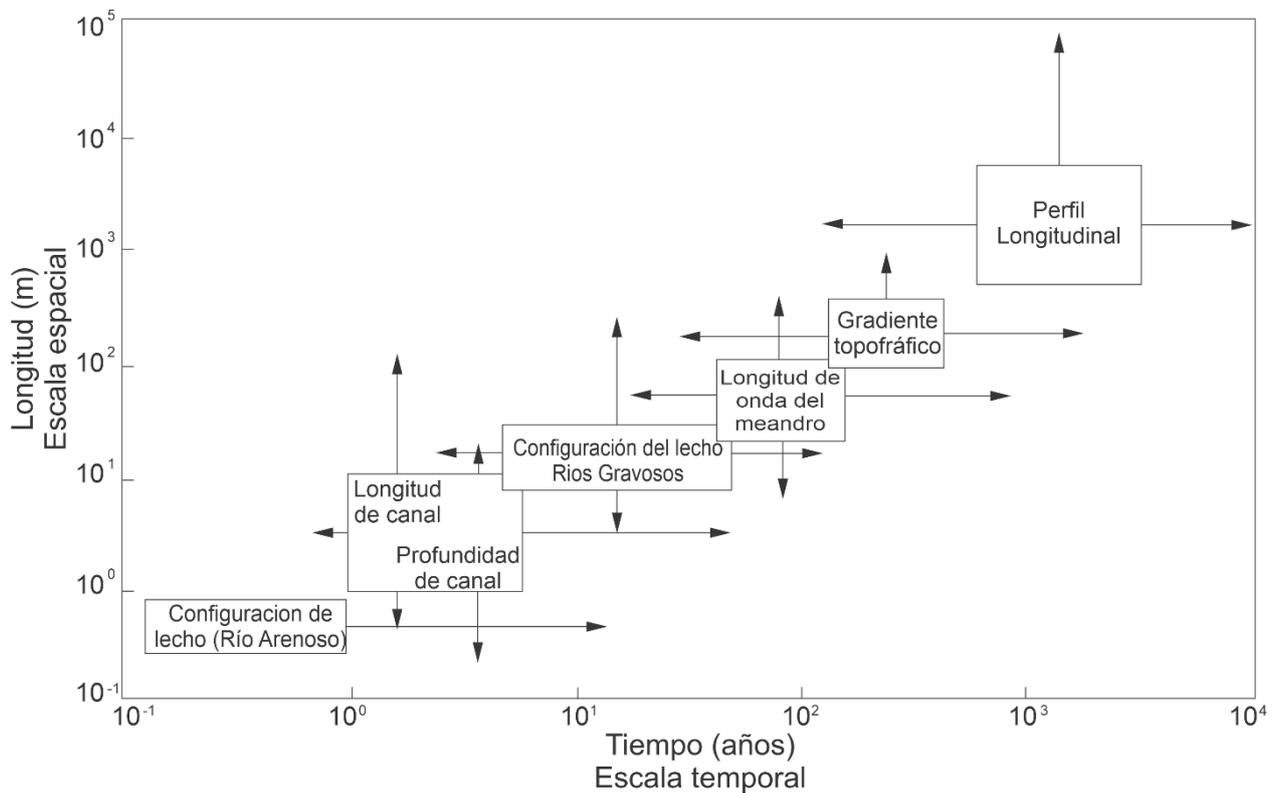


Figura 1.9 Variables morfológicas del sistema fluvial definidas en la escala espaciotemporal. [Stevaux & Latrubesse, 2017]

Este análisis es indispensable para determinar períodos de retorno de eventos, además existen eventos caóticos de gran magnitud que poseen la capacidad de transformar

drásticamente el sistema, sin embargo, la frecuencia de ocurrencia es baja, por el contrario, existen eventos de menor magnitud y alta frecuencia, y estos se encargan de la dinámica y mantenimiento del sistema (Stevaux & Latrubesse, 2017). Es evidente por tanto la existencia de la relación bilateral entre espacio y tiempo.

1.5.5.2 Erosión y depositación.

Se entiende por erosión a la acción de agentes móviles (agua, viento, glaciares) que liberan y transportan material consecuencia de la meteorización y de la misma sedimentación, ocasionando pérdida de componentes de la corteza terrestre. El agua es el agente geomorfológico erosivo más trascendental, debido a que el área que afecta es muy extensa y también a su gran intensidad de desgaste de la superficie a largo plazo (Villota, 2005).

Dentro de los procesos que ocurren en un canal, la erosión y depositación tienen un papel primordial, puesto que, la interacción del flujo de agua y el flujo de sedimentos, provoca la modificación de las condiciones morfológicas (cambios de ubicación espacial y morfología del propio canal en el tiempo) (Alekseevskiy et al., 2008).

Según Suarez, (1998) la erosión fluvial puede ser descrita como un fenómeno producido por energía hidráulica, que trabajan las partículas del suelo o roca ocasionando el desprendimiento y transporte de estas por acción del agua en movimiento; la sedimentación es el resultado de la depositación de estas partículas talud abajo. En los ríos meándricos la erosión y sedimentación ocurre en las orillas del cauce, presentándose sedimentación en la parte interna y erosión en la externa (representa el valor máximo de erosión en el punto de inflexión exterior del meandro) (Figura 1.10).

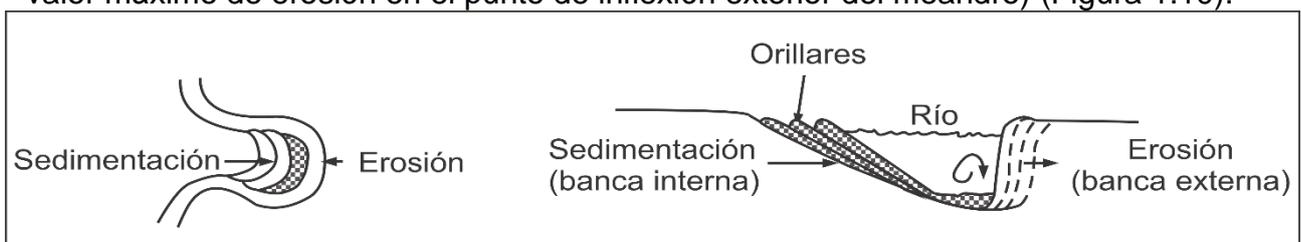


Figura 1.10 Erosión y sedimentación en ríos meándricos. [Villota, 2005]

1.5.5.2.1 Socavación en puentes

La socavación es un proceso que resulta de las variaciones del cauce de una corriente en profundidad a consecuencia de fenómenos antrópicos y no antrópicos, es decir, el ascenso del nivel de agua que, implica el desbordamiento de estas a causa de las fuertes precipitaciones, modifica la morfología del lecho dentro de un determinado entorno, el uso indebido del suelo (agricultura, minería ilegal) u obras construidas en o cerca del cauce como puentes, carreteras, muros, etc. (Ramírez & Pardo, 2018).

La presencia de fenómenos naturales, a través del perfil longitudinal del cauce logran modificar su geometría. En el momento que hay un aumento de las aguas del lecho, este, produce una turbulencia mayor intensificando el arrastre de sedimentos generando una cantidad mayor de sedimentos transportados. Luego de descender a niveles normales el caudal, ocurre la depositación de sedimentos en el fondo presentando variaciones en ciertos tramos debido a que fueron afectados por el cambio del nivel del cauce (Toapaxi et al., 2015).

Los problemas que acarrear las crecidas del cauce que se asocian a puentes son las socavaciones alrededor de pilas y estribos generando en la mayoría de los casos su colapso (Toapaxi et al., 2015)

Según Toapaxi et al. (2015), los parámetros que inciden en las socavaciones de un río son de procedencia geomorfológica, hidrológica, hidráulica y sedimentológica:

- Geomorfológica: presencia de vegetación y tipo de suelo, ancho del lecho, geografía del río y topografía.
- Hidrológica: representa a la pluviosidad, las veces en las que ocurren crecidas y el tiempo que esta dura.
- Hidráulica: factores como el calado, viscosidad, caudal y velocidades del río.
- Sedimentológicas: representan el tipo de sedimento, las variaciones del tamaño del grano y que tan sólido es el caudal.

1.5.5.2 Influencia de las erupciones volcánicas.

Las erupciones volcánicas tienen un papel importante en lo que concierne la dinámica de sistemas fluviales ya que son aportadoras de grandes volúmenes de productos volcánicos, rocas y sedimentos fragmentados que provocan las modificaciones en la morfología de estos. Debido a la liberación de estos productos, se generan perturbaciones naturales tales como: caída de tefra, sólidas corrientes de piroclastos, lahares y flujos piroclásticos que tienen una fuerte incidencia en la calidad de agua y en la depositación de sedimentos (Zingaretti, 2019) provocando que el río se acomode a través de la reelaboración de depósitos fluviales dando lugar a la supresión de islas, barras vegetación existente en las llanuras de inundación (Swanson et al., 2013). La reacción hidro-geomorfológica de los corredores fluviales alcanzan a mantenerse en el tiempo representando un peligro posteriormente a la erupción (Zingaretti, 2019).

1.5.5.3 Barras.

Las barras son propias de los canales aluviales y se encuentran siempre presente en el mismo, representan zonas de almacenamiento temporal de sedimentos en ciertas localidades del canal (Figura 1.10). Su ubicación, tamaño y textura dependerá específicamente con la geometría en planta del canal. El tamaño de la carga, la capacidad de la corriente para transportarlo, y la estabilidad relativa de los bancos de canal son factores clave en la identificación de los patrones de canal y factores de control (Robert, 2003).

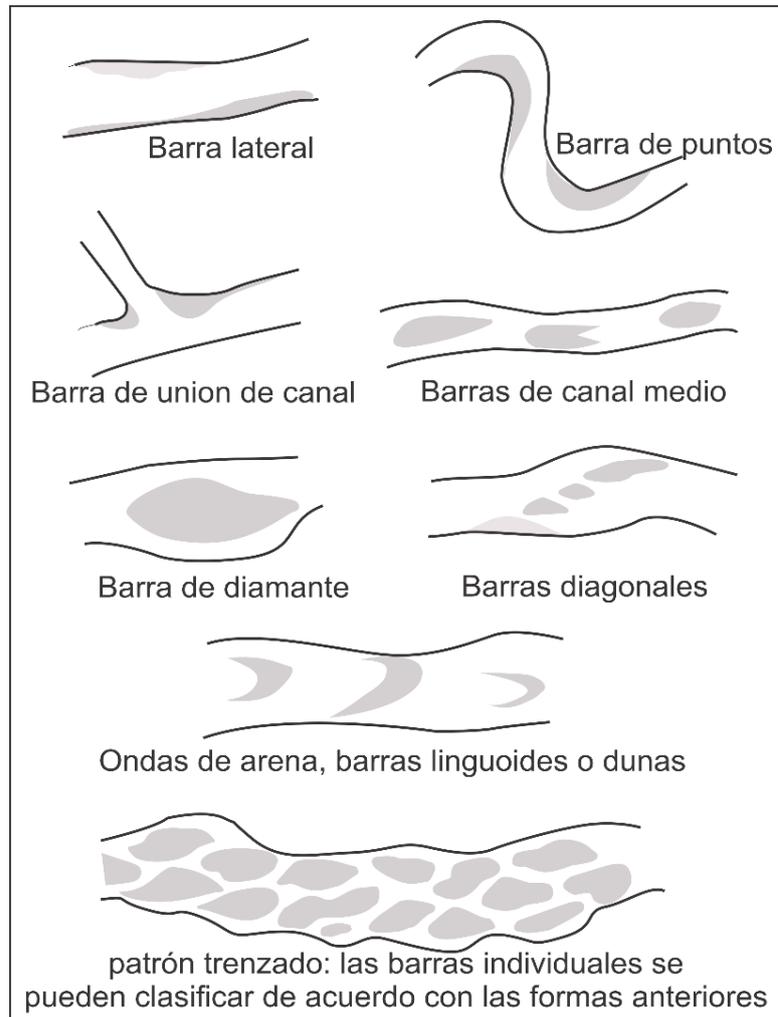


Figura 1.11 Almacenamiento de sedimentos en estructuras de barras [Robert, 2003]

1.5.6 Cuencas hidrográficas.

González & Mirabetty, (2015), definen a una cuenca hidrográfica como un área determinada de terreno que recibe precipitación y que además es un medio de transporte de esta, hasta un punto de salida del cauce principal.

Horton, (1932), clasifica en 5 los factores que describen una cuenca de drenaje en relación con su hidrología y son:

- i. **Morfológico**: dependen solo de la topografía de la superficie en el que se encuentra la cuenca de drenaje y en la forma y extensión del cauce.
- ii. **Factores del suelo**: incluye factores descriptivos de los materiales que forman la base de la cuenca de drenaje, incluyendo todas las propiedades físicas relacionadas al suelo.
- iii. **Factores geológico – estructurales**: guarda relación con la profundidad y características de las rocas subyacentes y la naturaleza de las estructuras geológicas que se relacionen con las condiciones de aguas subterráneas.
- iv. **Vegetación**: depende de la vegetación parcial o total, natural o cultivada dentro de la cuenca hidrográfica.
- v. **Factores climáticos – hidrológicos**: incluyen temperatura, humedad, lluvia y evaporación y son factores que dependen del ciclo hidrológico del agua.

1.5.6.1 Zonificación de cuencas hidrográficas.

Robert, (2003) asocia la disminución en el gradiente del canal con la disminución del tamaño de partícula, aumento en el tamaño del caudal y aumento de almacenamiento de sedimentos (Figura 1.8). Maldonado, (2016) por su parte, separa en tres las zonas geomorfológicas básicas:

- **Zona 1.** Corresponde a la parte más elevada del cauce, presenta un gran tamaño de grano, el cual es erosionado y transportado por la corriente aguas abajo.
- **Zona 2.** Esta es considerada de transición, con un tamaño de grano medio, y si bien, existe erosión, no es tan agresiva como en la zona anterior, los sedimentos siguen su camino aguas abajo.
- **Zona 3.** Al ser la parte de menor pendiente del sistema, los sedimentos resultantes de la erosión en las zonas 1 y 2 son depositados, la velocidad del cauce disminuye al mínimo en esta zona.

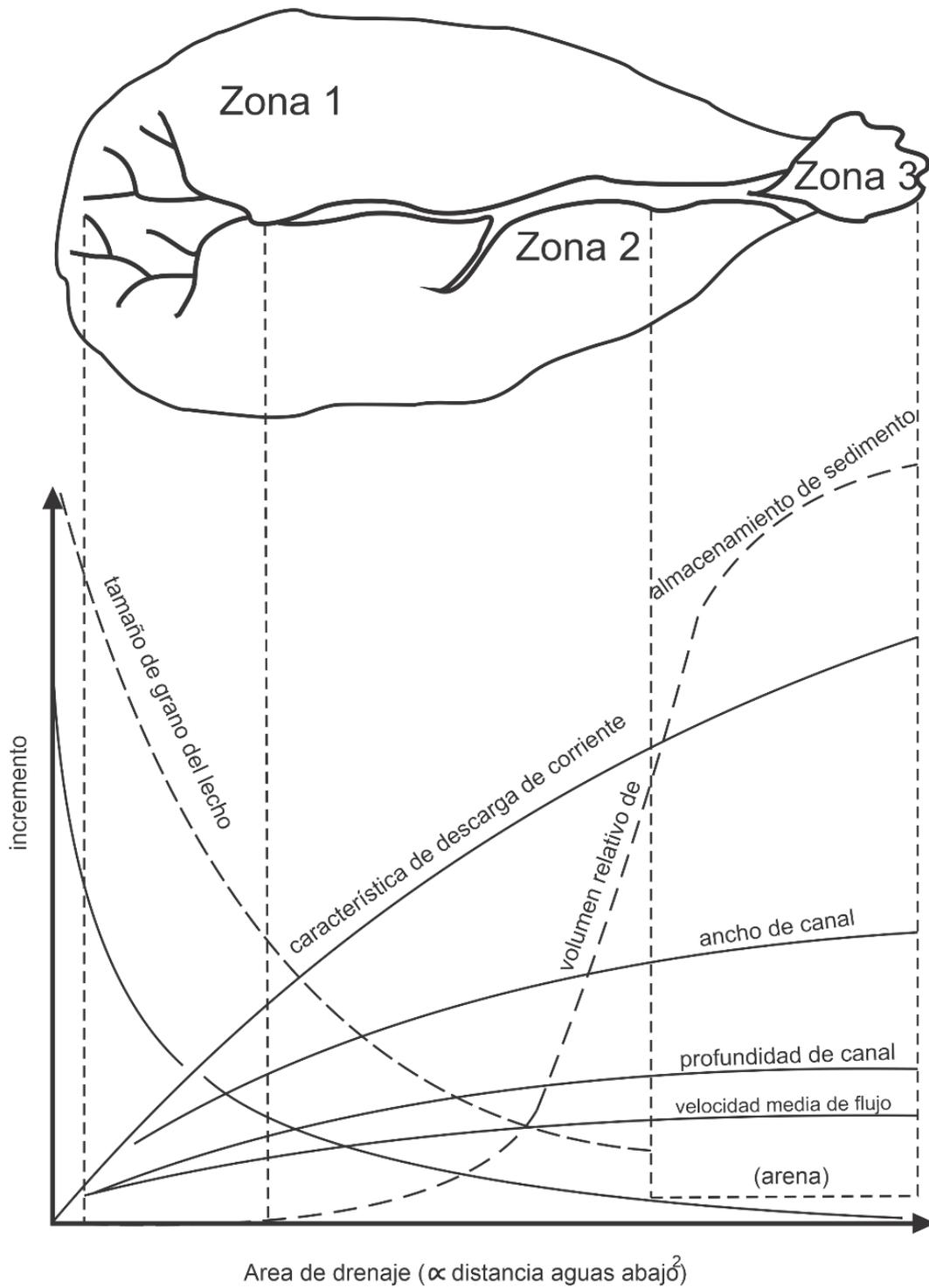


Figura 1.12 Representación esquemática de la variación de propiedades de un canal dentro de una cuenca de drenaje. [Robert, 2003]

1.5.6.2 Clasificación de cuencas hidrográficas.

1.5.6.2.1 Según el sistema de evacuación de agua.

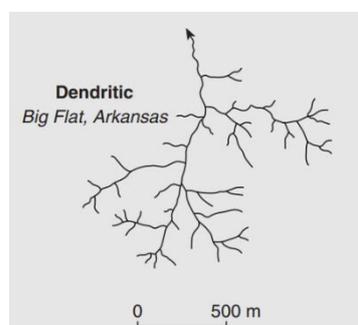
Ibáñez et al., (2013) clasifica a las cuencas de acuerdo con la zona de desagüe de las aguas en:

- *Arreicas*: denominada inactiva debido a que no poseen desembocadura en ningún sitio; el agua por acción de la energía solar se evapora o se infiltra antes de llegar al mar o un lago.
- *Endorreica*: denominada cerrada, ya que su agua tiene desembocadura en cualquier masa de agua sin entrar en contacto con el mar.
- *Exorreica*: llamada también abierta, al contrario del caso anterior tienen desagüe en mares o vertientes oceánicas.

1.5.6.2.2 En base al patrón de drenaje.

Charlton, (2008), clasifica a las cuencas de acuerdo con el transporte del agua y sedimentos desde las laderas a la salida de la cuenca a través de los siguientes patrones de drenaje:

- *Dendrítico*: Poseen un patrón aleatorio y controles geológicos débiles (Figura 1.13).



**Figura 1.13 Patrón de drenaje dendrítico
[Charlton, 2008]**

- *Paralelo*: Se caracteriza por poseer un buzamiento regional fuerte (Figura 1.14).

