

**ESTUDIOS MORFOMETRICOS Y ANÁLISIS DE INUNDACION DEL
RIO CUMBE, PROVINCIA DEL AZUAY; MEDIANTE LOS SISTEMAS
DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (ARCGIS) CON LA
HERRAMIENTA GEORAS Y EL PROGRAMA HECRAS.**

**MORPHOMETRIC STUDIES AND FLOOD ANALYSIS OF THE
CUMBE RIVER, PROVINCE OF AZUAY; THROUGH
GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEMS (ARCGIS) WITH THE
GEORAS TOOL AND THE HECRAS PROGRAM.**

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN HIDROLOGÍA
Y GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS**

Presentado por:

**D./D^a NOMBRE Y APELLIDOS
Marcos Verdugo Cardenas**

Dirigido por:

**Dr./Dra. D./D^a NOMBRE Y APELLIDOS
Juan Antonio Pascual Aguilar**

Alcalá de Henares, a 23 de julio del 2019

AGRADECIMIENTOS

A mi padre **José Verdugo** por su gran apoyo y cariño que siempre me ha ofrecido.

A mi madre **Luz Cárdenas** por haberme dado la vida que es el tesoro más preciado del mundo.

A mis hermanos; **Andrés Verdugo**, por estar siempre a mi lado y apoyarme en todo, sé que estás en el cielo orgulloso por mi esfuerzo; somos hermanos y siempre estaremos juntos, te AMO y Angie **Verdugo**, por estar siempre pendiente de mí.

A mi director del proyecto **Juan Antonio Pascual Aguilar** por brindarme su conocimiento y ayuda para concluir con éxito el presente trabajo.

INDICE

1.	INTRODUCCIÓN.....	9
1.1.	JUSTIFICACIÓN.....	10
2.	OBJETIVOS.....	11
2.1.	Objetivo General.....	11
2.2.	Objetivos Específicos.....	11
3.	METODOLOGÍA.....	12
3.1.	Zona de Estudio.....	12
3.2.	Materiales y Equipos.....	13
3.3.	Tipos de Cuencas.....	14
3.3.1.	Cuenca Hidrográfica.....	14
3.3.2.	SubCuenca.....	14
3.3.3.	Microcuenca.....	15
3.4.	Delimitación de una Cuenca Hidrográfica.....	15
3.5.	La Clasificación de las Cuenca Hidrográficas.....	15
3.6.	Parámetros más Frecuentes de una Cuenca Hidrográfica.....	15
3.6.1.	Área de la Cuenca (A).....	15
3.6.2.	Perímetro de una Cuenca (P).....	16
3.6.3.	Longitud del Cauce Principal (L).....	16
3.6.4.	Ancho de la Cuenca (W).....	16
3.7.	Parámetros de Forma.....	16
3.7.1.	Índice de Gravelius (Kc).....	16
3.7.2.	Factor de Forma (Ff).....	17
3.7.3.	Desnivel Altitudinal (DA).....	18

3.8.	Parámetros de Relieve	19
3.8.1.	Pendiente Media del Cauce Principal (j)	19
3.8.2.	Pendiente Media de la Cuenca (J)	19
3.8.3.	Curva Hipsométrica (CH).....	20
3.8.4.	Altura Media (h)	21
3.8.5.	Coeficiente de Masividad (Km)	21
3.9.	Parámetros de la Red de Drenaje	22
3.9.1.	Densidad de Drenaje (Dd)	22
3.9.2.	Orden de Corrientes (O)	23
3.9.3.	Tiempo de Concentración (T_c)	24
3.9.4.	Sinuosidad del Cauce Principal (s).....	25
3.10.	Delimitación de la Microcuenca con la herramienta Hydrology del programa ArcMap 10.3.1.....	26
3.11.	Estimación de los Caudales Máximos para Diferentes Periodos de Retorno	27
3.12.	Modelos Matemáticos	29
3.13.	Pre proceso en Arcgis Mediante la Extensión Hec-GeoRAS.	29
3.14.	Determinación de la Geometría de Canal	29
3.15.	Hec-Ras	30
3.15.1.	Ecuaciones Básicas para el Cálculo de los Perfiles	30
3.15.2.	Coeficiente de Manning o Rugosidad.....	32
3.15.3.	Coeficientes de Contracción y Expansión.	33
3.16.	Cobertura vegetal y uso del suelo de la Microcuenca del rio Cumbe	33
4.	RESULTADOS Y DISCUSION	34
5.	CONCLUSIONES.....	42