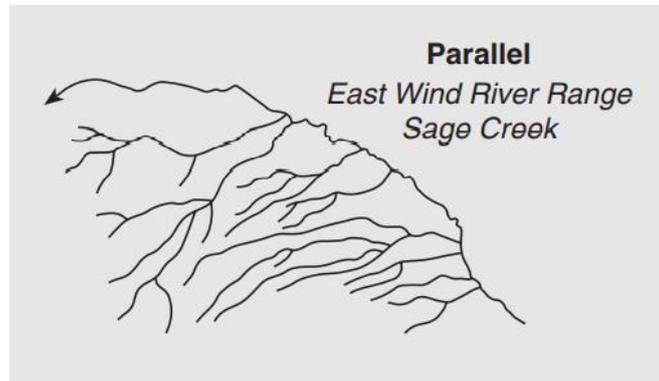


Figura 1.14 Patrón de drenaje paralelo.
[Charlton, 2008]

- *Trellis*: también existe fuerte buzamiento regional, sin embargo, los controles estructurales juegan un papel predominante aquí (Figura 1.15).

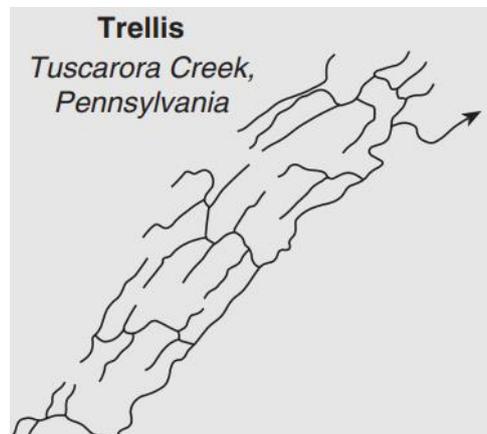


Figura 1.15 Patrón de drenaje Trellis
[Charlton, 2008]

- *Rectangular*: Se forma cuando dos conjuntos de controles estructurales se ejecutan entre sí en ángulos rectos, desarrollándose el típico patrón rectangular (Figura 1. 16)

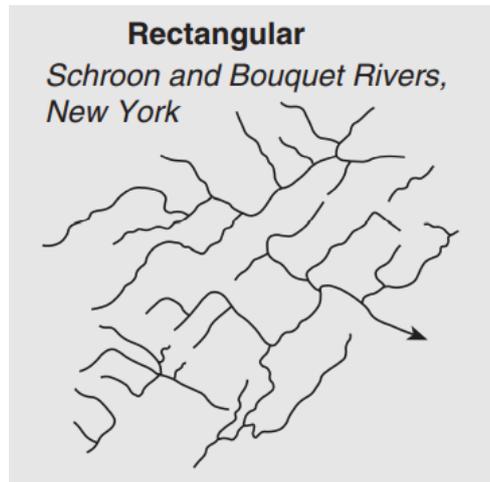


Figura 1.16 Patrón de drenaje rectangular [Charlton, 2008]

- *Radial*: se desarrolla como consecuencia de procesos erosivos simétricos alrededor de domos levantados o volcanes (Figura 1.17).

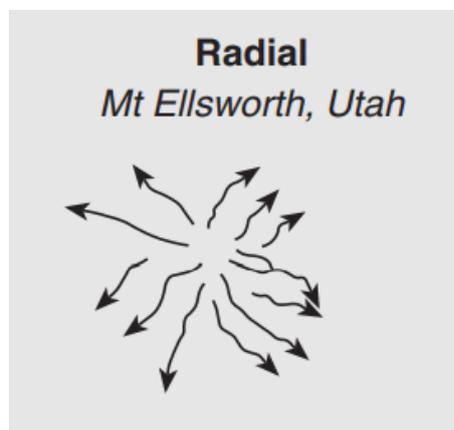


Figura 1.17 Patrón de drenaje radial [Charlton, 2008]

1.5.6.3 Análisis de cuenca de drenaje.

Volonté, (2017), afirma que los parámetros asociados a una cuenca de drenaje sirven para realizar una caracterización del ambiente geomorfológico de la cuenca, permitiendo subjetividad a través de operaciones matemáticas y estadísticas.

Los parámetros asociados a una cuenca de drenaje son:

Área o magnitud de la cuenca (A_c)

Es el área en proyección horizontal de la cuenca hidrográfica y se la mide en km^2 . Para su determinación esta debe estar claramente delimitada con una línea divisoria y se la puede calcular con ayuda de algún software de sistemas de información geográfica.

Perímetro de la cuenca (P_c)

Es la medición de la línea que delimita la cuenca hidrográfica, se la expresa en km, al igual que el área su cálculo se puede realizar por medio de software de manera automatizada.

Longitud de la cuenca. (L_c)

Montserrat, (1985), define este parámetro como el máximo recorrido del agua desde el punto de salida de la cuenca hasta el límite de esta en la línea recta, se expresa en km.

Ancho de una cuenca (W_c)

Se define como el cociente entre el área y la longitud de la cuenca:

$$W = \frac{A_c}{L_c}$$

Forma de la cuenca

Existen dos índices que dan una idea numérica de la forma de la cuenca

1) Índice de Horton (F_f)

Según Horton, (1932), es la proporción del ancho a la longitud de la cuenca de drenaje. Este factor ha sido considerablemente utilizado en conexión con fórmulas de máxima descarga – inundación. Se puede expresar como:

$$F_f = \frac{A_c}{L_c^2}$$

Donde, A es el área de la cuenca y L es su longitud.

2) Índice de Gravelius o Compacidad (K_G)

Gravelius ideó este factor, expresa la razón del perímetro de la cuenca de drenaje a la de una cuenca circular teórica de igual área.(Horton, 1932). Se expresa de la siguiente manera:

$$K_G = \frac{P_c}{2\sqrt{\pi \cdot A_c}}$$

Donde, P es el perímetro de la cuenca y A representa el área.

Además Aramburu et al., (2014), recalca que el valor de este índice es siempre mayor a la unidad y clasifica las cuencas de acuerdo a la Tabla 1.2, mostrada a continuación:

Tabla 1.2 Forma de Cuencas asociada al coeficiente de Gravelius [Aramburu Maqua et al., 2014]

K_G	Forma
1,00 – 1,25	Casi redonda a ovalo–redonda
1,25 – 1,50	Ovalo–redonda a ovalo–oblonga
1,50 – 1,75	Ovalo–oblonga a rectangular–oblonga

Número de orden de la cuenca (u)

La clasificación según este criterio se relaciona con el número de ramificaciones de la red de drenaje. De acuerdo con Ibáñez et al., (2013), Gravelius fue el primero en proponer un sistema de clasificación en base a este criterio, para ello asignó al cauce principal como de orden uno (1), de orden dos (2) a los afluentes del cauce principal y así sucesivamente. Posteriormente Horton en 1945 modificó esta clasificación invirtiendo el orden que Gravelius había propuesto. Luego se desarrollaron otros criterios de clasificación (Figura 1.18), Strahler (1952), Scheidegger (1965) y Shreve (1966).

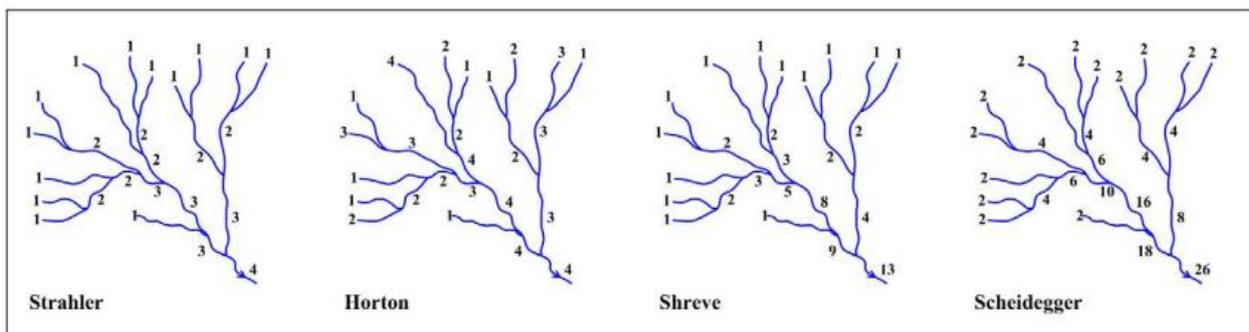


Figura 1.18 Modelos de clasificación de cuencas de acuerdo con varios autores [Aramburu et al., 2014]

Relación de bifurcación (R_B)

Esta relación fue diseñada empíricamente por Horton, definiendo la relación existente entre el número de cauces de orden arbitrario (N_u) y el número de orden inmediatamente superior ($u + 1$). (Aguirre, 2007). Además, al combinar este factor con el índice de Gravelius (K_G), permite evaluar la respuesta de la cuenca frente a crecidas. (Aramburu et al., 2014).

$$R_B = \frac{N_u}{N_{u+1}}$$

Relación de elongación (R_e)

Fue definida por Schumm (1956) como la relación entre el diámetro de un círculo con área igual al de la cuenca y el diámetro equivalente a la longitud del cauce principal. (Volonté, 2017).

$$R_e = 1.129 \cdot \frac{\sqrt{A_c}}{l}$$

De acuerdo con el valor obtenido se podrá clasificar a una cuenca como plana y circular si dicho valor se aproxima a la unidad, si el valor está en el rango [0.5 – 0.8] se la considera plana accidentada. Por su parte Jardí, (1985), añade que mientras menor a la unidad sea esta relación, más alargada será la cuenca.

Índice de circularidad de Miller (R_c)

Miller, (1953), lo define como el cociente entre el área de la cuenca y el área teórica de un círculo cuyo perímetro sea equivalente a esta:

$$R_c = \frac{4\pi A_c}{P_c^2}$$

Este índice define como circular una cuenca cuando el valor del índice es igual a la unidad.

Densidad de drenaje (D_d)

Horton la define como el cociente entre la longitud total de los cauces de todo número de orden y el área de la cuenca en el cual drenan, generalmente este valor es alto en zonas montañosas con rocas frágiles, y bajo en zonas de bajo relieve y roca dura (Strahler, 1957).

$$D_d = \frac{\sum_{u=1}^n L_u}{A_c}$$

Frecuencia de drenaje (F)

Este parámetro es definido como la razón entre el número total de cauces con número de orden (u) y el área de la cuenca, analizando juntamente con la densidad de drenaje permite una mejor clasificación de la cuenca (Aramburu et al., 2014).

$$F = \frac{\sum_{u=1}^n N_u}{A_c}$$

Pendiente media de la cuenca (J)

Este es un factor importante dentro de la caracterización de cuencas, controla el tiempo de flujo sobre la superficie, se define como el cociente del total de longitud de las curvas de nivel dentro de la cuenca y el área de esta (Aramburu et al., 2014). Se expresa:

$$J = 100 \cdot \frac{E \cdot \sum_{i=1}^n l_i}{A_c}$$

Donde E es la equidistancia entre curvas de nivel, l es la longitud de la curva de nivel i y A_c el área de la cuenca.

Elevación media de la cuenca (H_{med})

Se la puede determinar mediante el uso de la curva hipsométrica, la cual representa la cota equivalente al 50% del área de la cuenca, con ella se puede determinar la etapa del ciclo erosivo en la que se encuentra la cuenca de estudio (Figura 1.9). Se la crea a través de la representación gráfica del área entre curvas de nivel vs cota (Linsley et al., 1949).

Las consideraciones a tener en cuenta antes de su construcción son: en el eje y se coloca la altitud en metros y en el eje x el área en hectáreas (Aramburu et al., 2014).

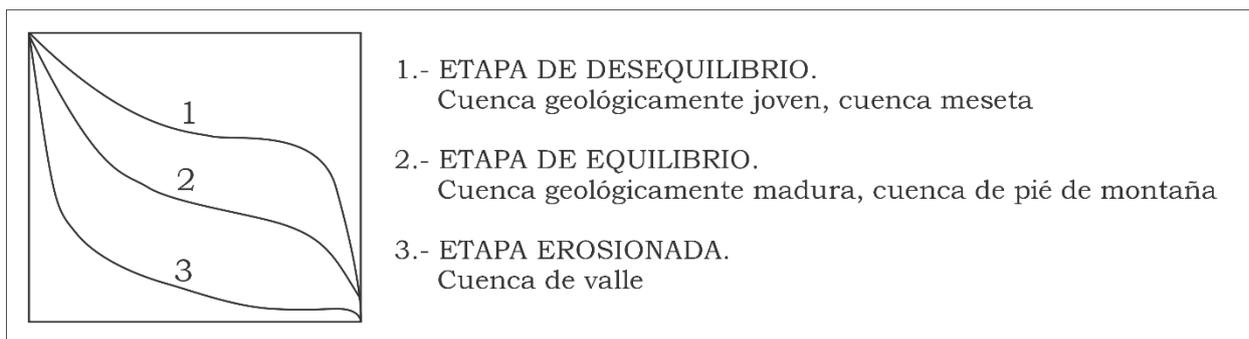


Figura 1.19 Curva hipsométrica asociada a cuencas hidrográficas [Aramburu et al., 2014]

Tiempo de concentración (T_c)

Chow et al., (1988), lo define como el tiempo de flujo de una gota de agua desde el punto más lejano de la cuenca hasta su desembocadura. Existen varias fórmulas

experimentales de diferentes autores para diferentes partes del mundo, sin embargo, la que tiene mayor aceptación es la propuesta por Kirpich.

$$T_c = 0,0195 \cdot \left(\frac{M^3}{H} \right)^{0,385}$$

Donde, M es la longitud del cauce principal y H la diferencia de cota entre la salida de la cuenca y el punto más alejado.

1.5.7 Sensores remotos y procesamiento de imágenes.

Existe un sinnúmero de fuente de información para el procesamiento en SIG, la teledetección es sin duda la más importante, haciendo uso de satélites para obtención de información para su posterior análisis (Maldonado, 2016).

En los últimos años la teledetección ha tomado gran fuerza, abarcando disciplinas como cartografía, agricultura, entre otros. Una de las ventajas, es sin duda, la posibilidad de realizar análisis para períodos de tiempo específicos, permitiendo realizar un análisis multitemporal del comportamiento de ciertos fenómenos a lo largo del tiempo. Esto es posible gracias a que existen diferentes sensores que permiten ampliar la disponibilidad de imágenes (Tristan et al., 2008).

1.5.7.1 Percepción remota

En términos generales se define a la percepción remota o denominada teledetección como la recopilación de información sobre un objeto sin tener contacto físico con este. (Rees, 2001). Para el presente trabajo se restringirá a la superficie y atmósfera de la Tierra, visto desde arriba utilizando radiación electromagnética.

1.5.7.2 Consideraciones fundamentales de la teledetección

Fuentes de energía.

Una clasificación importante de sistemas de teledetección es el de los sistemas pasivos, que detectan radiación natural, y en sistemas activos, que emiten radiación y analizan la información que es devuelta hacia ellos (Maldonado, 2016)

Rees, (2001), subclasifica a los sistemas pasivos en dos, aquellos que detectan la radiación solar (ultravioleta, luz visible y radiación infrarroja cercana) y aquellos que detectan la radiación térmica emitida por todos los objetos que no estén a temperatura de cero absoluto, los objetos en la superficie terrestre emiten en la parte infrarroja del espectro (longitud de onda de orden $10\mu m$). Los sistemas activos pueden en teoría utilizar cualquier tipo de radiación electromagnética, sin embargo, se ve limitado por la transparencia de la atmósfera.

Espectro electromagnético.

La energía se puede transferir de 3 distintas maneras: conducción, convección o radiación. En lo que respecta a la percepción remota la última es de gran interés ya que hace uso de longitudes de ondas en los intervalos mencionados en el apartado anterior. La radiación que llega a un determinado objeto puede comportarse de 3 formas, ser reflejada, absorbida o transmitida; cuando la proporción de la radiación no es igual en ciertas zonas de la superficie, permite analizar factores por sus propiedades espectrales, un buen ejemplo es la clorofila, que absorbe mayor longitud de onda lo que permite caracterizar la vegetación en la superficie (Bautista et al., 2004).

En la Figura 1.20 se resume las regiones del espectro electromagnético:

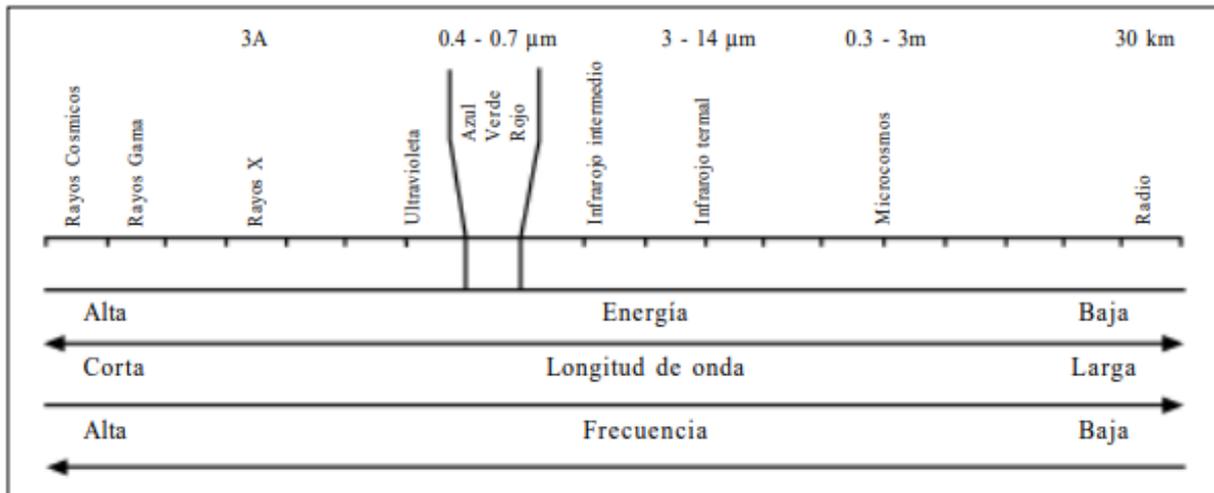


Figura 1.20 Espectro electromagnético [Bautista et al., 2004]

1.5.7.3 Sensores remotos multiespectrales.

Los sensores multiespectrales son de gran utilidad para realizar diversos análisis debido a la cantidad y ubicación de bandas que pueden percibir (Maldonado, 2016). Un ejemplo de este tipo de sensor es Landsat, puesto en órbita por primera vez en 1972, equipado con dos sensores, un barredor multiespectral y tres sistemas de videos, entre sus ventajas se encuentra la gran cantidad de imágenes mundiales, ausencia de conflictos políticos, de derecho de autor y su bajo costo. Actualmente otros sistemas satelitales han sido implementados, y con la ventaja del internet se tiene acceso a todos estos, facilitando la adquisición de imágenes tanto libre como comercial (Bautista et al., 2004).

1.5.7.4 Resolución de un sistema sensor.

Tristan et al., (2008), afirma que la resolución de un sensor depende del fin para el cual este fue creado, a continuación, se da a conocer cada una de ellas:

Resolución espacial. Se define como la capacidad del sensor para lograr captar un objeto de pequeño tamaño y presentarlo en la imagen.

Resolución espectral. Es la capacidad del sensor de percibir la radiación emitida por un cuerpo a diferente longitud de onda, está definida por la cantidad de bandas que puede captar el sensor.

Resolución radiométrica. Capacidad del sensor para discernir el nivel o intensidad de radiancia espectral.

Resolución temporal. Capacidad del sistema para detectar los cambios de la superficie de interés a través del tiempo.

1.5.7.5 Procesamiento digital.

Habitualmente se realizan correcciones a la imagen captada por un sensor remoto, sin embargo, se debe tener mucho cuidado al realizarlas ya que pueden tener un efecto negativo en el post-procesamiento. Una imagen satelital puede ser representada en forma matricial, cada celda se denomina píxel y es representado por un número (ND) que refleja el nivel radiométrico de esa celda, el conjunto de pixeles forma una imagen (Arango et al., 2005) (Figura 1.21). En base a esta matriz se aplica ciertas operaciones básicas que se describen a continuación.

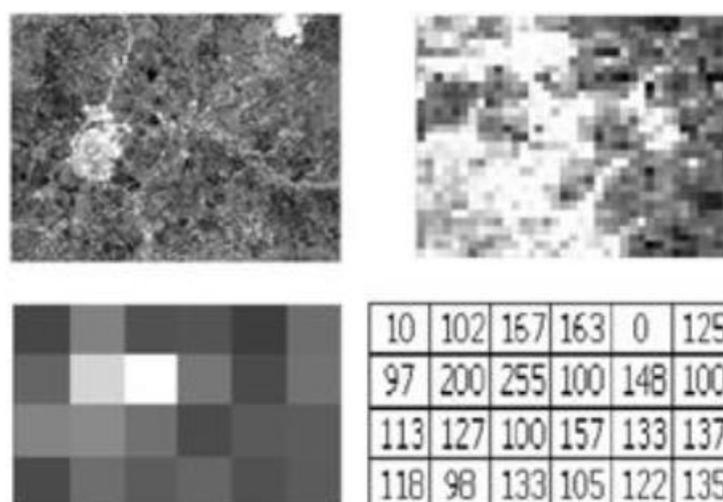


Figura 1.21 Pixeles en una imagen satelital ampliada [Arango et al., 2005]

1.5.7.6 Restauración de imágenes

Las imágenes provenientes de sensores remotos se ven alteradas por variables como la rotación de la Tierra, condiciones del sensor, condiciones atmosféricas, etc, lo que genera distorsión de la posición, forma, tono y tamaño de los objetos que son captados por el sensor (Arango et al., 2005).

Eastman, (2012), subdivide en dos las áreas de restauración:

Restauración radiométrica. – Este tipo de restauración se la realiza en primera instancia en el procesamiento de imágenes, está directamente vinculada con la relación lineal de los DN y la radiancia espectral, tratándose en este paso de suprimir todas aquellas respuestas no lineales entre ellas, lo que representaría, por ejemplo, presencia de nubes, ruido en la imagen, perdida de líneas de escaneo, etc. En la Figura 1.22, se muestra una imagen antes y después de la restauración, donde los factores a eliminar son el bandeado y la abundante neblina.

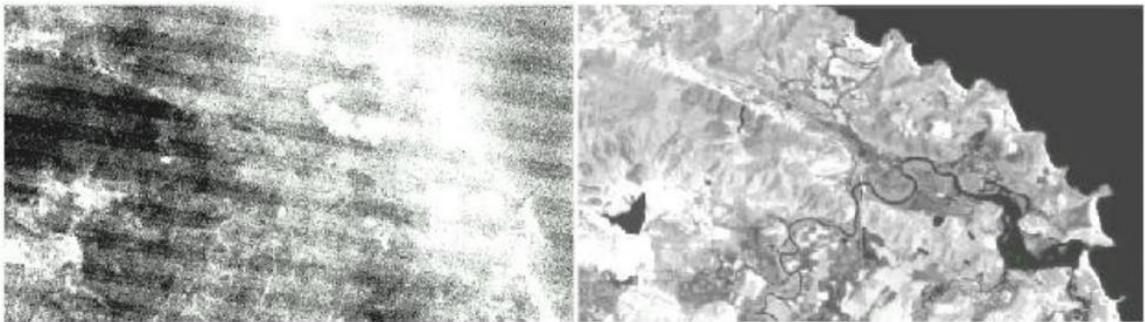


Figura 1.22 Ejemplo de restauración radiométrica [Eastman, 2012]

Restauración geométrica. – esta técnica es aplicada para corregir imágenes que presenten distorsiones o desviaciones (Eastman, 2012) debido a que estas no se encuentran georreferenciadas, es decir, cada píxel constituyente posee un sistema de coordenadas arbitrarias por lo que la georreferenciación es una herramienta que permite

designar un espacio y sistema referencial respectivo, resultando en una corrección más acertada del panorama original (Olaya, 2014).

1.5.7.7 Optimización de imágenes

El proceso de optimización se encarga de la transformación de imágenes realizando ajustes a fin de hacerlas más perceptibles al ojo humano (Maldonado, 2016). Cuánto más métodos se apliquen mejor se percibirán los valores de la imagen y por ende, sus posteriores análisis (Olaya, 2014).

Zona de contraste. – se emplea para corregir los valores de ciertos niveles de gris generados por los sensores digitales que, se pueden presentar en su mayoría alterados (Eastman, 2012) y que, con esta modificación logran realzar la definición de los elementos que se observan en la imagen (Olaya, 2014).

Generación de compuestos. – este procedimiento consiste en elegir ciertas bandas para luego combinarlas y generar una mejor visualización según el interés de la investigación (Eastman, 2012).

- **Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, Normalized Differential Vegetation Index).** – según Andrade et al. (2018) se basa en la firma espectral característica de vegetación verde y saludable que ofrece un claro contraste entre la combinación de bandas rojas e infrarrojas cercanas. Los resultados varían de -1 a +1, donde, en superficies con vegetación verde, los valores van de 0 a 1 y, en agua o nubes, ellos valores son generalmente menores que cero (Andrade et al., 2018). Se lo determina mediante la siguiente ecuación:

$$NDVI = \frac{(NIR - Red)}{(NIR + Red)}$$

Dónde:

NIR = banda de infrarrojo cercano

Red = banda roja

- **Índice Diferencial de Agua Normalizado (NDWI, Normalized Difference Water Index).** – según Andrade et al. (2018) es un método desarrollado por McFeeters (1996) con el fin de delinear las características de agua presente en el ambiente y resaltar su presencia en la imagen satelital obtenida por teledetección. Como resultado, las características del agua tienen valores positivos y, por lo tanto, se mejoran, mientras que la vegetación y el suelo generalmente tienen valores cero o negativos y, por lo tanto, se suprimen (Xu, 2006). Se lo obtiene mediante la ecuación:

$$NDWI = \frac{(Green - NIR)}{(Green + NIR)}$$

Dónde:

Green = banda verde

- **Índice de Diferencia de Agua Normalizado Modificado (MNDWI, Modified Normalized Difference Water Index).** - Para extraer con precisión las características del agua, Xu (2006) propuso el MNDWI que se calcula como:

$$MNDWI = \frac{Green - SWIR}{Green + SWIR}$$

Donde:

SWIR = banda de infrarrojos de onda corta

El valor de MNDWI también varía de -1 a +1. La mayor reflectancia del agua acumulada y la menor reflectancia del agua en la banda SWIR dan como resultado valores negativos de acumulación y valores positivos de las características del agua en la imagen derivada del MNDWI (Singh et al., 2015).

Filtrado digital. – proceso que emplea funciones que son introducidas en el álgebra de mapas con el fin de optimizar la visualización de la imagen ya sea suavizando o resaltando las diferencias que hay en pixeles vecinos (Olaya, 2014)

Pansharpening. – este método se lo emplea para alzar la resolución mediante las bandas pancromáticas y por ende generar un mayor detalle de textura y forma (Eastman, 2012).

1.5.7.8 Clasificación de imágenes.

Las imágenes satelitales son captadas por sensores remotos que permiten clasificarlas en base al comportamiento espectral, facilitando su interpretación. El propósito de esta clasificación es relacionar las características espectrales con los rasgos distintivos de la superficie terrestre (Bautista et al., 2004). La particularidad de las firmas espectrales depende de las clases que existan en el área de interés dentro de la agrupación de bandas que se están aplicando (Maldonado, 2016). Existen generalmente dos tipos de enfoques que dan lugar a esta clasificación: clasificación supervisada y no supervisada.

Clasificación supervisada. – proceso por el cual se requiere la supervisión del analista tanto en trabajo de campo como en oficina (Bautista et al., 2004) para corroborar los detalles del procesamiento de datos. Con lo mencionado anteriormente se conocen con antelación las clases existentes dentro del área terrestre de interés, es decir, se clasifica mediante valores de pixeles que tienen similitud a una determinada firma espectral por lo que hay métodos clasificadores proporcionados por softwares que ayudan a elegir la decisión adecuada (Maldonado, 2016).

Clasificación no supervisada. – procedimiento que se encarga de agrupar píxeles, rasgos característicos similares denominadas clases espectrales que, se infiere pertenecen a un patrón en la superficie terrestre para luego ser verificadas en una visita de campo. La técnica que se emplea para el desarrollo de esta clasificación se define como Clustering que consiste en segmentar la imagen en clases no conocidas que más adelante son rotuladas (Arango et al., 2005).

1.5.7.9 Gemorphic Change Detection (GCD)

James & Robson, (2012), la detección de cambios geomorfológicos puede aplicarse volumétricamente, empleando DEM en la cual las características morfológicas son delimitadas por imágenes de teledetección o cartografía. Esta técnica consiste en la diferencia de DEMs (DoD) entre sí para obtener un mosaico de cambio morfológico (Figura 1.23). Los DoD se los han destinado, en mayor parte, a estudios de geomorfología fluvial para inferir tasas de transporte de sedimentos, interpretar procesos como socavación, llenado, migración y avulsión de canales (Williams, 2012).

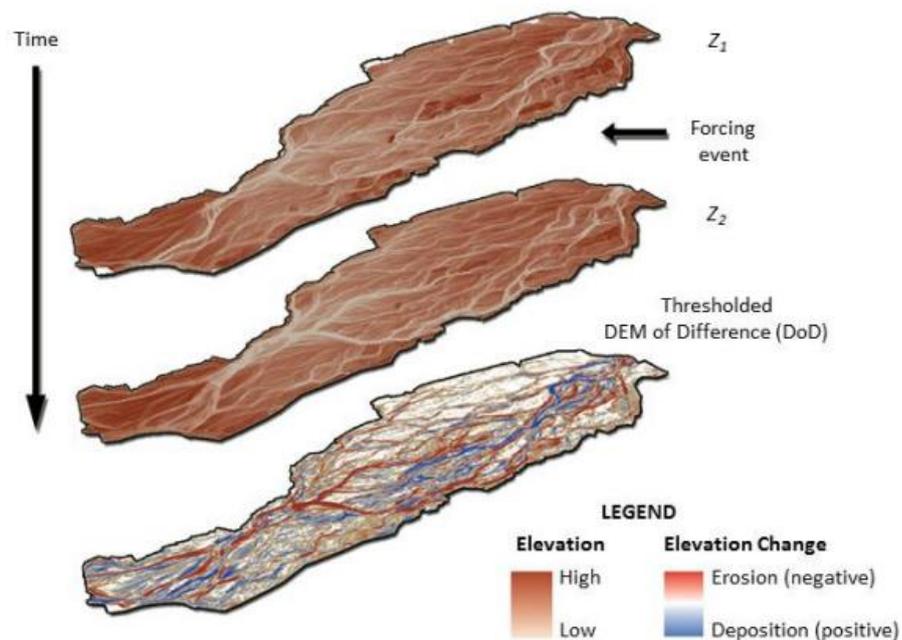


Figura 1.23 Diferencia de DEMs para la obtención de las tasas de sedimentación. [Williams et al., 2011]

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

De acuerdo con el alcance de la investigación, la metodología que se ajusta a los requerimientos está compuesta de tres fases, dentro de las cuales se describirán procedimientos puntuales que cumplan los objetivos propuestos de una forma simple y entendible. A continuación, en la Figura 2.1 se muestra el esquema metodológico a desarrollar durante este proyecto:

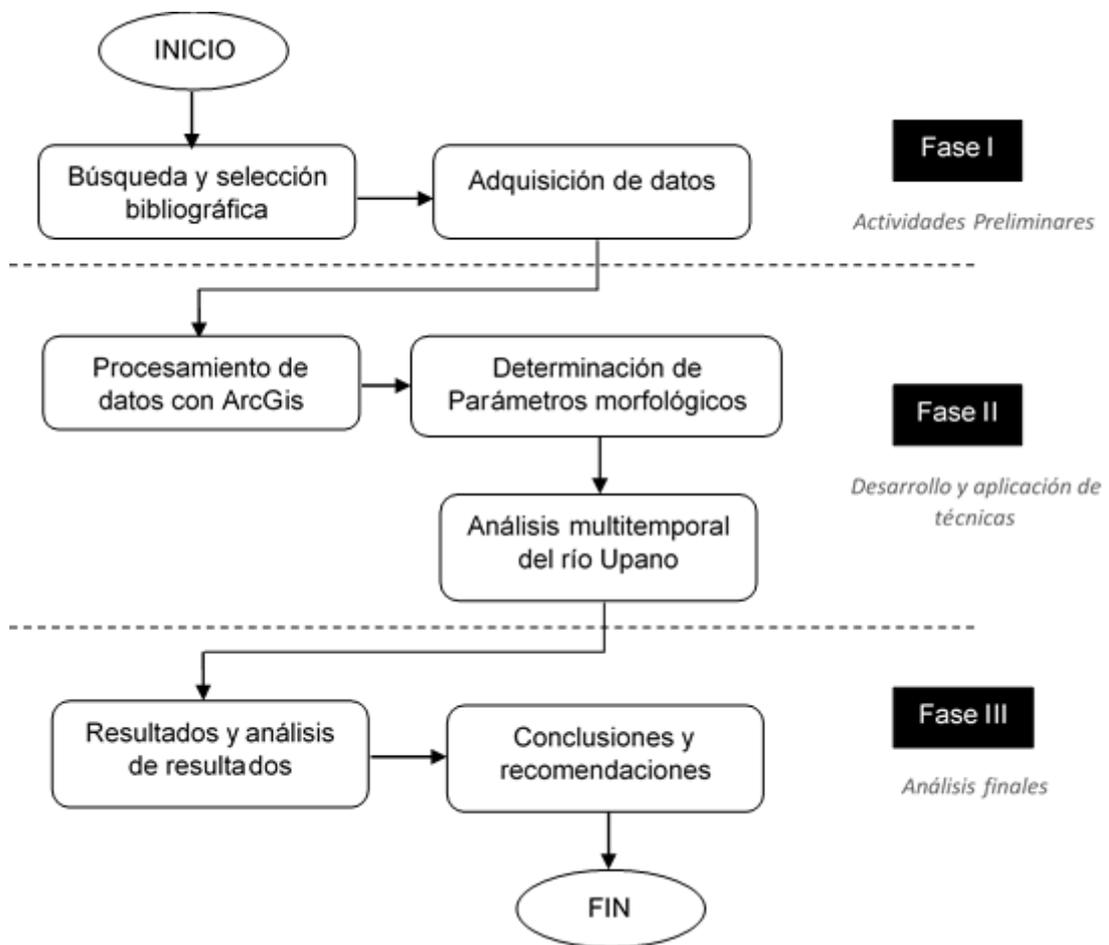


Figura 2.1 Esquema metodológico del proyecto. [Autores]

2.1 Fase I. Actividades Preliminares

2.1.1 Búsqueda y selección bibliográfica

La base de una óptima investigación es la búsqueda de fuentes bibliográficas, que deben ser de procedencia confiable, es decir, que tengan fundamento científico. Esta clase de información se la encontró en revistas científicas, mapas, libros, tesis de magister o doctorales, informes proporcionados por entidades provinciales (GAD) y gubernamentales como es el caso del Municipio de Macas y el Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTOPE), cartografía base proporcionada por el Sistema Nacional de Información (SNI), Instituto Geográfico Militar (IGM), etc. Es una ardua tarea, ya que se requiere tiempo y dedicación para obtener resultados de alto valor.

2.1.2 Adquisición de datos

Los datos son generalmente de acceso libre, que se encuentran en páginas web, sin embargo, conforme se avanzó en la investigación se optó por usar plataformas de pago como LandViewer para acceder al tipo de información de interés sin restricciones como son la visualización de imágenes satelitales. LandViewer cuenta con una interfaz completa por lo que permite la visualización en 2D y 3D, descarga de bandas por separado o por combinaciones de estas. Posee además combinaciones de bandas predeterminadas que pueden emplearse para un estudio específico.

2.1.2.1 Imágenes satelitales

Para este proyecto se requirieron imágenes de dos clases de satélites: Landsat y Sentinel, por lo que su procesamiento es mucho más sencillo. Inicialmente el análisis estaba destinado a los años de 1987 al 2020, pero debido a los inconvenientes con la nubosidad o disponibilidad de bandas se destinaron los años 1987, 1994, 1999, 2006, 2013, 2015, 2017 y 2020. El porcentaje de nubosidad adecuado dependerá de la posición en la que se encuentren las imágenes y de la claridad en la que se halle el cauce del río Upano para evitar márgenes de errores elevados. Para ciertos años mencionados

anteriormente, se procedió a escoger varias imágenes del mismo año para luego realizar un mosaico y unir las, con el fin de obtener la mejor resolución posible y por ende que facilite el procesamiento de estas.

Las imágenes del satélite Landsat y Sentinel fueron extraídas de la plataforma LandViewer. Landsat cuenta con una resolución de 30 m/px mientras que Sentinel cuenta con una resolución de 10 m/px. En la Tabla 2.1 se muestran las 18 imágenes que se necesitaron junto con las características correspondientes.

Tabla 2.1 Características de la obtención de las imágenes satelitales. [Autores]

Imagen	Satélite	Plataforma	Fecha de emisión	Fecha de descarga	Peso [mb]	Resolución [m]
1	Landsat 5	LandViewer	19/03/1987	18/06/2021	0,44	30
2	Landsat 5	LandViewer	26/03/1987	18/06/2021	3,03	30
3	Landsat 5	LandViewer	22/05/1987	18/06/2021	4,51	30
4	Landsat 5	LandViewer	11/09/1987	18/06/2021	3,12	30
5	Landsat 5	LandViewer	30/09/1994	04/07/2021	3,55	30
6	Landsat 5	LandViewer	08/08/1999	20/06/2021	1,39	30
7	Landsat 5	LandViewer	25/09/1999	20/06/2021	12,30	30
8	Landsat 5	LandViewer	15/09/2006	30/06/2021	17,90	30
9	Landsat 8	LandViewer	27/04/2013	03/07/2021	38,40	30
10	Landsat 8	LandViewer	25/01/2015	03/07/2021	12,00	30
11	Landsat 8	LandViewer	21/09/2015	03/07/2021	8,55	30
12	Landsat 8	LandViewer	11/11/2015	03/07/2021	9,64	30
13	Sentinel 2	LandViewer	17/05/2017	04/07/2021	8,56	10
14	Sentinel 2	LandViewer	06/06/2017	04/07/2021	62,61	10
15	Sentinel 2	LandViewer	20/08/2017	04/07/2021	0,68	10
16	Sentinel 2	LandViewer	19/10/2017	04/07/2021	32,20	10
17	Sentinel 2	LandViewer	13/12/2017	04/07/2021	137,00	10
18	Sentinel 2	LandViewer	04/08/2020	04/07/2021	287,00	10

2.1.2.2 Mapas geomorfológicos

Los mapas geomorfológicos representan las formas de relieve y las distintas geoformas existentes dentro de la zona de interés, por lo que es de gran ayuda estudiarlo. Se obtuvo las hojas del Sistema Nacional de Información de Tierras Rurales e Infraestructura Tecnológica (SIGTIERRAS) y son las siguientes:

- Hoja ÑV-B3 Río Upano (junio, 2015). Escala: 1:50000
- Hoja ÑV-B4 Macas (junio, 2015). Escala: 1:50000

2.1.2.3 Shapefiles (SHP)

Los shapefiles sirvieron de base cartográfica para los distintos procesamientos en el software ArcMap, los cuales se descargaron del SNI y son los siguientes:

- Cartografía Base
 - Provincias
 - Cantones
 - Ríos

2.1.2.4 Modelo Digital de Elevación (DEM)

Se descargó de la plataforma EarthData, el DEM del satélite Alos Palsar que posee una resolución de 12,5 m/px.

2.2 Fase II. Desarrollo y aplicación de técnicas

2.2.1 Procesamiento de datos con ArcGis

El procesamiento de información mediante ArcGis facilitó el reconocimiento de componentes y características geomorfológicas, permitieron, además, el realce y

variaciones de las imágenes satelitales de los distintos años para la visualización de atributos morfológicos dentro de un determinado espacio.

La identificación del sistema de referencia de las imágenes satelitales es de fundamental importancia ya que se requiere la información de la zona en la que se está trabajando para acoplarlas a sus condiciones. A la mayoría de estas, se le realizó una reproyección al sistema de coordenadas proyectadas WGS 1984 UTM Zona 17 S.