6.	BIBLIOGRAFÍA	43
7.	ANEXOS	47

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1:	Mapa base del Río Cumbe	12
Figura 2:	Diagrama del Proyecto.....	14
Figura 3:	Influencia de la configuración de la red hidrológica en las descargas.....	18
Figura 4:	Curva Hipsométrica para definir la Microcuenca	21
Figura 5:	Cálculo de la altura media a partir de la curva hipsométrica de una cuenca.	21
Figura 6:	Ordenes de corriente según Strahler	23
Figura 7:	Delimitacion de la microcuenca del Rio Cumbe	27
Figura 8:	Diagrama con los términos de la ecuación de energía y ubicación de cada término	31
Figura 9:	Geometría de Canal del Rio Cumbe	33
Figura 10:	Ubicacion y delimitación de la microcuenca del Rio Cumbe.....	34
Figura 11:	Curva hipsométrica de la microcuenca Rio Cumbe.....	36
Figura 12:	Cobertura vegetal y uso del suelo de la Microcuenca del rio Cumbe.....	38
Figura 13:	Mapa de inundación de la microcuenca del Rio Cumbe de los tiempos de retorno de 10, 50 y 100 anos.....	40
Figura 14:	Análisis de las áreas de inundación(regresión lineal)	40
Figura 15:	Mapa de comparación entre las superficies estudiadas de inundación y las áreas de inundación del Ecuador	41
Figura 16:	Mapa de pendientes de la microcuenca del Rio Cumbe	47
Figura 17:	Perfil longitudinal del Rio Cumbe	47
Figura 18:	Perfil hidráulico del Rio Cumbe	48

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Clasificación de las cuencas hidrográficas en el Ecuador	15
Tabla 2: Índice de Gravelius para la evaluación de la forma	17
Tabla 3: Índice de Gravelius para la evaluación de una Interpretación Ambiental.....	17
Tabla 4: Forma de la cuenca en función del factor de forma	18
Tabla 5: Rangos de pendiente y tipo de terreno	20
Tabla 6: Clases de valores de masividad	22
Tabla 7: Valores e interpretación de los resultados de la densidad de drenaje (km/km ²)	23
Tabla 8 : Clases de tiempo de concentración	25
Tabla 9: Índice de Sinuosidad	25
Tabla 10: Datos de caudales máximos instantáneos anuales (m ³ /s)	28
Tabla 11: Coeficientes de rugosidad típicos para ríos de montaña y planicies de inundación	32
Tabla 12: Parámetros morfométricos de la microcuenca Rio Cumbe	34
Tabla 13: Curva Hipsométrica de la microcuenca del Rio Cumbe	36
Tabla 14: Cobertura vegetal y uso del suelo de la Microcuenca del rio Cumbe	38
Tabla 15: Cálculo de los caudales de periodos de retorno con el método Gumbel.....	39
Tabla 16: Cálculo de los caudales de periodos de retorno con el método Gumbel2.....	39
Tabla 17: Caudales de periodo de retorno	39
Tabla 18: Análisis de las áreas de inundación	40
Tabla 19: Datos del último tramo del Perfil hidráulico del Rio Cumbe.....	48

TABLA DE ABREVIATURAS

MDT: Modelo Digital de Terreno

ETAPA: Empresa de Telecomunicaciones, Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Cuenca.

INEFAN: Instituto Ecuatoriano Forestal y de Áreas Naturales y de Vida Silvestre

KC: Índice de Gravelius

FF: Factor de Forma

DA: Desnivel Altitudinal

j: Pendiente Media del Cauce Principal

J: Pendiente Media de la Cuenca

CH: Curva Hipsométrica

Km: Coeficiente de Masividad

Dd: Densidad de Drenaje

O: Orden de Corrientes

Tc: Tiempo de Concentración

s: Sinuosidad del Cauce Principal

SUIA: Sistema Único de Información Ambiental

MAGAP: Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca

INAMHI: Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología – Ecuador

E.G.Elev (m): Línea de la Gradiente de Energía para un Perfil Hidráulico dado.

W.S.Elev (m): Perfil Hidráulico calculado a partir de la Ecuación de la Energía

Crit W.S.(m): Altura Crítica. Altura de Agua correspondiente a la Energía mínima en la Curva Energía vs Profundidad.

E.G. Slope(m/m): Pendiente de la Línea de Gradiente de Energía.

Q Total (m³/s): Caudal Total en una Sección Transversal

Top Width (m): Ancho del Canal Tomando como Referencia la Superficie del Agua

Vel total(m/s): Velocidad Promedio del Flujo Total de una Sección Transversal.

Max Chl Dpth(m): Máxima Profundidad del Canal.

Conv. Total (m³/s): Capacidad de Transporte Total de la Sección Transversal

Length Wtd. (m): Longitud del Tramo entre dos Secciones Transversales.

Min Ch El(m): Elevación Mínima del Canal

Frctn Loss(m): Pérdida de Energía entre dos Secciones Transversales.