Se aplicaron herramientas de hidrología y depuración para la obtención de la cuenca del río Upano en función a los SHPs de ríos proporcionados por el SNI, así mismo proporcionaron información para la determinación de los parámetros hidrológicos y geomorfológicos de la zona de interés.

Las herramientas de combinaciones de banda de las imágenes según los satélites respectivos facilitaron la visualización de elementos de interés como son cuerpos de agua (NDWI y MNDWI) y vegetación presente (NDVI) . NDVI, NDWI y MNDWI son índices que surgen de una operación y combinación entre bandas predeterminadas respectivamente. Estos índices permitieron también la comparación entre los diferentes años y la extracción del cauce principal para su análisis en lo posterior.

2.2.1.1 Determinación de parámetros morfológicos

Los parámetros geomorfológicos de la cuenca hidrográfica del río Upano facilitaron la evaluación de esta, ya que, estos son controladores principales del comportamiento morfodinámico e hidrológico que permitieron la caracterización del ambiente geomorfológico de la zona de estudio. Fueron fácilmente obtenidos por herramientas del software ArcMap que emplean simples operaciones matemáticas y estadísticas relacionadas al propio sistema fluvial.

Para el cálculo del orden de drenaje de la cuenca se optó por clasificar de acuerdo con el método de Jerarquización de Strahler ya que es una clasificación simple destinada a la mayoría de los ríos y también debido a que la cuenca posee un solo punto de drenaje.

Para el cálculo de la curva hipsométrica se empleó el DEM obtenido de Alos Palsar que posee una resolución 12,5 m/px, de la cual se obtuvo las curvas de nivel cada 150 m. Como resultado se obtuvo las áreas acumuladas de cada curva de nivel en porcentajes y se construyó la curva hipsométrica con ayuda de Microsoft Excel.

2.2.1.2 Análisis multitemporal del río Upano

Para evidenciar los cambios geomorfológicos en el cauce del río Upano se optó por practicar un análisis multitemporal a partir del año 1987 hasta el 2020 en intervalos de 5 años. No obstante, las limitaciones tanto en información como tiempo de durabilidad del proyecto se decidió estudiar su cauce en los años de 1987, 1994, 1999, 2006, 2013, 2015, 2017 y 2020 respectivamente.

Para la obtención del río se emplearon los índices NDVI, NDWI y MNDWI en conjunto con la herramienta de Tasseled Cap de ArcMap que facilitó su extracción ya que esta reduce la cantidad de datos de ciertas bandas espectrales que generan ruidos realzando el brillo, verdor y humedad teniendo como resultado un análisis más preciso.

Al tratarse de un río con una configuración de multicanales, la determinación del cauce principal es compleja, por lo que se empleó como variable de identificación de canal la longitud transversal del cauce, colocando nodos en aquellos canales de mayor longitud clasificándolo como canal primario y los que poseen menor longitud como canales secundarios, realizándolo analógicamente a todo el río.

La calificación del río se la determinó basada en el río extraído de los diferentes años, dividiendo en tres zonas, las cuales representaban un comportamiento homogéneo determinado.

Para el índice de sedimentación se empleó series temporales que fueron elaboradas con ayuda de Microsoft Excel y Corel Draw. La obtención del este índice fue basada en la relación del área de barras presentes en cada km del cauce del río. Estas permitieron la visualización de las variaciones del porcentaje de barras para el período 1987 – 2017 y 2020.

2.2.1.3 Procesamiento digital

En esta etapa, luego de la búsqueda bibliográfica, se buscó resaltar los productos de los sensores remotos, para ello, se aplicaron técnicas mediante SIG que permitió discriminar entre los resultados. En la Figura 2.2 se puede observar un ejemplo de lo mencionado, se realizó el cálculo del NDVI, NDWI, MNDWI, esperando seleccionar el mejor de ellos, sin embargo, al momento de analizar el tramo mostrado, pone en evidencia que, para una correcta evaluación del cauce, se tendrá que apoyar de los 3 índices, intentando así apegarse lo más posible a la realidad.

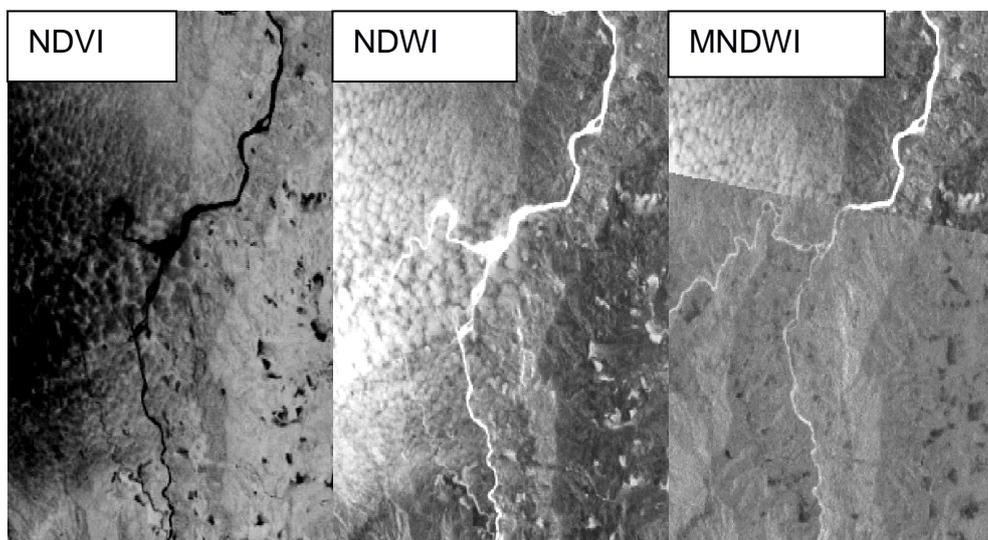


Figura 2.2 Comparación de índices en un tramo del río Upano del año 1987. [Autores]

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Parámetros morfológicos de la cuenca del río Upano

Los resultados que se obtuvieron de la caracterización hidrológica – geomorfológica de la cuenca del río Upano se muestran a continuación en las Tabla 3.1 y 3.2. Las ecuaciones empleadas para el cálculo de estos parámetros se muestran en la sección 1.5.6.3 Análisis de cuenca de drenaje.

Tabla 3.1 Parámetros morfológicos de la cuenca del río Upano. [Autores]

Descripción	Parámetros	Resultados	Unidades
Área de la cuenca	A_c	3848,	km ²
Perímetro de la cuenca	P_c	341,92	km
Longitud de la cuenca	L_c	85,30	km
Longitud del cauce principal	L_{cp}	106,72	km
Ancho de la cuenca	W_c	45,12	km
Índice de Horton	F_f	0,53	-
Índice de Gravelius	K_G	1,55	-
Número de orden de la cuenca	u	6° orden	-
Relación de bifurcación	R_B	2,08	-
Relación de elongación	R_e	0,45	-
Índice de circularidad de Miller	R_c	0,41	-
Densidad de drenaje	D_d	0,69	km/km ²
Frecuencia de drenaje	F	20,04	km/km ²
Pendiente media de la cuenca	J	32,36	%

Tabla 3.2 Continuación tabla 3.1

Elevación media de la cuenca	H_{med}	3425,50	m
Tiempo de concentración	T_c	4,89	horas

Analizando los resultados obtenidos en la tabla 3.1 y 3.2, se tiene lo siguiente:

- **El área de la cuenca** que abarca a este río es de 3848,79 km², siendo, según la clasificación de cuencas en función a su magnitud de Campos (1992), una cuenca grande implicando que, la consecuencia del acopio en el cauce puede ser notable y poco controlable por el hombre, por lo que se debe vigilar y estudiar minuciosamente la hidrología del curso de agua principal.
- **Los valores de forma de Horton, índice de compacidad y la relación de elongación** conjuntamente describen que la cuenca es alargada tendiendo a una configuración rectangular propio de cuencas desarrolladas en un entorno montañoso, lo que implica experimentar en menor cantidad desbordamientos frecuentes ya que por su forma no alcanza a mostrar el área en su totalidad al radio de acción de una precipitación determinada. No obstante, estas observaciones están sujetas a condiciones, debido a que estos parámetros dependen de la extensión, intensidad y duración de la precipitación y de las extremas intensidades del fenómeno como es el ejemplo del caso de estudio, la provincia de Morona Santiago presenta una precipitación anual de 4000 – 5000 mm provocando que esta zona tenga frecuentes e intensas crecidas a pesar de poseer las características antes mencionadas.
- **La relación de bifurcación** es de 2.01, por lo que dentro del rango de clasificación Strahler y Horton es menor que 3, indicando probablemente que es una cuenca bien drenada y potencialmente peligrosa con respecto a las crecidas. Esta relación es inversamente proporcional a los índices de forma de Horton y Gravelius.

- **El Índice de circularidad de Miller** es de 0,41, lo que indica que, la cuenca es de morfología ovalada a ensanchada debido a que la ecuación hace referencia al área teórica de una circunferencia.
- **La densidad de drenaje junto con la frecuencia de drenaje** que presenta la cuenca es de 0,69 y 20,04 km/km² respectivamente, definiéndola como una cuenca altamente drenada lo cual concuerda con el orden de la cuenca que es de sexto orden, por lo que su potencial de erosividad es alto debido a que su densidad de escorrentía es mayor; las litologías existentes en el área puedan poseer características de permeabilidad baja a nula. Además indica que a mayor densidad de drenaje la respuesta hidrológica será más rápida. Este parámetro depende de las constantes precipitaciones y la topografía por lo cual requiere de un riguroso seguimiento para obtener la eficiencia correcta de drenaje. Sus corrientes de agua presentan una afinidad de drenaje tipo dentrítico debido a sus numerosos afluyentes.
- **La pendiente media de la cuenca** presenta el 32,36%, lo cual según la clasificación de Araya - Vergara & Borgel (1972) modificada, corresponde a pendientes fuertes en donde posiblemente la erosión sea intensa y frecuente por lo que este valor beneficiaría el arrastre de sedimentos aumentando la velocidad del caudal en épocas de fuertes precipitaciones.
- **La elevación media de la cuenca** esta respresentada por la curva hipsométrica, la cual es mostrada en la Figura 3.1, indica en primer lugar la etapa del ciclo erosivo en que se encuentra el río, clasificándose dentro de la tercera etapa como río senil propio de una cuenca de tipo valle que se encuentra separado por las cordilleras de los Andes (al occidente) y la Cutucú (al oriente), como se muestra en la Figura 3.2. Indica además que el primer 50% del área se encuentra caracterizada por cauces cuya pendiente y altura superan con mucho al otro 50%, con una elevación media del 10%, siendo el primer porcentaje, posiblemente correspondiente a zonas montañosas y el segundo a zonas de abanicos aluviales, sin embargo, la mayor concentración del área de la cuenca de estudio, esta

centrada en las partes bajas, con valles profundos, abanicos aluviales de gran extensión y piedemontes. Los procesos erosivos asociados a este tipo de cuenca son los de tipo sedimentario fluvial, donde un gran porcentaje del material se ha erosionado y depositado en las zonas de menor pendiente.

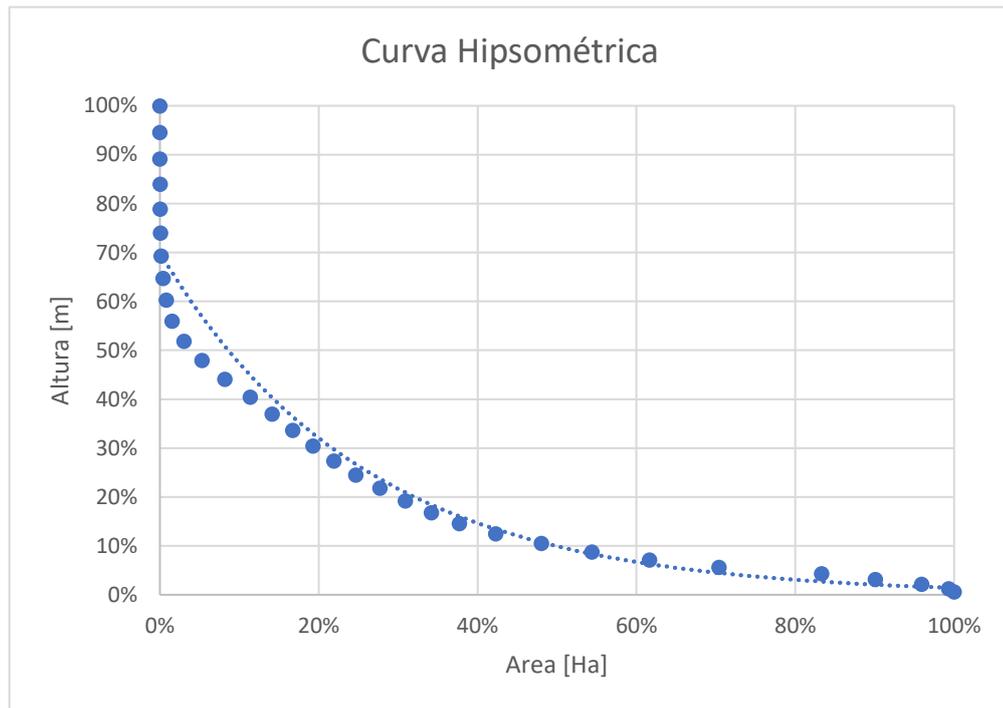


Figura 3.1 Curva Hipsométrica de la cuenca del río Upano. [Autores]



Figura 3.2 Visualización en 3D de la cuenca tipo valle mostrando las cordilleras de los Andes y Cutucú. [Autores]

- **El tiempo de concentración** es de 4,89 horas para una longitud de cauce principal de 106,72 km. Este valor es muy corto para dicha longitud debido que la red de drenaje presenta el 50% de cauces de orden 1 lo que favorece a la escorrentía hacia el cauce principal.

3.2 Parámetros asociados al río Upano.

Al realizar la extracción del río Upano para los diferentes períodos de tiempo (Figura 3.3), se puede evidenciar zonas que tienden a ser “constantes” en el tiempo (Zona 2), es decir la variación del cauce del río es mínima en ciertos sectores y zonas dónde si existen cambios (Zona 1 y 3).

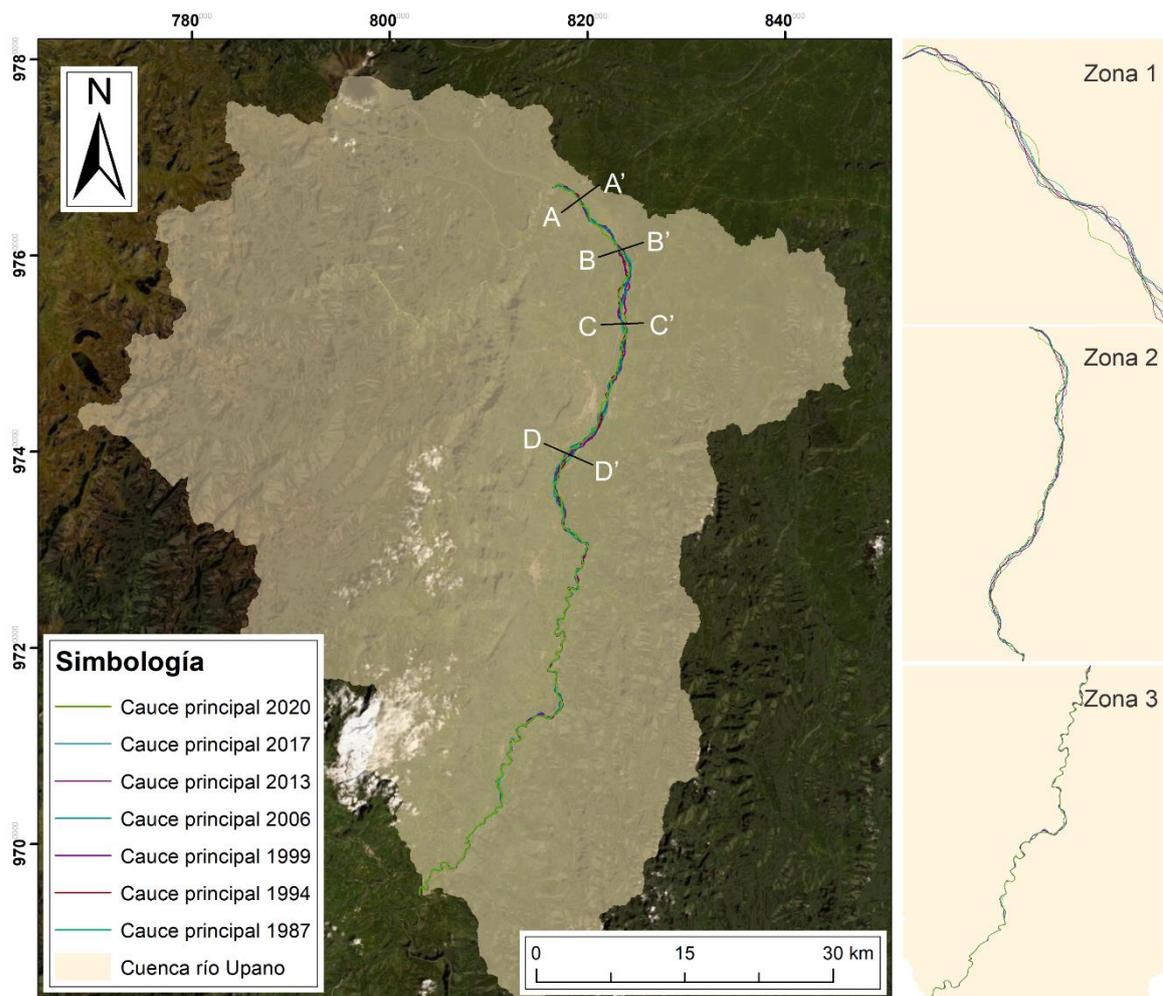


Figura 3.3 Cauce principal en el período 1987 – 2020. [Autores]

3.2.1 Cauce principal

El cauce principal se lo determinó para todos los periodos analizados, bajo la metodología propuesta en la sección 2.2.1.2. Como resultado se obtuvo tres zonas bien identificadas (Figura 3.3), la Zona 1, presenta un cauce principal sujeto a permanecer estable; la Zona 2 corresponde a aquellas zonas donde el río tiene un comportamiento trezado, por ello el cauce principal a través del tiempo no guarda una relación, en su lugar depende netamente de los ajustes del cauce en respuesta a eventos de depositación/erosión, buscando su estado de equilibrio, y, la Zona 3 por su parte, corresponde a ríos meándricos, la relación del cauce principal mantiene una relación evidente.

Es importante tener en cuenta que, al tratarse de un método empírico, y al tener como única variable la longitud transversal para la determinación del cauce principal, se ignora, por tanto, la profundidad del canal, un factor importante (no considerada por falta y verificación de datos), que puede definir como principal un cauce de menor longitud transversal pero mayor profundidad tal como se observa en la Figura 3.4 a continuación.

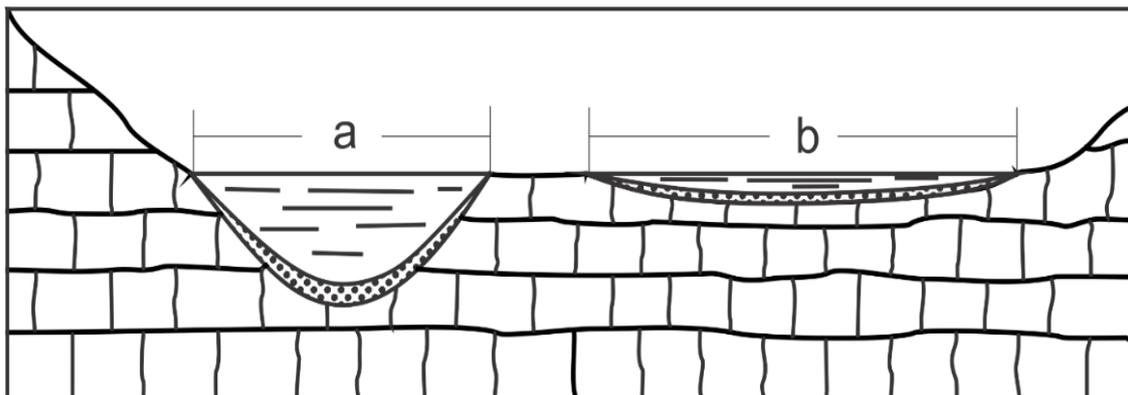


Figura 3.4 Visualización del lecho del río. [Autores]

3.2.2 Clasificación del río

Para clasificar ríos que presentan una configuración variable a lo largo de su cauce, la zonificación facilita el ordenamiento de información por lo que, se definen zonas que posean una tendencia determinada o un comportamiento homogéneo. Así es como el río Upano queda dividido en tres zonas (Figura 3.5) para un análisis a más detalle.

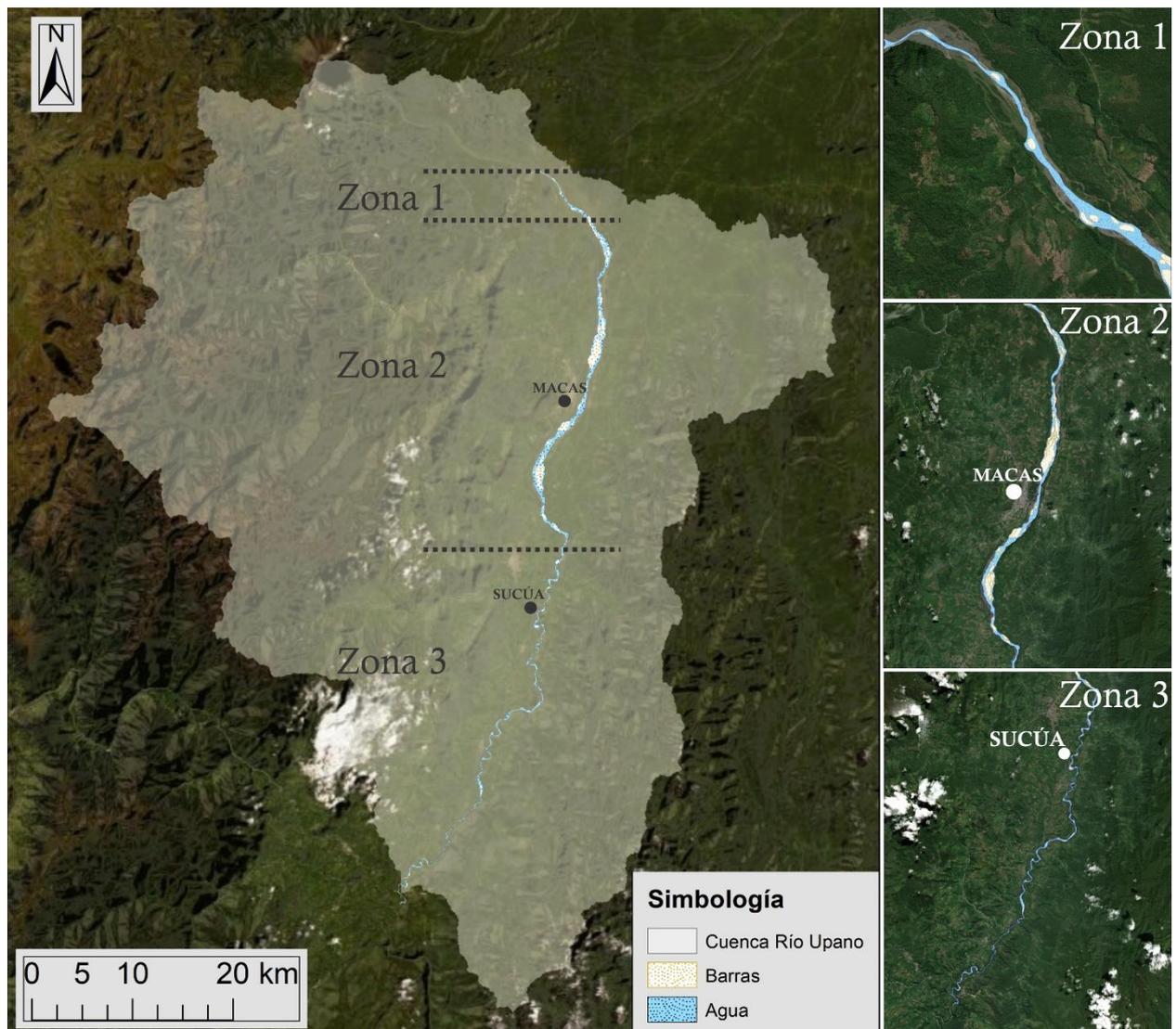


Figura 3.5 Zonas definidas para la clasificación del río Upano. [Autores]

3.2.2.1 Zona 1

La Zona 1 está comprendida desde los 0 – 8 km, partiendo que el inicio es la intersección con el río Volcán, presentándose un río de canal único. Según la clasificación de tipologías de ríos diferenciados por Rosgen, (1994), corresponde a un río de tipo B (río de baja sinuosidad), debido a que la pendiente del perfil longitudinal del cauce (Figura 3.6) en esta zona es de 2,16% y la sección transversal corresponde a la forma de valle semiencajado.

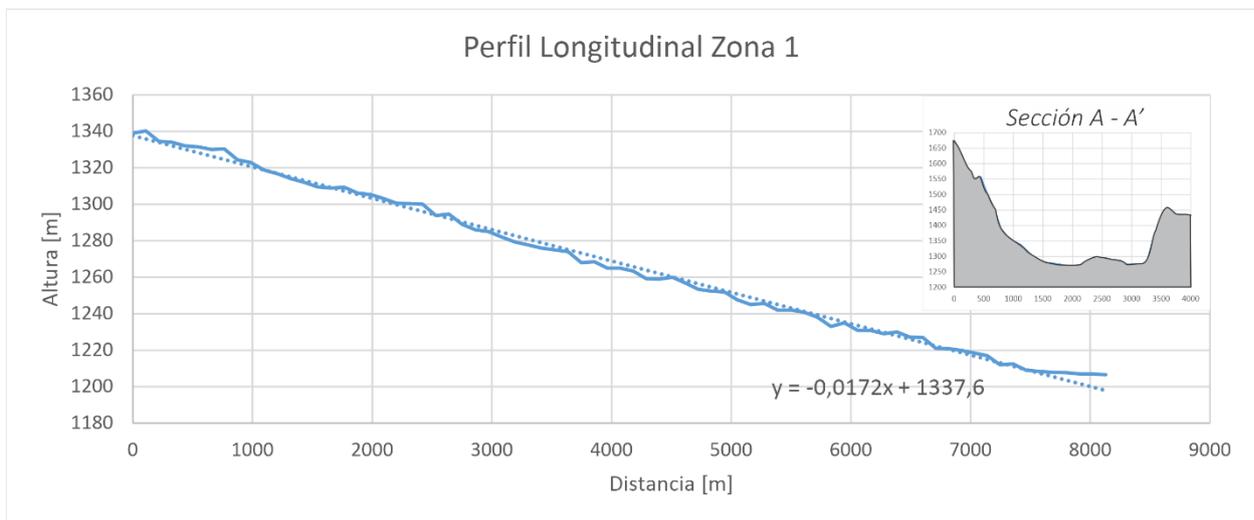


Figura 3.6 Perfil Longitudinal Zona 1. [Autores]

3.2.2.2 Zona 2

La Zona 2 está comprendida desde los 8 – 44 km, con número significativo de barras y multicanales, por la que se divide en 3 subzonas (Figura 3.7) para obtener una caracterización más precisa al momento de clasificar, evitando la ambigüedad debido a que existen dos clasificaciones de ríos muy parecidas como son trenzado y anastomosado que presentan aquellas particularidades mencionadas.

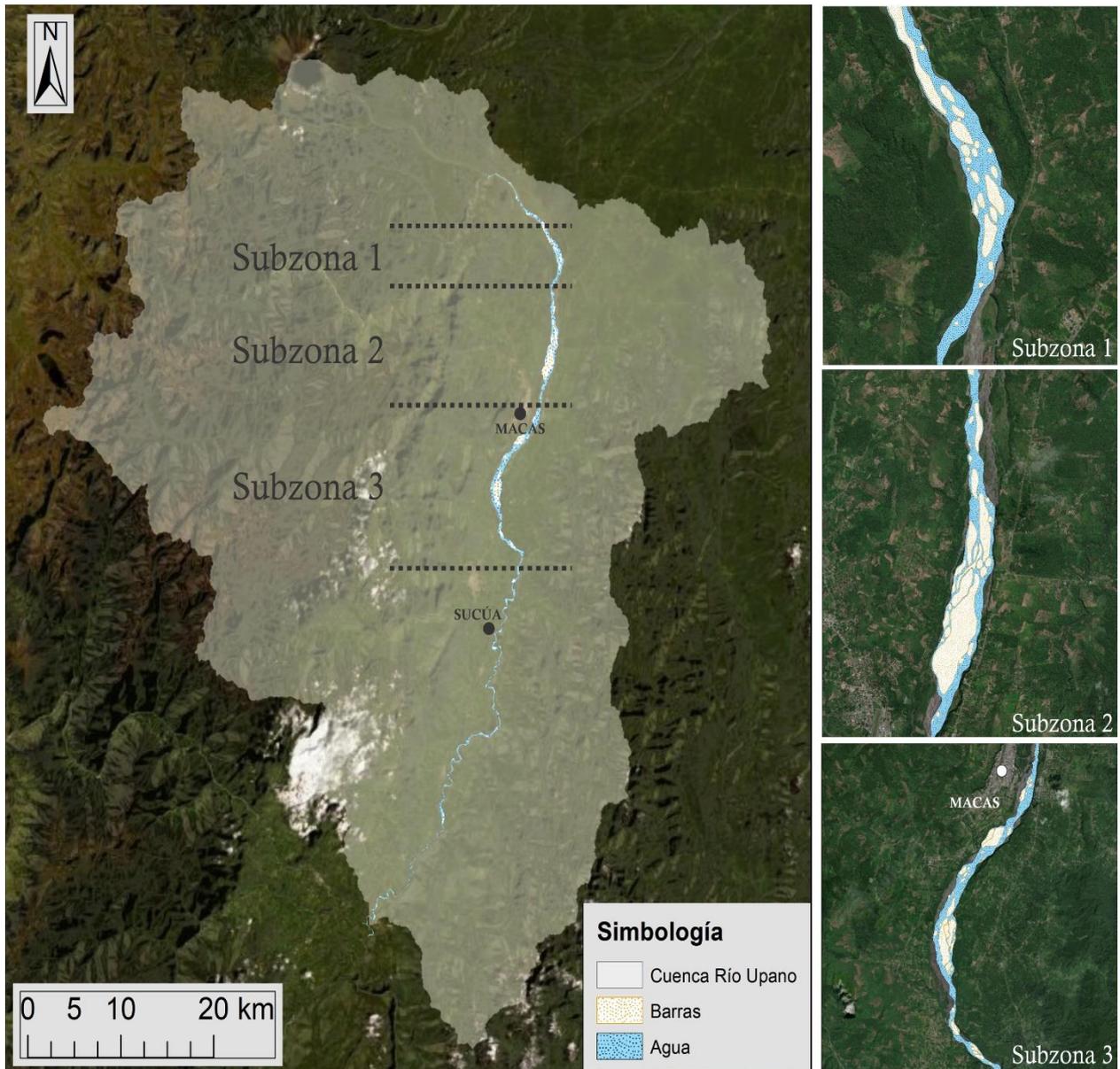


Figura 3.7 Subzonas pertenecientes a la Zona 2. [Autores]

3.2.2.2.1 Subzona 1

La Subzona 1 comprende desde los 8 – 15 km. Según la clasificación de Rosgen, (1996) se define como un río tipo D (trenzado multicanal) ya que la pendiente del perfil

longitudinal del cauce (Figura 3.8) es de 1,85%, manteniendo una configuración de sección transversal similar a la Zona 1.

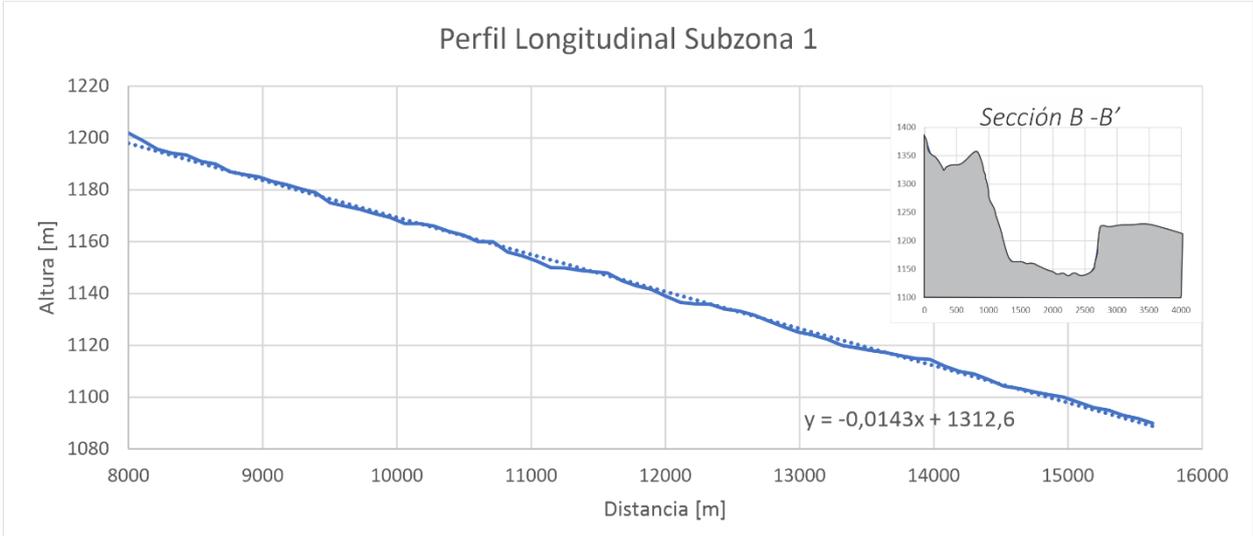


Figura 3.8 Perfil Longitudinal Subzona 1. [Autores]

3.2.2.2.2 Subzona 2

La Subzona 2 comprende desde los 15 – 26 km. Según la clasificación de Rosgen, (1996) se define como un río tipo D (trenzado multicanal) ya que la pendiente del perfil longitudinal del cauce (Figura 3.9) es de 1,64%, presentando una configuración de sección transversal de valle semiencajado a poco encajado.

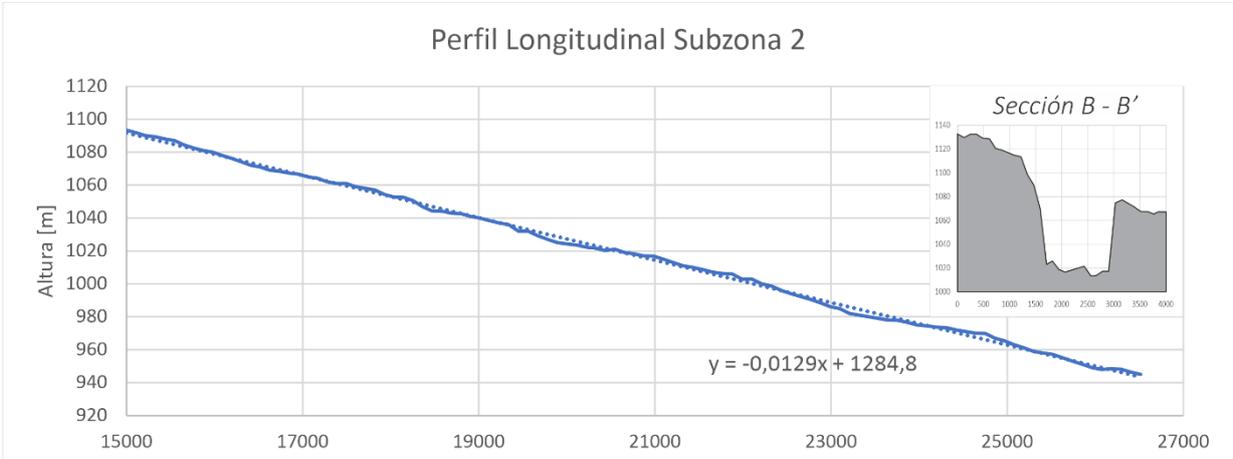


Figura 3.9 Perfil Longitudinal Subzona 2. [Autores]

3.2.2.2.3 Subzona 3

La Subzona 2 comprende desde los 26 – 44 km. Según la clasificación de Rosgen, (1996) se define como un río tipo D (trenzado multicanal) ya que la pendiente del perfil longitudinal del cauce (Figura 3.10) es de 1,27%, presentando una configuración de sección transversal de valle encajado.

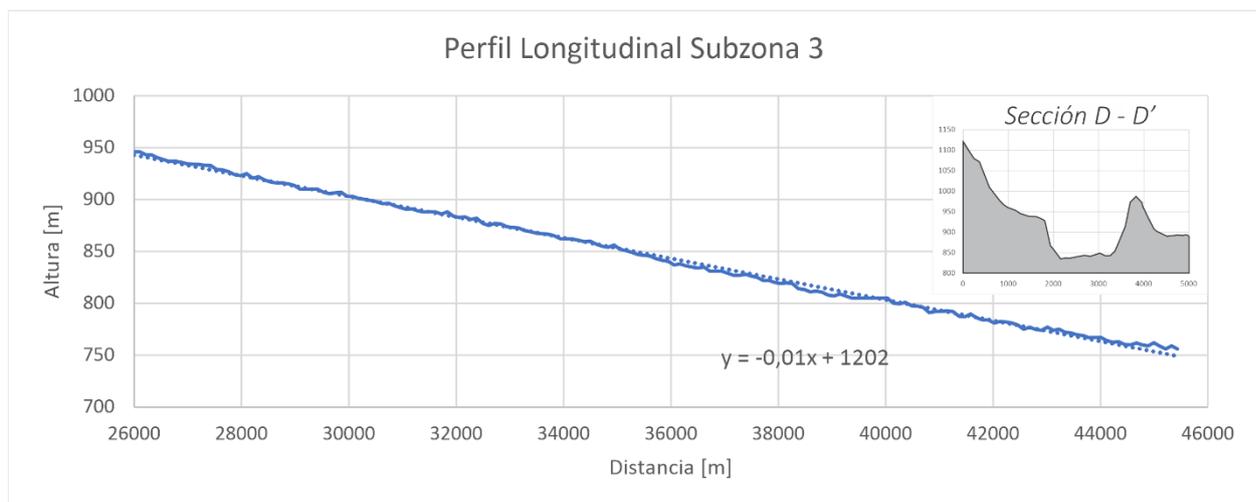


Figura 3.10 Perfil Longitudinal Subzona 3. [Autores]

En comparación con la Zona 1, la Zona 2 presenta barras debido a la disminución de pendiente en un 0,89% (acercándose a la llanura de inundación), que genera que, la acumulación de sedimentos sea mayor ocasionando la aparición de nuevos canales.

3.2.2.3 Zona 3

La Zona 3 comprende desde los 44 km hasta su desembocadura en el río Namangotza. Siendo evidente la presencia de un solo canal, posiblemente a un comportamiento más estable del río en esta zona. Según la clasificación de Rosgen, (1996) el río es de tipo E, meándrico con sinuosidad baja a media (Apéndice 1). En la Figura 3.11 se muestra zonas relevantes de desplazamiento de los meandros en los años 1987 y 2020, adicionalmente, según la tendencia de desplazamiento se denomina al área próxima al

meandro como zona vulnerable a la erosión, este hecho es de suma importancia a la hora de realizar una correcta planificación de ordenamiento territorial en la posteridad.