C & E Loss (m): Pérdidas por Contracción y Expansión entre dos Secciones Transversales.

RESUMEN

La escasa investigación referido al análisis morfométrico e inundaciones de las microcuencas de la provincia del Azuay, justifica la elaboración de este proyecto.

La superficie de estudio de la microcuenca del Rio Cumbe, es una cuenca andina que pertenece a la cuenca del Rio Paute.

Con el análisis morfométrico se logró conocer que influencia tiene el comportamiento hidrológico en la microcuenca con la ayuda de los Sistemas de información Geográfica, los resultados obtenidos como el coeficiente de compacidad (K_c) es 1.46 ,indica que es una cuenca alargada en donde su interpretación ambiental tiene una mediana tendencia a una inundación , y los parámetros de relieve como la pendiente media de la cuenca (J) es 38,24 % y el coeficiente de masividad es 0,06 km , explica que su tipo de terreno es escarpado es decir una cuenca montañosa en donde tiene pendientes fuertes aumentando la velocidad de agua en las vertientes ocasionado los problemas de erosión ; por otra parte el parámetro de la densidad de drenaje (D_d) es 2,52 km/km² y el Orden de Corrientes (O) es 4 , que se trata de cuenca que tiene materiales impermeables a nivel sub-superficial con poca infiltración por tanto la cuenca tiene una respuesta hidrológica rápida frente a una tormenta.

Con la aplicación de los modelos matemáticos se determinó el comportamiento hidráulico del Rio Cumbe, mediante los SIG y la extensión de la herramienta GeoRAS; y la incorporación del programa HecRAS, con los diferentes caudales del periodo de retorno aplicando el método Gumbel (1958), en donde en un período de retorno de 10 años se tiene una superficie de inundación 4,14 km², el de 50 años una superficie de 4,5 km² y el de 100 años una llanura de inundación de 5 km² este comportamiento tiene una tendencia lineal de primer orden , en donde la mayor parte de la microcuenca de las zonas de inundación afecta a la actividad agrícola.

1. INTRODUCCIÓN

El ciclo hidrológico es el que controla el clima en el planeta, es un sistema circulatorio de agua en toda la biósfera. Se llama ciclo hidrológico al movimiento general del agua, ascendente por evaporación y descendente por las precipitaciones (Cotler, *et al.*, 2006).

La precipitación es el agua procedente de la atmosfera que se deposita sobre el área de la tierra. Es uno de los componentes más significativos del ciclo hidrológico y es la fuente principal de agua sobre el área terrestre (Aparicio Mijares, 1992).

Una inundación es un fenómeno, que, debido a la precipitación, oleaje, marea de tormentas, genera un aumento en el nivel de la superficie libre del agua en los ríos o el mar mismo, provocando una invasión en lugares donde usualmente no hay, generando daños significativos a la población, ganadería, agricultura e infraestructura.

Las inundaciones han sido uno de los fenómenos naturales más destructivos que la humanidad ha enfrentado. La mayoría de las grandes poblaciones han crecido asentándose en lugares potencialmente inundables, ya que la cercanía a un río las dotaba de grandes ventajas como por el ejemplo el abastecimiento de agua (Díaz de la Cruz, 2012).

La cuenca hidrográfica del río Paute se ubica en la región Austral del Ecuador, la superficie de la cuenca del río Paute es compartida por los territorios de tres provincias: Azuay (57%), Cañar (24%) y Morona Santiago (19%) (Cordero Domínguez, 2013).

La subcuenta del Río Tarqui tiene una superficie de 476 km², es una cuenca Andina perteneciente a la cuenca del Río Paute, cuyas aguas corren hacia el Este, siendo parte de la red de ríos de la vertiente atlántica (Palma y Villagómez, 2012). Es una cuenca montañosa, con una rápida respuesta hidrológica debido a una mezcla de factores climáticos y morfológicos. Son muy conocidos sus eventos de inundaciones repentinas que aguanta la subcuenta en su parte media y baja.

El río Tarqui en épocas de crecida inunda la zona urbana y rural (Parroquia Tarqui) del cantón Cuenca, eventos que se producen casi anualmente, los casos más recientes se dan el 6 de abril del 2012, que ocasiono serios daños en la infraestructura pública y privada, especialmente en las viviendas que se asientan en las márgenes de los sectores: La Compañía, Guzho, Santa María del Vergel, El Progreso, Tarqui, Tres Marías y en la zona urbana de Cuenca junto al río Tarqui (Coello, 2015).

El río Cumbe está conformada por la parte alta de la subcuenca del río Tarqui, está constituida principalmente por valles y llanuras accidentadas (Vanacker, *et al.*, 2007).

En los últimos años, mediante la información de la prensa local se registra el siguiente hecho:

Abril de 2006: Se desbordan los ríos Cumbe e Irquis, el río Tarqui anega zonas lecheras del sector destruyendo viviendas y enceres (Vallejo, 2014).

1.1. JUSTIFICACIÓN

Una de las herramientas más importantes del comportamiento hidrológico; es la caracterización física de la cuenca por medio de valores tradicionales de morfometría es de gran utilidad ya que permite el estudio , encaminados a deducir posibles picos de crecidas o avenidas en caso de una tormenta según los parámetros de forma , el tipo de relieve y el sistema de drenaje de la cuenca , la mayor parte de estos parámetros morfometricos actúan aumentando el volumen de flujo y la velocidad de movimiento en las vertientes.

El análisis con los modelos de inundación ayudara a establecer con precisión la ocurrencia de este fenómeno natural en el río Cumbe, la finalidad será identificar las zonas que son vulnerables a inundación que están aledañas al río Cumbe, cuyas consecuencias son de tipo socioeconómicas que llaman la atención al momento de ocupar el territorio, como el momento de definir qué tipo de infraestructura para el control de crecidas.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo General

- Determinar las características morfométricas físicas y la incorporación del modelo hidráulico para el estudio del comportamiento del flujo en la microcuenca del Río Cumbe.

2.2. Objetivos Específicos

- Delimitar la microcuenca del río Cumbe.
- Caracterizar la red hídrica de la microcuenca del río Cumbe, a través de los parámetros morfométricos.
- Determinar la conducta del perfil hidráulico del tramo del Río Cumbe con caudales de diferentes periodos de retorno, usando las herramientas de los Sistemas de Información Geográfica y el programa HEC-GeoRAS.

3. METODOLOGÍA

3.1. Zona de Estudio

La parroquia Cumbe esta bañada por el río del mismo nombre, se localiza en el cantón Cuenca, de la provincia del Azuay, entre los ríos que existe en la provincia; este río es altamente vulnerable a inundaciones. Se encuentra entre las coordenadas cartesianas UTM: X (716573) –Y (9663678); X (721041) – Y (9658233), ubicado entre una altitud de 2622 y 2700 msnm.