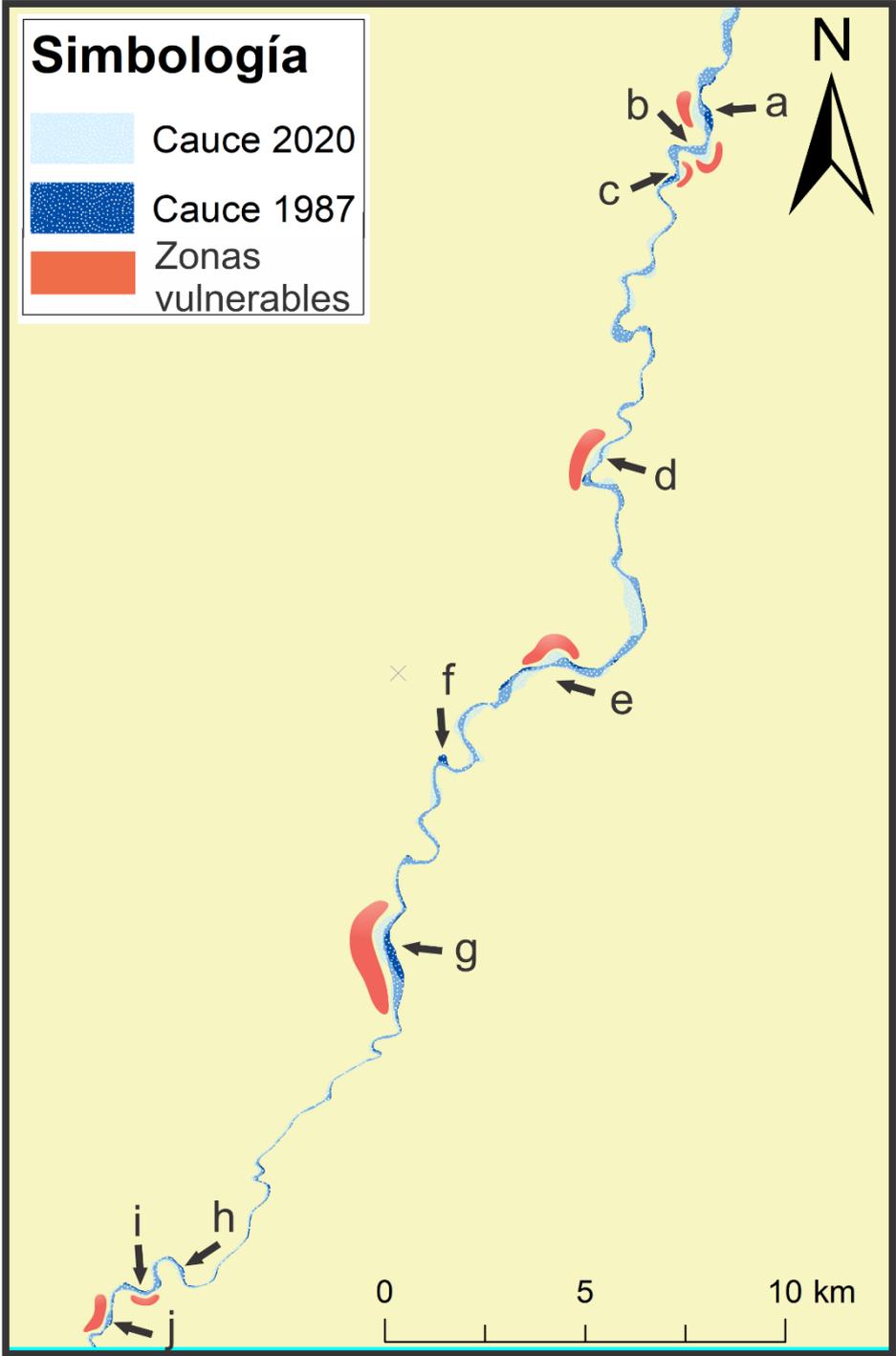


Figura 3.11 Zona 3: Desplazamientos de los meandros años 1987 y 2020. [Autores]

De acuerdo con la Figura 3.11, el valor correspondiente a cada desplazamiento se muestra en la Tabla 3.3

Tabla 3.3 Desplazamientos de los meandros en el período 1987 – 2020. [Autores]

Sección	Desplazamiento [m]	Dirección de Migración
a	177	87° SW
b	56	22° SE
c	300	43° NE
d	122	59° NW
e	80	59° NW
f	120	20° SE
g	175	80° NW
h	100	70° SW
i	235	20° SW
j	112	79° NW

Estos valores reflejan la rapidez con el que el meandro a migrado desde el año 1987 hasta el 2020, el proceso es mayor en aquellas zonas de gran desplazamiento y por tanto se debe considerar en futuros estudios.

3.2.3 Erosión y sedimentación

En este apartado se determinó los eventos de sedimentación/erosión con sus respectivos porcentajes, en la Figura 3.12 se muestra las zonas de erosión y sedimentación para el período 1987 – 1994, aquí se hace un acercamiento al sector correspondiente a la ciudad de Macas (Figura 3.13) para una mejor apreciación visual, sin embargo, los resultados reflejan el total de sedimentación y erosión a lo largo del río Upano hasta su desembocadura en el río Namangotza.

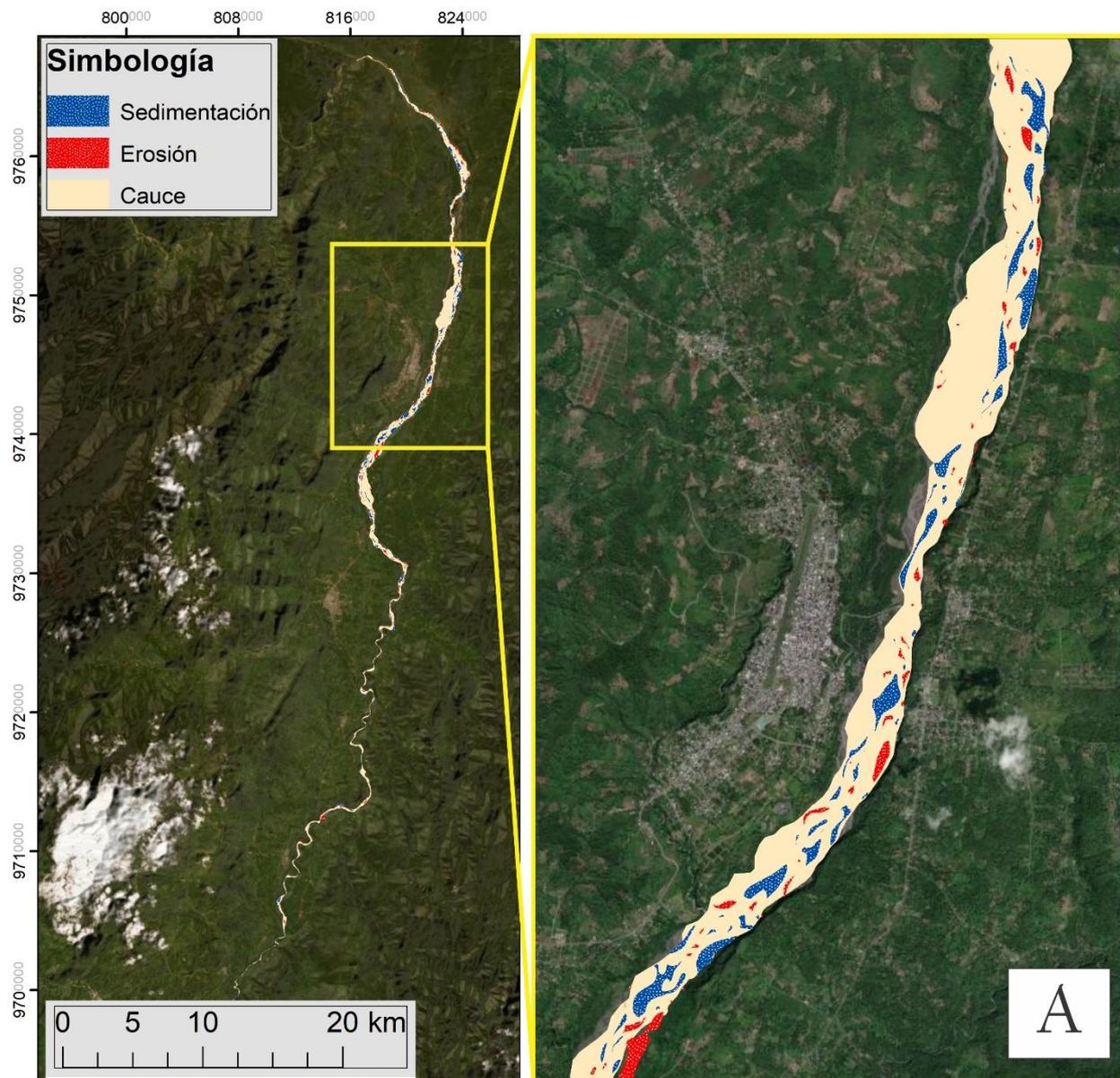


Figura 3.12 Sedimentación/erosión ocurrida desde el año 1987 – 1994, enfocado en el sector Macas. [Autores]

Esta metodología se replicó para los períodos posteriores, los resultados se muestran de manera resumida en la Figura 3.13 y las respectivas descripciones en Tabla 3.4 y 3.5.

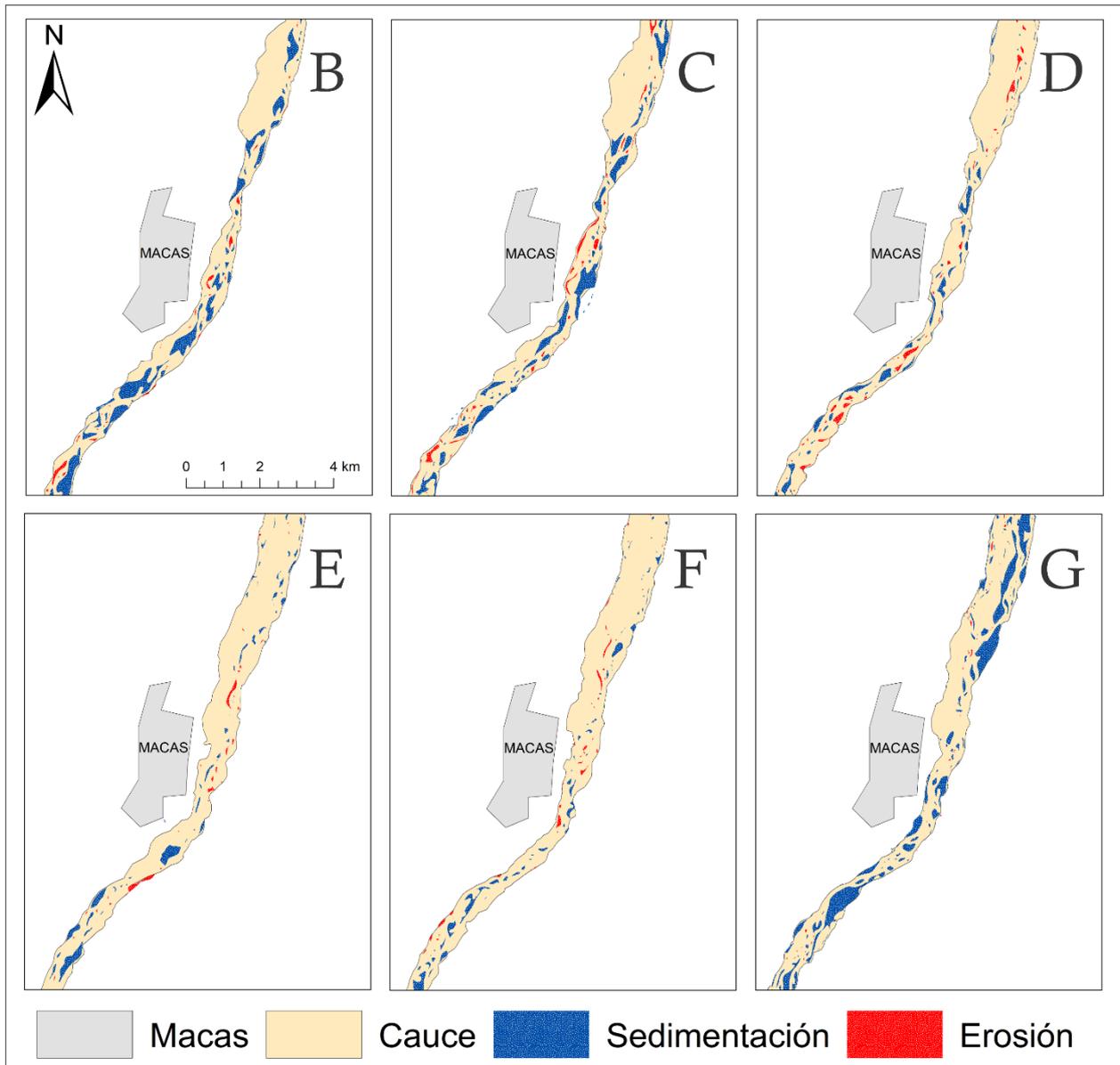


Figura 3.13 Sedimentación/erosión ocurrida desde el año 1994 – 2020, enfocado en el sector Macas. [Autores]

Tabla 3.4 Eventos de Sedimentación/Erosión para el período 1987 – 2020. [Autores]

N°	Período	Erosión (%)	Sedimentación (%)	Figura
1	1987 – 1994	6,36	12,57	A
2	1994 – 1999	2,46	20,61	B

Tabla 3.5 Continuación tabla 3.4

3	1999 – 2006	4,89	16,15	C
4	2006 – 2013	2,64	6,40	D
5	2013 – 2015	1,06	7,61	E
6	2015 – 2017	1,41	3,74	F
7	2017 – 2020	0,39	28,36	G

Para mayor comprensión de los resultados de las tablas 3.3 y 3.4, se realizó un diagrama de barras para los periodos propuestos (Figura 3.14).

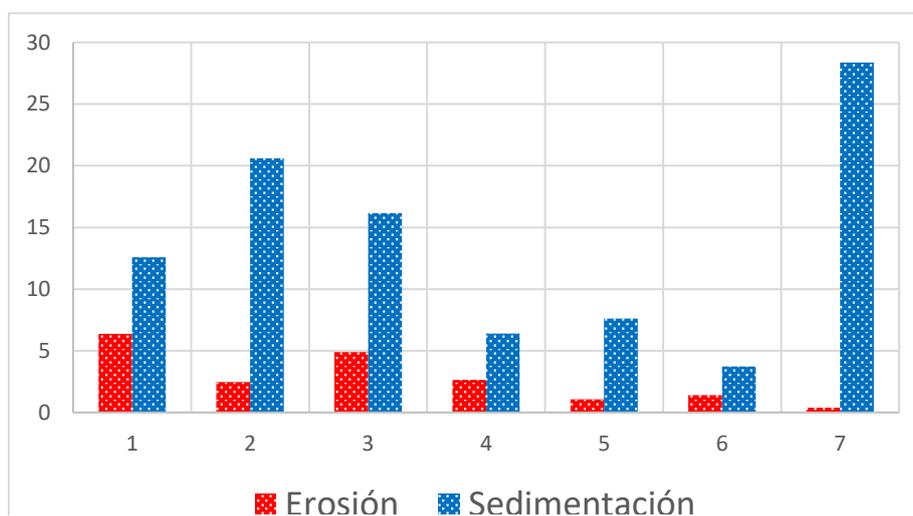


Figura 3.14 Comparación de tasa de sedimentación/erosión para el periodo de estudio. [Autores]

Para los diferentes años la tasa de sedimentación es mayor con relación a la tasa de erosión por lo que la acumulación de sedimentos se da con frecuencia. Es evidente un incremento desmesurado de la sedimentación en el año 2020 debido a la actividad volcánica del Sangay (Figura 3.14).

Los resultados muestran un aumento del 8,04% de la sedimentación para el período 1994 – 1999 a comparación del período anterior, sin embargo para los períodos siguientes la tasa de sedimentación disminuye progresivamente, posiblemente como

respuesta del río para alcanzar su estado de equilibrio hasta el último período, donde existe un aumento repentino del 24,62%, estos sedimentos se suponen son producto del aporte del volcán Sangay a través del río Volcán, lo que desajusta el río Upano completamente, siendo la principal causa de los eventos de crecidas en el presente año.

3.2.4 Serie temporal de sedimentación/erosión

Las series temporales facilitan la observación de los procesos de sedimentación y erosión existentes en el período de estudio. Los índices de sedimentación están basados en el porcentaje de barras existen para cada km del cauce del río (distancia). En la Figura 3.15 se observan los índices del periodo 1987 – 2017 y del 2020.

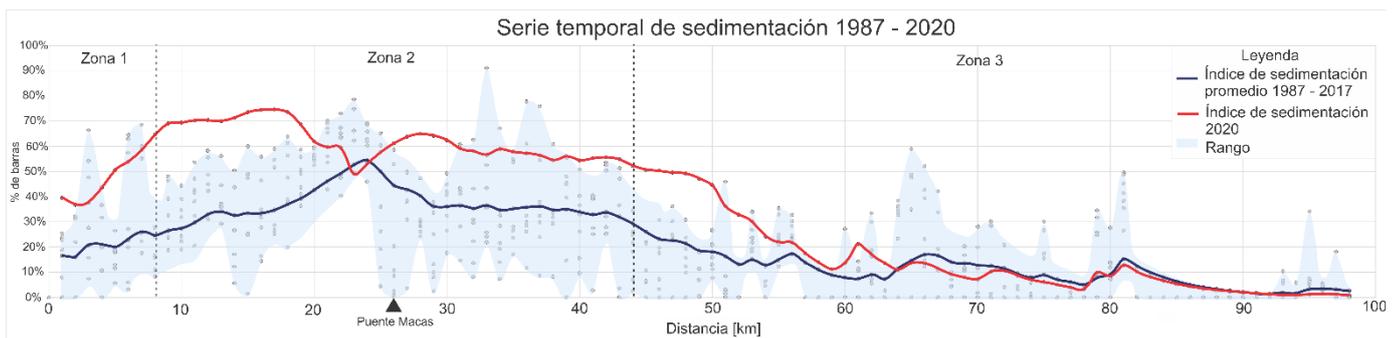


Figura 3.15 Serie temporal de sedimentación 1987 – 2020. [Autores]

Los índices de sedimentación reflejan la tendencia o comportamiento del río en relación con la acumulación de sedimentos a través del tiempo. Para este caso, se colocó zonas en relación con la clasificación del río (sección 3.2.1.).

Para la zona 1, comprendida desde el tramo de 0 – 8 km, el índice de sedimentación es mayor en el año 2020 a diferencia del índice promedio del periodo 1987 – 2017 por lo que se puede inferir que el aporte de sedimentos fue mayor o que el río en esta zona no

presentó la suficiente energía para transportarlos (represamiento) y esto se puede deber a la influencia de los productos volcánicos del Sangay.

La zona 2 se encuentra comprendida desde el tramo de los 8 – 44 km. En esta zona, a los 26 km, se sitúa el puente de la vía Macas – Puyo, sumándole otro factor que afecta al comportamiento del río. Se observa una tendencia, antes del puente el porcentaje de barras aumenta y después de este, el porcentaje de las barras tiende a disminuir, esto se puede relacionar con las pendientes de las zonas, ya que en esta zona se va acercando a la llanura aluvial. Otra suposición es que, la presencia del puente actúa como un embudo o barrera, que impide el transporte de sedimentos lo cual ocasiona la disminución del ancho del río y la ralentización de la propia dinámica fluvial.

Para la zona 3, comprendida desde el tramo de los 44 km en adelante. Existe sedimentación, pero en menor magnitud. A los 56 km en adelante, se puede observar que, la presencia de las barras tanto para el año 2020 y el promedio de 1987 – 2017 son parecidas (tendencia constante) por lo que se puede pensar que el aporte de sedimentos del volcán junto con los sedimentos que venían siendo arrastrados han llegado hasta ese punto.

3.3 Caso de estudio: Puente Macas – Puyo.

En este apartado enfocaremos la atención hacia las implicaciones que el río Upano tiene sobre el puente de la vía Macas – Puyo, para ello, el análisis anterior sirvió como un medio para contrastar aquellos factores que influyen directamente sobre este.