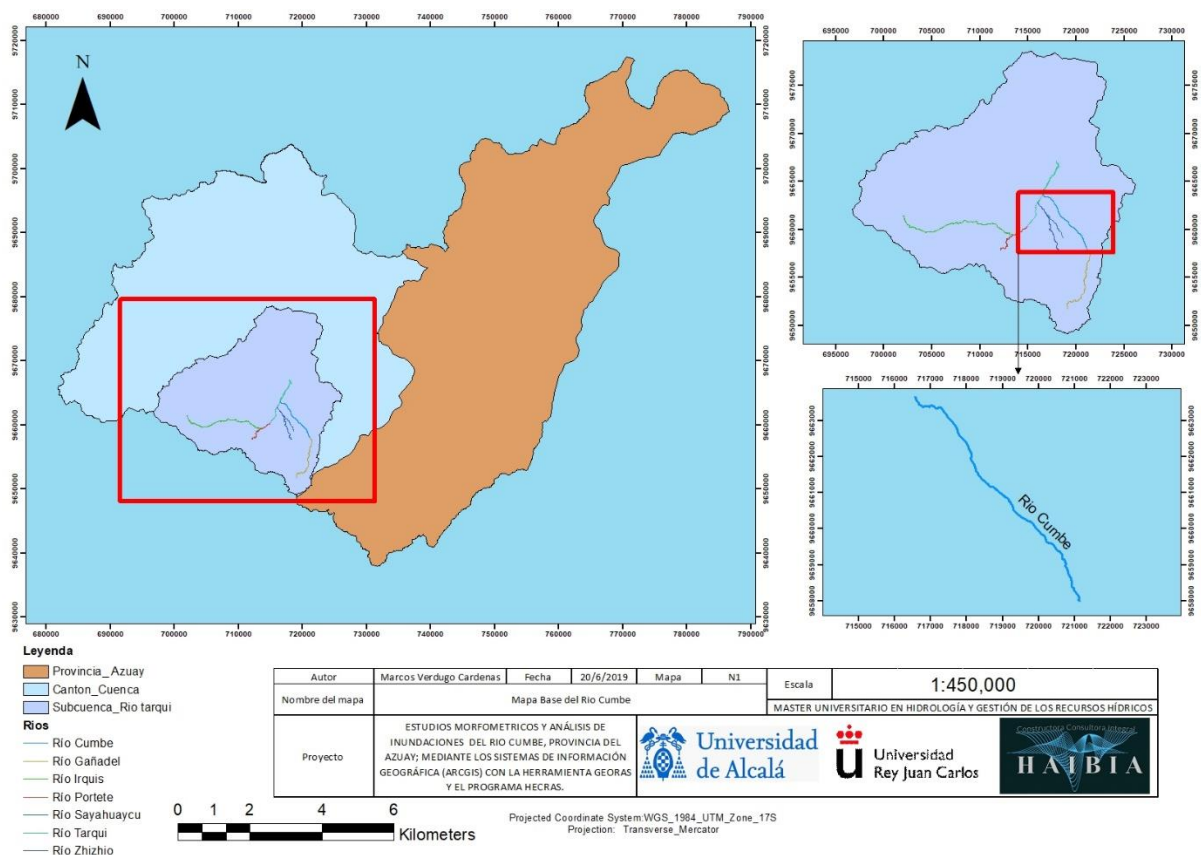


Figura 1: Mapa base del Río Cumbe

El río Cumbe nace en el cerro de Ingahuasi, en su recorrido recibe aguas de varios afluentes como son las siguientes quebradas: El Chorro, El Salado, Gañadel, Bahuanchi entre otros. Este río es de mucha importancia para el regadío de la zona, sobre todo de los pastizales de la parte norte de la parroquia y para las faenas agrícolas, en la parte sur.

El clima es templado seco en las partes bajas contrastando el frío de las partes más elevadas la temperatura media anual es de 11°C. Las épocas de lluvia se dan generalmente los meses de febrero hasta mayo (Villa y Matute, 2011).

3.2. Materiales y Equipos

Esta investigación se realizó aplicando la herramienta Hidrólogy del programa Arcgis 10.3 para el análisis morfométrico del río Cumbe para ver el comportamiento hidrológico referido a las crecidas en la microcuenca.

También se utilizó el programa HecRAS Versión 5.0.1. y con la herramienta GeoRAS del software Arcgis 10.3, para determinar las inundaciones en la microcuenca.

La recopilación de datos se llevó a cabo mediante fuentes de información bibliográfica como instituciones privadas y públicas: ETAPA-EP de la ciudad de Cuenca, Universidades, bibliotecas, artículos científicos, etc.

- Modelo Digital de Terreno y la Ortofoto de la parroquia Cumbe, de 3x3 metros de pixel.
- Software Arcgis 10.3 con la herramienta Hidrólogy, GeoRAS y el programa HecRAS Versión 5.0.1.
- Computadora hp OMEN.

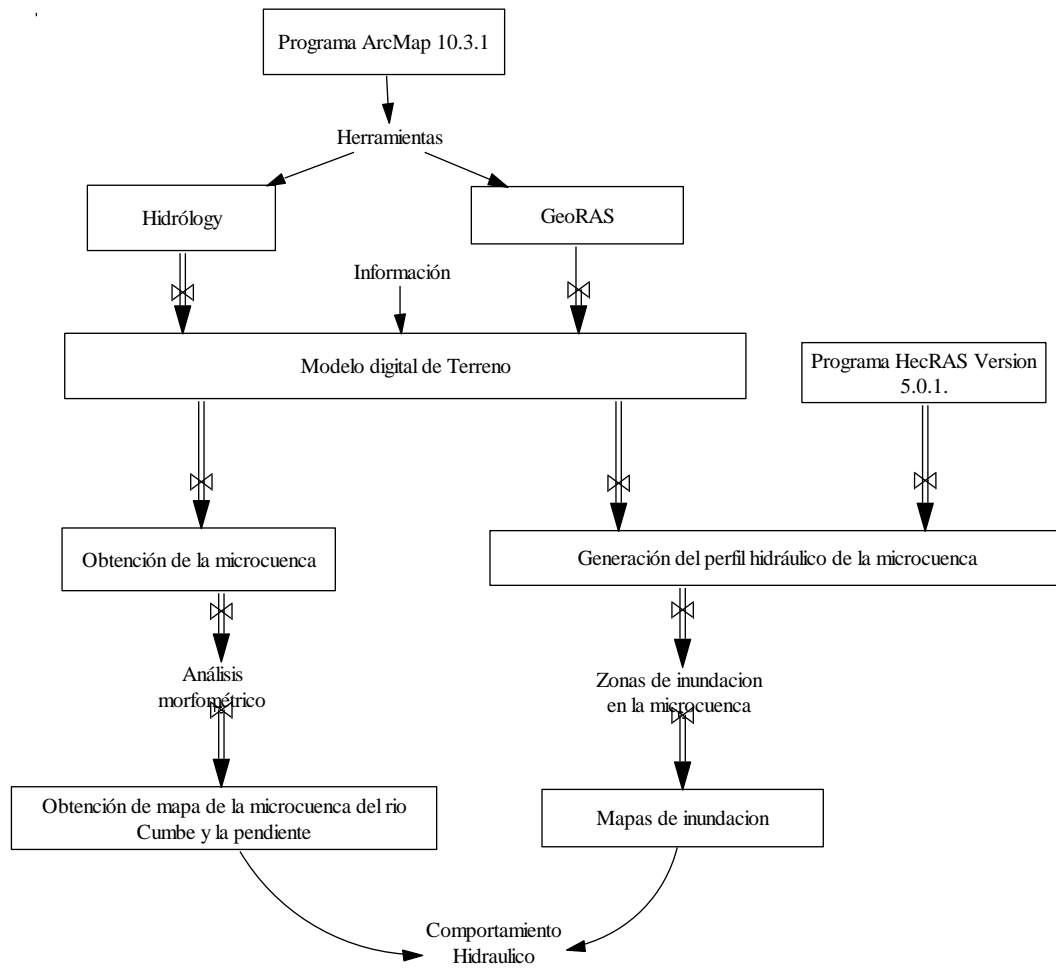


Figura 2:Diagrama del Proyecto

3.3. Tipos de Cuencas

3.3.1. Cuenca Hidrográfica

Según Monsalve (1999) una cuenca hidrográfica es una superficie definida por una divisoria de aguas, drenada por un curso de agua conectado de cursos de agua tal que todo el caudal afluente es descargado a través de un punto de desagüe.

3.3.2. SubCuenca

Es toda superficie en la que sus vertientes se dirigen al río principal de la cuenca (Faustino, 2006).

3.3.3. Microcuenca

Es toda superficie en la que sus vertientes van a dar al cauce principal de una sub cuenca; son superficies en donde se producen quebradas y riachuelos que drenan de las laderas y pendientes altas (Villanueva, 2002).

3.4. Delimitación de una Cuenca Hidrográfica

Aparicio (1999) afirma que, para generar el análisis hidrológico de una cuenca, es necesario ubicar el lugar y delimitar la cuenca, lo que lleva a efectuar el trazo de la línea imaginaria, que divide a las cuencas adyacentes y distribuye el agua, en cada sistema de corriente, hacia el punto de desagüé de la cuenca (Villon, 2002).

3.5. La Clasificación de las Cuenca Hidrográficas

Para la clasificación de las cuencas hidrográficas en el Ecuador se consideró la propuesta realizada por el INEFAN ¹(1995):

Tabla 1: Clasificación de las cuencas hidrográficas en el Ecuador

Categoría	Área (Km ²)
Sistema Hidrográfico	Mayor A 3000
Cuenca Hidrográfica	1001 A 3000
Subcuenca	151 A 1000
Microcuenca	40 A 150
Mini Cuenca o Quebrada	Menor A 40

Fuente: INEFAN (1995)

3.6. Parámetros más Frecuentes de una Cuenca Hidrográfica

3.6.1. Área de la Cuenca (A)

Es el área delimitada por la divisora de aguas medidas en kilómetros (Gaspari, et. al., 2010), esta línea imaginaria está formada por los puntos de nivel topográfico más alto.

¹ INEFAN (Instituto Ecuatoriano Forestal y de Áreas Naturales y de Vida Silvestre)

3.6.2. Perímetro de una Cuenca (P)

Es la longitud de la línea divisoria de aguas y conforma el contorno del área de la cuenca (Córdova, 2016).

3.6.3. Longitud del Cauce Principal (L)

Es la distancia en kilómetros del río principal entre el punto más lejano de la cuenca hasta su desembocadura (Beltrán, 2010).

3.6.4. Ancho de la Cuenca (W)

Es la división que existe entre el área y la longitud axial de la cuenca, en kilómetros (Burbano, 1989).

3.7. Parámetros de Forma

Estos son parámetros que explican la forma de la cuenca a una forma geométrica (Fierro y Jiménez, 2011), estudiando las respuestas hidrológicas de la cuenca.

3.7.1. Índice de Gravelius (Kc)

Este coeficiente permite relacionar el perímetro de la cuenca con el perímetro de un círculo de área equivalente al de la cuenca, su unidad de medida es adimensional (Gaspari, 2002).

Si Kc se acerca a 1 la cuenca es de forma circular y el tiempo de concentración es menor, haciéndola más vulnerable a las crecidas, pero si kc se aleja de 1 se trata de cuencas en donde su forma tiende a una rectangular-oblonga (muy alargada), es decir que se reducen las probabilidades de inundación.