En la sección 3.1 se analizó los parámetros asociados a la cuenca del río Upano, donde se clasificó como una cuenca de entorno montañoso, de sexto orden y bien drenada, sin embargo debido a la ubicación geográfica ligada a eventos de abundante precipitación (4000 a 5000 mm) hacen que el río tenga un comportamiento inestable con tendencia a presentar intensas crecidas, lo que junto a su erosionabilidad hacen que el arrastre de sedimentos sea en mayor magnitud haciendo de este río poco controlable

por el hombre. A esto se suma también los sedimentos producto de la erosión de los flujos piroclásticos que el volcán Sangay aporta a través del río Volcán al Upano haciendo que el aporte de sedimentos en los últimos años sea mayor de lo que debería.

El puente en cuestión se ubica en la zona 2, subzona 3, y tiene la tarea de soportar el aumento de caudal (debido a las altas precipitaciones) y grandes cargas sedimentarias (debido a la influencia del volcán Sangay) sección 3.2.3, sin embargo, como toda obra civil, al verse superado las especificaciones de diseño, llevó al colapso parcial de la misma (Figura 3.16 a)

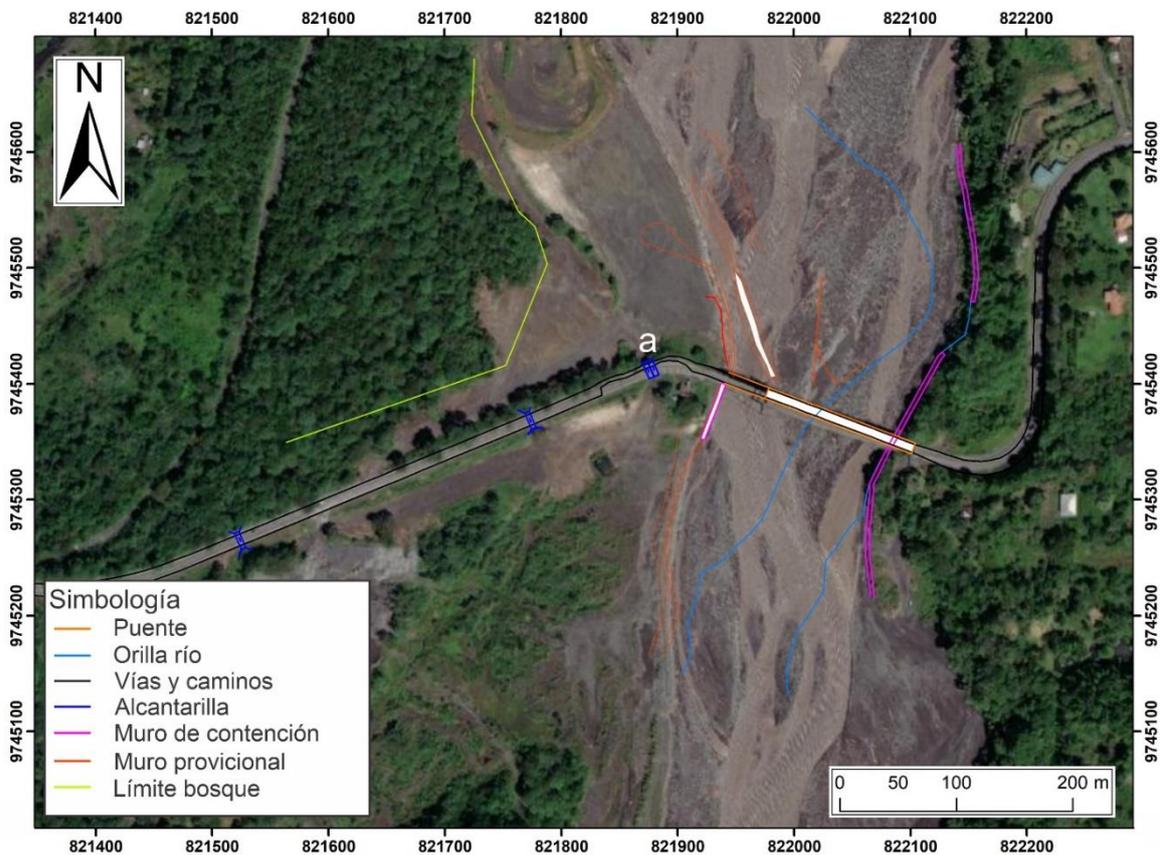


Figura 3.16 Mapa de la vía Macas – Puyo [Autores]

En esta misma Figura se puede observar un comportamiento anómalo, semejando en la parte anterior al puente a un cono, haciendo de el puente un embudo artificial (Sección 3.2.4), lo que dificulta la tarea del río de llevar toda la carga fluvial y sedimentaria. En

este caso es lógico, que el río busque rutas alternas a la que se le ha impuesto, continuando su camino desbordado hacia los lados y logrando destruir la alcantarilla antes mencionada.

Un último factor a tener en cuenta puede ser la incorrecta explotación de material del cauce del río, ya que gran parte se encuentra concesionada para el libre aprovechamiento y minería artesanal (Figura 3.17), esto junto a la falta de muros de contención en la parte oeste del puente puede ser causante de que el río tome esta dirección a la hora de desbordes por crecidas.

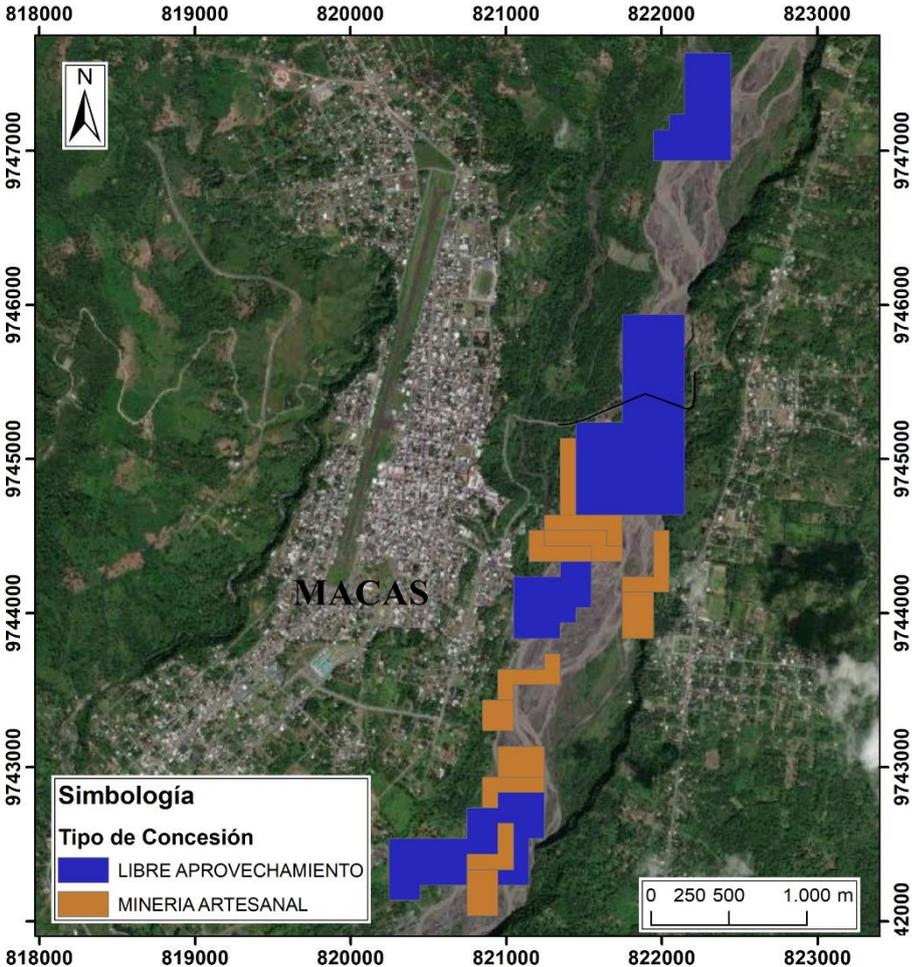


Figura 3.17 Áreas concesionadas alrededor de la vía Macas – Puyo.
[Autores]

3.4 Error Tasseled Cap

Al manejar un método automatizado como es el proceso de Tasseled Cap, es evidente que existen errores ligados al proceso, en este apartado se cuantificará en porcentaje el error del método empleado, para que el lector tenga conocimiento de este, y si considerase el empleo de este para futuros trabajos.

En la Figura 3.16 se puede observar la diferencia entre realizar el trabajo a través de Tasseled Cap y el realizado manualmente a criterio del operador, al comparar las áreas entre ambos casos, se encontró que el porcentaje de compatibilidad del método empleado es del 77,28%, teniendo como porcentaje de error el 22.72

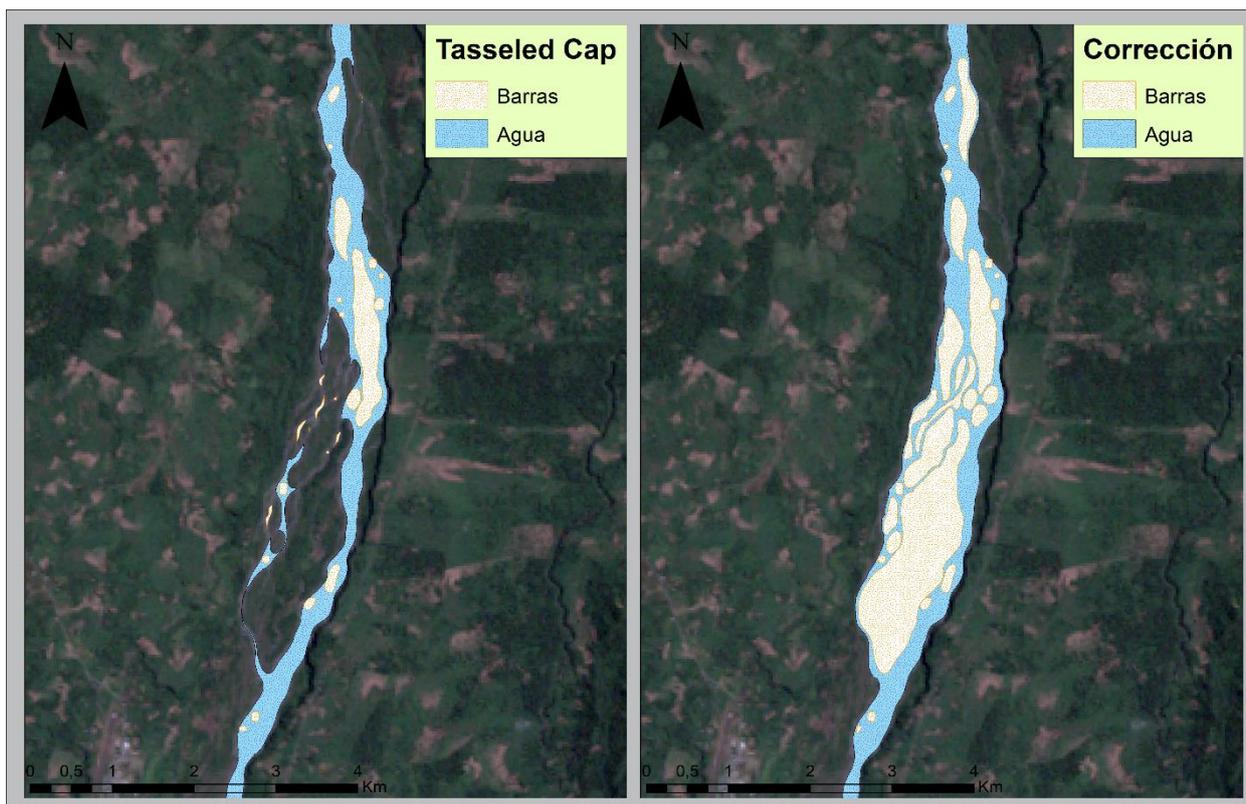


Figura 3.18 Comparación entre método Tasseled Cap y de forma manual por el operador
[Autores]

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- La cuenca del río Upano es una cuenca de tipo valle, con área extensa, rodeada de sistemas montañosos con fuertes pendientes y una densidad de drenaje alta debido a su sexto orden. Por otra parte, las relaciones de los índices de la forma determinaron que la cuenca es alargada rectangular y que, por la presencia de altas precipitaciones es capaz de generar grandes crecidas produciendo una erosionalidad alta. La dinámica fluvial de la cuenca está limitada y controlada por las particularidades morfológicas del sistema fluvial y de su capacidad de escurrimiento.
- El entendimiento del control y el efecto que tienen los parámetros morfológicos en la reacción hidrológica permite suponer de forma anticipada las cualidades de dicha reacción, y resulta ser de vital valor con respecto a cuencas que carecen de estudios hidrológicos o que poseen una escasa base de datos.
- El análisis de la caracterización hidrogeomorfológica tiene su importancia para la revaloración de diseños hidrológicos e hidráulicos de construcciones destinadas al control de desbordamientos y procesos de sedimentación, sirviendo además de base y apoyo para estudios de vulnerabilidad.
- El índice que sirvió de base para la extracción de este río fue el NDVI que, en conjunto con la herramienta Tasseled Cap (filtrado), dio como resultado un río más definido y completo a pesar de ser un indicador de vegetación en comparación al NDWI y MNDWI
- El aporte de sedimentos hacia el cauce del río Upano, son provenientes de los productos volcánicos de Volcán Sangay, derivados también por las frecuentes e intensas precipitaciones de la zona. No obstante, el papel que juega la pendiente del perfil longitudinal del cauce es importante y da indicios del tipo de valle, en este caso de tipo encajado de paredes abruptas por lo que influenciaría en el incremento de las partículas de sedimentos.

- El índice de barras que se propuso en este trabajo permitió la comparación del porcentaje de barras evidenciando los posibles procesos de sedimentación y erosión presentes en los años de interés que influyen directamente en el puente de la vía Macas – Puyo.
- En la zona 1, se observan porcentajes de barras mayores debido a que está influenciado por los sedimentos del río Volcán que a su vez procede del volcán Sangay lo que provoca el represamiento de sus aguas afectando la escorrentía y su capacidad de transportar material que por ende generan mayor acumulación de estos.
- En la zona 3, se puede observar que las variaciones en el porcentaje de barras llegan a ser insignificantes, con tendencia a permanecer constantes, sugiriendo un proceso de equilibrio, el cual, puede ser ocasionado por la estabilidad del flujo con la que transporta los sedimentos.
- El método propuesto para la determinación del cauce principal permitió definirlo sin embargo no garantiza una efectividad alta debido a que no se consideró la profundidad de aquellas áreas por falta de datos, verificación de campo y alcance del proyecto.
- A mayor porcentaje de barras, mayor sedimentación debido a factores como la disminución de pendiente, aumento de aporte sedimentario y disminución de la energía del río.
- El error obtenido en el análisis comparativo del método Tasseled Cap y manual para la extracción del río de los diferentes años fue del 22,72%, a pesar de representar un valor alto de error, facilita el procesamiento para ríos de gran extensión mientras que, para ríos de poca extensión, la extracción manual sería la mejor opción.

Recomendaciones

- Es necesario bajo el análisis realizado en el presente documento considerar la reubicación del puente, o, en su defecto tomar medidas que permitan al río mantener su equilibrio, ya que puede estar expuesto a eventos en los que no solo una parte sea colapsada, en el peor de los casos, todo el puente, quedando expuestas vidas de ciudadanos que utilizan esta vía como medio de transporte.
- Es de suma importancia mantener un control de calidad de aquellas concesiones que se encuentran en la zona, ya que el mal funcionamiento de las mismas, acelerarían procesos de destrucción a la infraestructura del puente.
- Las herramientas de los softwares de SIG facilitaron la obtención de información necesaria para realizar el presente proyecto por lo que es fundamental la continua investigación para un mejor empleo de estas.
- Para la obtención y corroboración de datos es necesario las visitas al campo, por lo que te permiten discriminar o agregar información que solo el trabajo en oficina no brinda, provocando arrastre de error en los diferentes cálculos.
- Al existir varios autores que definen la ecuación del tiempo de concentración se requiere un análisis en conjunto, para posteriormente seleccionar la que mejor ajuste tenga según el caso de estudio.
- Para implementar nuevos métodos de determinación de parámetros de interés, es necesario contar con los recursos necesario para asegurar que tenga validez, caso contrario se generará información errónea.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguirre, N. (2007). *Manual para el manejo sustentable de cuencas hidrográficas*. 117.
- Alekseevskiy, N. I., Berkovich, K. M., & Chalov, R. S. (2008). *Erosion, sediment transportation and accumulation in rivers*. 23(2), 93–105.
<https://indicadores.pr/organization/autoridad-de-energia-electrica>
- Andrade, C. B. De, Maria, L., Oliveira, M. De, Augusto, J., & Omena, M. (2018). Avaliação de índices de vegetação e características fisiográficas no Sertão Pernambucano. *Revista Brasileira de Meio Ambiente*, 107, 97–106.
- Aramburu Maqua, M. P., Escribano Bombín, R., Aguiló, M., Abaladejo, J., Carrasco, R., Catillo, V., Ceñal, M. Á., Cifuentes, M., Cifuentes, P., Cristóbal López, M. Á., Martín Duque, J. F., Glaría Galcerán, G., González Alonso, S., González Barberá, G., Iglesias Gómez, J., Iglesias del Pozo, E., López de Diego, L. Á., Martín Llorente, F., Martínez- Mena García, M., ... Valero Huete, F. (2014). Guía para la Elaboración de Estudios del Medio Físico. In *Guía para la Elaboración de Estudios del Medio Físico*. http://oa.upm.es/55224/1/Guia_para_la_elaboracion_de_estudios_del_medio_fisico_2.pdf
- Arango, M., Branch, J., & Botero, V. (2005). Clasificación no supervisada de coberturas vegetales sobre imágenes digitales de sensores remotos: “LANDSAT– ETM+.” *Facultad Nacional de Agricultura Medellín*, 58(1), 2611–2634.
- Baby, P., Rivadeneira, M., & Barragán, R. (2014). *La Cuenca Oriente: Geología y Petróleo* (3ra edición).
- Baby, P., Rivadeneira, M., Barragán, R., & Christophoul, F. (2013). Thick-skinned tectonics in the Oriente foreland basin of Ecuador. *Geological Society Special Publication*, 377(1), 59–76. <https://doi.org/10.1144/SP377.1>
- Baldock, J. W. (1982). *Geología del Ecuador* (M. de R. N. Energéticos & D. G. de G. y Minas (eds.)).
- Bautista, F., Palacio, J. L., Delfín, H., & Delgado, M. del C. (2004). Técnicas de muestreo para manejadores de recursos naturales. In *Técnicas de muestreo para manejadores de recursos naturales* (1st ed.). CONACYT. <https://doi.org/10.22201/ciga.9786070221279p.2011>
- Benitez, S. (1995). Évolution géodynamique de la province côtière sud-équatorienne au

Crétacé supérieur-Tertiaire Stalin Benitez To cite this version : HAL Id : tel-00542421
Évolution géodynamique de la province côtière sud-équatorienne au Crétacé
supérieur-Tertiaire The geo. *Géologie Appliquée*.