La ecuación es (López Cadenas de Llano, 1998):

$$kc = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}}$$

K=coeficiente de Gravelius

P= perímetro de la cuenca, en km

A= superficie de la cuenca, en km²

Tabla 2: Índice de Gravelius para la evaluación de la forma

Rango	Formas
1 a 1,25	Casi redonda a oval – redonda
1,25 a 1,5	Oval - redonda a oval – alargada
1,5 a 1,75	Oval – oblonga a rectangular oblonga –muy alargada

Fuente: Sánchez (1987)

Tabla 3: Índice de Gravelius para la evaluación de una Interpretación Ambiental.

Kc	Interpretación Ambiental
1-1,25	Alta tendencia a inundaciones
1,25-1,50	Mediana tendencia a inundaciones
1,50-1,70	Baja tendencia a la inundación
>1,70	Cuencas propensas a la conservación

Adaptado de fuente: Villela e Matos (1975), citado por Rodríguez (2014).

3.7.2. Factor de Forma (Ff)

Este índice es el más utilizado para medir la forma de la cuenca; es la división entre el área de la cuenca y la longitud al cuadrado de la misma, se expresa (Horton, 1945):

$$Ff = \frac{A}{L^2}$$

A=área de la cuenca km²

L=longitud de la cuenca en km

Es un parámetro adimensional y la longitud de la cuenca puede considerarse según tres criterios: la longitud del cauce principal considerando su sinuosidad, la longitud del río principal considerando el eje del mismo, o la distancia en línea recta entre el punto de control de la cuenca y el punto más alejado de este (Córdova,2016).

Un factor de forma mayor >1 indicará que la forma de la cuenca es circular, presentará tendencias a concentrar el escurrimiento de una lluvia intensa formando fácilmente grandes crecidas o inundaciones (Horton, 1945), un factor menor a la unidad <1 trata de cuencas de forma alargada, en donde las descargas o crecientes son de menor volumen, porque el río principal es más largo que los cauces secundarios.

Tabla 4: Forma de la cuenca en función del factor de forma

Factor de Forma	Forma de La Cuenca
$F > 1$	Redondeada
$F < 1$	Alargada

Fuente: Horton (1945)

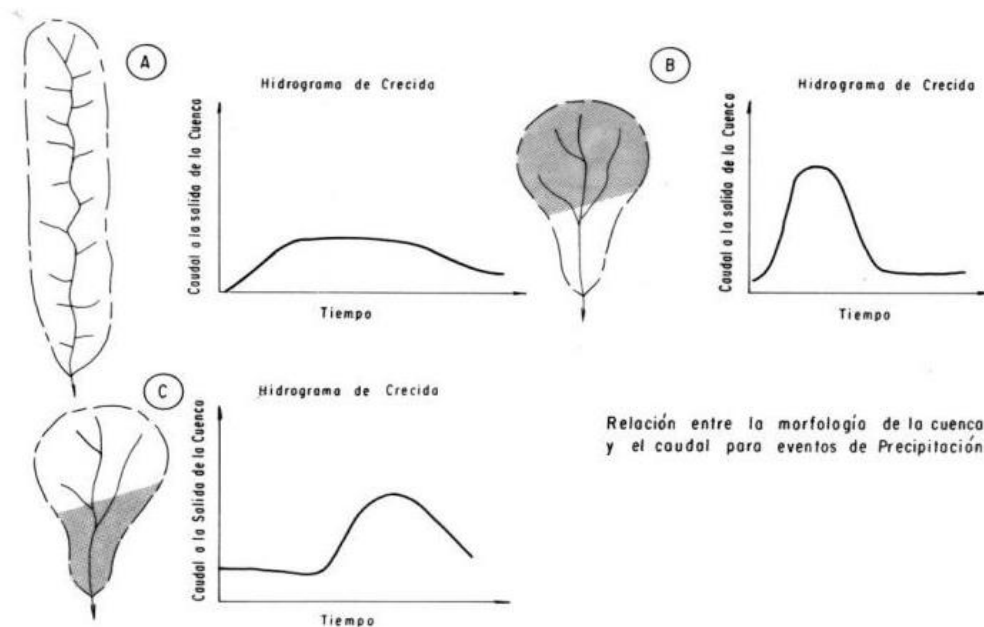


Figura 3: Influencia de la configuración de la red hidrológica en las descargas

Fuente: Horton (1945)

3.7.3. Desnivel Altitudinal (DA)

Es la diferencia de la cota más alta y la más baja de la cuenca hidrográfica en metros sobre nivel del mar, en una cuenca con mayor cantidad de pisos altitudinales existe mayor abundancia de fauna y flora.

$$DA = COTA MAYOR - COTA MENOR$$

3.8. Parámetros de Relieve

El parámetro de relieve tiene más importancia que los parámetros de forma sobre la respuesta hidrológica de una cuenca, puesto que a mayor relieve la generación de escorrentía superficial se origina en lapsos de tiempo menores (Ibáñez Asensio, *et al.*, 2008).