- Bertalanffy, L. von. (1968). General System Theory. In *George Braziller, Inc.* (Issue 1).
<https://doi.org/10.17059/2011-4-28>
- Charlton, R. (2008). Fundamentals of fluvial geomorphology. In *Fundamentals of Fluvial
Geomorphology*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203371084>
- Chow, V. Te, Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). Applied hydrology. In B. . Clark &
M. John (Eds.), *Applied Hydrology*. McGraw-Hill International Editions.
- Christophoul, F., Baby, P., & Dávila, C. (2002). Stratigraphic responses to a major
tectonic event in a foreland basin: The Ecuadorian Oriente Basin from Eocene to
Oligocene times. *Tectonophysics*, 345(1–4), 281–298.
[https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(01\)00217-7](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(01)00217-7)
- Church, M. (2002). Geomorphic thresholds in riverine landscapes. *Freshwater Biology*,
47(4), 541–557. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.2002.00919.x>
- Conesa, C. (1999). Cambio ambiental y equilibrio dinámico de los cauces. *Papeles de
Geografía*, 30, 31–46.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=105605&info=resumen&idioma=SPA>
- CONGOPE, & BID. (2019). *Plan de Desarrollo Vial Integral de la Provincia de Morona
Santiago*.
- Dashwood, M. F., & Abbotts, I. L. (1990). Aspects of the petroleum geology of the Oriente
Basin, Ecuador. *Geological Society Special Publication*, 50(50), 89–117.
<https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1990.050.01.06>
- Diario El Telégrafo. (2021). *La vía Macas - Puyo está cerrada por desbordamiento de río
Upano*. <https://www.eltelegrafo.com.ec/noticias/actualidad/44/la-via-macas-puyo-esta-cerrada-por-desbordamiento-del-rio-upano>
- Eastman, R. (2012). IDRISI Selva. Guía para SIG y procesamiento de imágenes. *Clark
University*, 53(9), 321.
- Faucher, B., Benites, S., & Savoyat, E. (1975). *Esquema Geológico de los Andes*

Ecuadorianos.

- Feininger, B. T., & Bristow, C. R. (1980). Cretaceous and Paleogene Geologic History of Coastal Ecuador. *Geologisches Rundschau*, 849–874.
- García, C. C., & Cutillas, P. P. (2014). Alteraciones geomorfológicas recientes en los sistemas fluviales mediterráneos de la península ibérica. Síntomas y problemas de incisión en los cauces. *Revista de Geografía Norte Grande*, 2014(59), 25–44. <https://doi.org/10.4067/s0718-34022014000300003>
- González, N., & Mirabetty, J. (2015). *Caracterización hidrológica, hidráulica y sanitaria de una cuenca. Caso quebrada Chacaíto del Municipio Chacao estado Miranda*. Universidad Católica Andrés Bello.
- Gutiérrez, E. G., Horton, B. K., Vallejo, C., Jackson, L. J., & George, S. W. M. (2019). Provenance and geochronological insights into Late Cretaceous-Cenozoic foreland basin development in the Subandean Zone and Oriente Basin of Ecuador. In *Andean Tectonics*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-816009-1.00011-3>
- Horton, B. K. (2018). Sedimentary record of Andean mountain building. *Earth-Science Reviews*, 178(December 2017), 279–309. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.11.025>
- Horton, R. E. (1932). Drainage-basin characteristics. *Transactions American Geophysical Union*, 13(1), 350–361. <https://doi.org/10.1029/TR013i001p00350>
- Hughes, R. A., & Pilatasig, L. F. (2002). Cretaceous and tertiary terrane accretion in the Cordillera Occidental of the Andes of Ecuador. *Tectonophysics*, 345(1–4), 29–48. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(01\)00205-0](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(01)00205-0)
- Ibáñez, J., Fuster, R., Mancilla, G., De la Fuente, A., & Silva, K. (2013). Guía análisis y zonificación de cuencas hidrográficas para el ordenamiento territorial. In *Red Madrileña de Lucha contra la Pobreza y la Exclusión Social EAPN* (1st ed.). Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo.
- Jaillard, E., & Soler, P. (1996). Cretaceous to early Paleogene tectonic evolution of the northern Central Andes (0-18°S) and its relations to geodynamics. *Tectonophysics*, 259(1-3 SPEC. ISS.), 41–53. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(95\)00107-7](https://doi.org/10.1016/0040-1951(95)00107-7)
- James, M. R., & Robson, S. (2012). Straightforward reconstruction of 3D surfaces and

- topography with a camera: Accuracy and geoscience application. *Journal of Geophysical Research*, 117(June), 1–17. <https://doi.org/10.1029/2011JF002289>
- Jardí, M. (1985). Forma de una cuenca de drenaje. Analisis de las variables morfométricas que nos la definen. *Revista de Geografía*, 19(1), 41–68. <https://www.raco.cat/index.php/RevistaGeografia/article/viewFile/45789/56812>
- Legrand, D., Baby, P., Bondoux, F., Dorbath, C., Bés de Berc, S., & Rivadeneira, M. (2005). The 1999 – 2000 seismic experiment of Macas swarm (Ecuador) in relation with rift inversion in Subandean foothills. *Tectonophysics*, 395, 67–80. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2004.09.008>
- Leopold, L. B., & Wolman, M. G. (1970). River Channel Patterns: Braided, Meandering and Straight. *Rivers and River Terraces*, 197–237. https://doi.org/10.1007/978-1-349-15382-4_8
- Linsley, R. K., Kohler, M. A., & Paulhus, J. L. H. (1949). *Applied hydrology*. McGraw-Hill.
- Litherland, M., Aspden, J. A., & Jemielita, R. A. (1994). *The metamorphic belts of Ecuador* (S. G. Británico (ed.)).
- Maldonado, D. (2016). *Análisis De La Geomorfología Fluvial En El Río Coca En El Periodo 1969 - 2016: Influencia De Eventos Geodinámicos Y Antrópicos* [ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL]. https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/17177?fbclid=IwAR18nQLbRf05WMN4QVONcATF0W9sanr42SsA-ScfsuZ8894eIJs_9J6E7fU
- Margalef, R. (1978). *Perspectivas de la teoría ecologica*.
- Martin-Gombojav, N., & Winkler, W. (2008). Recycling of proterozoic crust in the andean amazon foreland of Ecuador: Implications for orogenic development of the Northern Andes. *Terra Nova*, 20(1), 22–31. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.2007.00782.x>
- McGroder, M. F., Lease, R. O., & Pearson, D. M. (2015). Along-strike variation in structural styles and hydrocarbon occurrences, Subandean fold-and-thrust belt and inner foreland, Colombia to Argentina. *Memoir of the Geological Society of America*, 212(05), 79–113. [https://doi.org/10.1130/2015.1212\(05\)](https://doi.org/10.1130/2015.1212(05))
- Miller, V. . (1953). *A quantitative geomorphic study of drainage basin characteristics in the Clinch Mountain area, Virginia and Tennessee*.

- Muñoz, E. M. (2009). *Propuesta metodológica para el reconocimiento funcional de los sistemas fluviales. Una base para su aplicación en la toma de decisiones: Vol. I.* Universidad de Castilla-La Mancha.
- Núñez del Arco, E. (2003). *Geología del Ecuador.*
- Olaya, V. (2014). *Sistemas de Información Geográfica.*
- Ollero, A., Acín, V., Díaz, E., Granado, D., & Horacio, J. (2011). Innovación Y Libertad Fluvial. *VII Congreso Ibérico Sobre Gestión y Planificación Del Agua "Ríos Ibéricos +10. Mirando Al Futuro Tras 10 Años de DMA,"* 1–15.
- Ollero, Alfredo, & Sánchez, M. (2007). Función, problemática y restauración de ríos y riberas. *River Restoration, January 2007,* 61–83.
- Parsons, M., Thoms, M., Capon, T., Capon, S., & Reid, M. (2009). Resilience and thresholds in river ecosystems. In *Waterlines Report Series* (Vol. 2020, Issue 21).
- Petts, G. E., & Amoros, C. (1996). The Fluvial Hydrosystems. In *The Fluvial Hydrosystems*. Chapman & Hall. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-1491-9>
- Primicias. (2020). *Alerta por desbordamiento del río Upano en Morona Santiago.* <https://www.primicias.ec/noticias/lo-ultimo/alerta-desbordamiento-rio-upano-morona/>
- Ramírez, D., & Pardo, L. (2018). *Estudio geomorfológico y de resistencia a la erosión fluvial del suelo en el Río Guaviare , tramo : Río Inírida y Río Atabapo* [Universidad de La Salle]. https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_civil/358?utm_source=ciencia.lasalle.edu.co%2Fing_civil%2F358&utm_medium=PDF&utm_campaign=PDFCoverPages
- Rees, W. . (2001). *Physical Principles of Remote Sensing* (2nd ed.). Cambridge University Press.
- Robert, A. (2003). River Processes: An Introduction to Fluvial Dynamics. In *Geomorphology*. ARNOLD. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.08.008>
- Romeuf, N., Aguirre le Bert, L., Soler, P., Féraud, G., Jaillard, E., & Ruffet, G. (1995). Middle Jurassic volcanism in the Northern and Central Andes. *Revista Geológica de Chile: An International Journal on Andean Geology*, 22(2), 245–259. <https://doi.org/10.5027/andgeoV22n2-a08>

- Rosgen, D. L. (1994). A classification of natural rivers. *Catena*, 22, 169–199.
https://wildlandhydrology.com/resources/docs/StreamClassification/Rosgen_1994_A_Classification_of_Natural_Rivers.pdf
- Rostain, S. (2012). Between Sierra and Selva : Landscape transformations in upper Ecuadorian Amazonia. *Quaternary International*, 249, 31–42.
<https://doi.org/10.1016/j.quaint.2011.08.031>
- Rostain, S., & De Saulieu, G. (2019). El Pastza y el Upano, dos ríos tropicales que conectan los Andes a la Amazonía. *Revista Del Museo de La Plata*, 4, 353–384.
- Ruiz, G. M. H., Seward, D., & Winkler, W. (2004). Detrital thermochronology - A new perspective on hinterland tectonics, an example from the Andean Amazon Basin, Ecuador. *Basin Research*, 16(3), 413–430. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2117.2004.00239.x>
- Ruiz, G. M. H., Seward, D., & Winkler, W. (2007). Chapter 36 Evolution of the Amazon Basin in Ecuador with Special Reference to Hinterland Tectonics: Data from Zircon Fission-Track and Heavy Mineral Analysis. *Developments in Sedimentology*, 58(07), 907–934. [https://doi.org/10.1016/S0070-4571\(07\)58036-2](https://doi.org/10.1016/S0070-4571(07)58036-2)
- Schumm, S. A. (2005). *River Variability and Complexity*. Cambridge University Press.
- Singh, K. V., Setia, R., Sahoo, S., Prasad, A., & Pateriya, B. (2015). Evaluation of NDWI and MNDWI for assessment of waterlogging by integrating digital elevation model and groundwater level. *Geocarto International*, 30(6), 650–661.
<https://doi.org/10.1080/10106049.2014.965757>
- Spikings, R., Cochrane, R., Villagomez, D., Lelij, R. Van Der, Vallejo, C., Winkler, W., & Beate, B. (2014). The geological history of northwestern South America : From Pangaea to the early collision of the Caribbean Large Igneous Province (290 – 75 Ma) The geological history of northwestern South America : from Pangaea to the early collision of the Caribbean. *Gondwana Research*, September 2018, 45.
<https://doi.org/10.1016/j.gr.2014.06.004>
- Stevaux, J. C., & Latrubesse, E. M. (2017). *Geomorfología fluvial* (1º). OFICINA DE TEXTOS.
- Strahler, A. N. (1957). Quantitative Analysis of Watershed Geomorphology. *Transactions*,

- American Geophysical Union*, 38(6), 913–920.
- Suarez, J. D. (1998). *Deslizamientos y Estabilidad Taludes en Zonas Tropicales*. Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos.
- Swanson, F. J., Jones, J. A., Crisafulli, C. M., & Lara, A. (2013). Effects of Volcanic and Hydrologic Processes on Forest Vegetation: Chaitén Volcano, Chile. *Andean Geology*, 40(2), 1–33.
- Tapia, J. (2019). *Levantamiento Geológico, estratigráfico y estructural de la Parroquia Macas*. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- Toapaxi, J., Galiano, L., Castro, M., Hidalgo, X., & Valencia, N. (2015). Análisis de la Socavación en Cauces Naturales. *Revista Politécnica*, 35(3), 1–11. https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_civil/358?utm_source=ciencia.lasalle.edu.co%2Fing_civil%2F358&utm_medium=PDF&utm_campaign=PDFCoverPages
- Toro Álava, J., & Jaillard, E. (2005). Provenance of the Upper Cretaceous to upper Eocene clastic sediments of the Western Cordillera of Ecuador: Geodynamic implications. *Tectonophysics*, 399(1-4 SPEC. ISS.), 279–292. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2004.12.026>
- Tristan, P. M., Wainschenker, R. S., & Doorn, J. H. (2008). Normalización de Imágenes Satelitales en el Análisis Multi-Temporal. *X Workshop de Investigadores En Ciencias de La Computación*, 1, 315–319.
- Tschopp, H. J. (1953). OIL EXPLORATIONS IN THE ORIENTE OF ECUADOR , 1938-1950. *Bulletin of The American Association of Petroleum Geologists*, 37(10), 2303–2347.
- Villagomez, D. (2003). *Evolución Geológica Plio-cuaternaria del Valle Interandino Central en Ecuador (zona de Quito-Guayllabamba-San Antonio de Pichincha)*. [Escuela Politécnica Nacional]. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.18366.43843>
- Villota, H. (2005). Geomorfología Aplicada a Levantamientos Edafológicos y zonificación Física de Tierras. In *Instituto Geográfico Agustín Codazzi* (Vol. 2).
- Volonté, A. (2017). *Geomorfología fluvial aplicada al peligro de crecidas. Cuenca del arroyo San Bernardo, Sistema de Ventania, Argentina*. Universidad Nacional del Sur.
- Williams, R. D. (2012). DEMs of Difference. *ResearchGate*, 2047–0371, 1–17.

- Winkler, W., Villagómez, D., Spikings, R., Abegglen, P., Tobler, S., & Egüez, A. (2005). The Chota basin and its significance for the inception and tectonic setting of the inter-Andean depression in Ecuador. *Elsevier*, 19, 5–19. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2004.06.006>
- Wolaver, B. D., Coogan, J. C., Horton, B. K., Bermudez, L. S., Sun, A. Y., Wawrzyniec, T. F., Zhang, T., Shanahan, T. M., Dunlap, D. B., Costley, R. A., & De La Rocha, L. (2015). Structural and Hydrogeologic evolution of the Putumayo basin and adjacent fold-thrust belt, Colombia. *AAPG Bulletin*, 99(10), 1893–1927. <https://doi.org/10.1306/05121514186>
- Xu, H. (2006). Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27(14), 3025–3033. <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>
- Zingaretti, V. (2019). *Evolución geomorfológica del río Blanco Este después de erupciones del volcán Calbuco (Sur Chile)*. Universidad Austral de Chile.

APÉNDICES

Apéndice 1. Cálculo del radio de curvatura (RC), Índice de sinuosidad (IS) y Sinuosidad de la zona 3 (Sección 3.2.2.3).

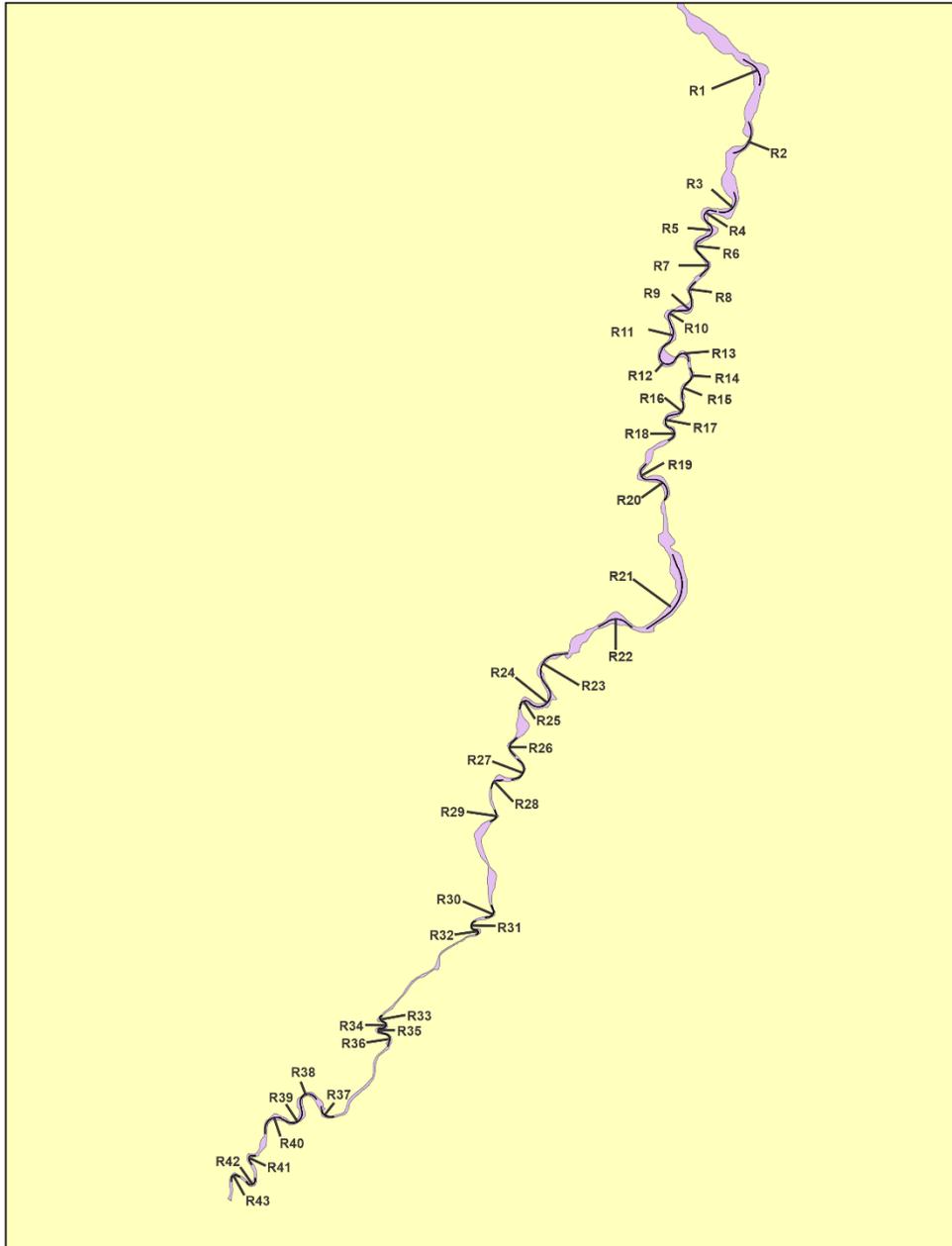


Figura 4.1 Radio de curvatura correspondiente a la zona 3. [Autores]

Tabla 4.1 Calculo de sinuosidad zona 3

R	RC	IS	Sinuosidad
1	579,72	1,11	Baja
2	668,09	1,17	Baja
3	409,12	1,28	Baja
4	196,70	1,70	Moderada
5	215,98	1,33	Moderada
6	204,27	1,35	Moderada
7	190,15	1,28	Baja
8	211,82	1,12	Baja
9	175,06	1,11	Baja
10	194,37	1,31	Moderada
11	420,30	1,14	Baja
12	255,16	2,04	Alta
13	176,69	1,42	Moderada
14	292,21	1,11	Baja
15	520,03	1,06	Baja
16	261,71	1,20	Baja
17	203,57	1,39	Moderada
18	188,24	1,38	Moderada
19	210,76	1,60	Moderada
20	409,62	1,30	Baja
21	1211,48	1,16	Baja
22	494,35	1,12	Baja
23	542,42	1,37	Moderada
24	374,38	1,52	Moderada
25	160,71	1,39	Moderada
26	200,75	1,25	Baja
27	302,85	1,39	Moderada

Tabla 4.2 Continuación Tabla 4.1

28	181,57	1,15	Baja
29	138,48	1,18	Baja
30	169,57	1,33	Moderada
31	143,74	1,47	Moderada
32	80,97	1,58	Moderada
33	69,33	1,40	Moderada
34	92,66	1,55	Moderada
35	60,58	2,26	Alta
36	160,32	1,28	Baja
37	244,11	1,20	Baja
38	261,54	1,62	Moderada
39	312,04	1,48	Moderada
40	364,29	1,25	Baja
41	94,68	1,61	Moderada
42	132,99	1,55	Moderada
43	113,05	1,45	Moderada

La zona 3 presenta una IS promedio de 1,37 que corresponde a un canal con sinuosidad moderada.