3.8.1. Pendiente Media del Cauce Principal (j)

Es la división existente entre el desnivel altitudinal del cauce y su longitud.

$$j = \frac{DA}{L}$$

DA: desnivel altitudinal (km)

L: longitud del cauce en km

La pendiente media del cauce es proporcional a la velocidad del agua de la red hidrográfica, por tanto, si aumenta la pendiente aumenta la velocidad del agua en la cuenca, haciendo más vulnerable a la cuenca a procesos erosivos y al arrastre de materiales (Yaguachi, 2013). En este aspecto, nos ayuda entender el comportamiento en el tránsito de avenidas.

3.8.2. Pendiente Media de la Cuenca (J)

Este parámetro significa un valor medio de todas las pendientes que conforman las diversas zonas topográficas de una cuenca (Córdova, 2016).

Para calcular la pendiente media de una cuenca se utiliza el mapa topográfico y el modelo digital de elevación (López Cadenas de Llano, 1998), su ecuación es:

$$J = 100 * \frac{\sum Li * E}{A}$$

J= pendiente media de la cuenca (%)

Li= Longitud de cada una de las curvas de nivel (km)

E= Equidistancia de las curvas de nivel (km)

A= superficie de la cuenca (km²)

En las zonas de baja pendiente como las llanuras aparecen los problemas de drenaje y sedimentación, mientras tanto en los lugares de alta pendiente presentan problemas de erosión en donde la infiltración del suelo es escasa (Villon, 2002). En este sentido, es uno de los factores que controlan el tiempo de flujo y la magnitud en las crecientes de los ríos.

Tabla 5: Rangos de pendiente y tipo de terreno

Rango de pendiente (%)	Tipo de terreno
0-2	Llano
2-5	Suave
5-10	Accidentado medio
10-15	Accidentado
15-25	Fuertemente accidentado
25-50	Escarpado
>50	Muy escarpado

Fuente: Heras (1972)

3.8.3. Curva Hipsométrica (CH)

La Curva hipsométrica fue propuesta por Langbein *et al.*, (1947), proporciona información sintetizada sobre la altitud, en donde la curva presenta en el eje de las ordenadas las diferentes cotas de alturas de la cuenca en metro sobre nivel del mar (msnm), y en las abscisas la superficie de la cuenca bien en porcentaje o en kilómetros cuadrados del área total de la cuenca.

También sirve para definir el potencial evolutivo de la cuenca.

Llamas (1993) menciona que la curva hipsométrica se fracciona en tres partes:

- Curva A que manifiesta una cuenca con gran potencial erosivo (cauces jóvenes).
- Curva B es una cuenca de equilibrio (cauces maduros)
- Curva C es una cuenca establecida por la deposición de sedimentos (cauces en etapa de vejez)

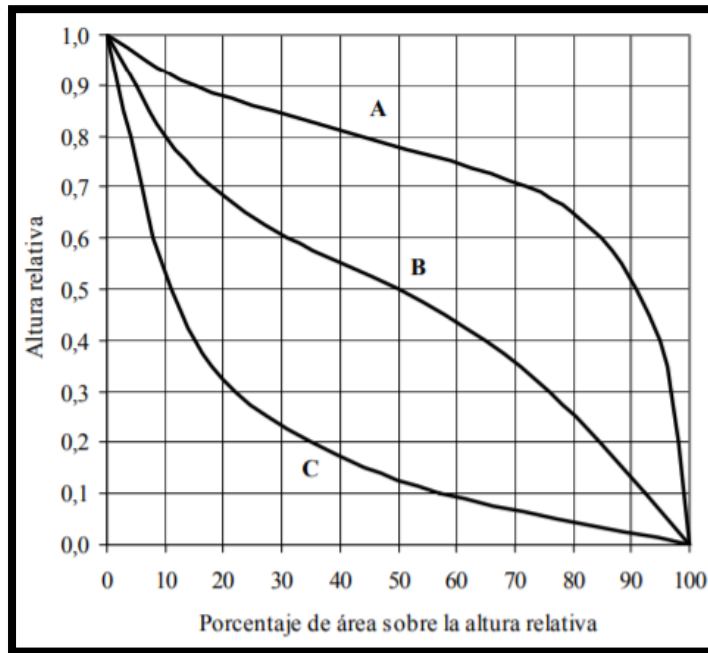


Figura 4: Curva Hipsométrica para definir la Microcuenca
Fuente: Strahler (1964)

3.8.4. Altura Media (h)

Este parámetro es la ordenada media de la Curva Hipsométrica, es decir, es la altura perteneciente al 50 % de la superficie total en las abscisas.

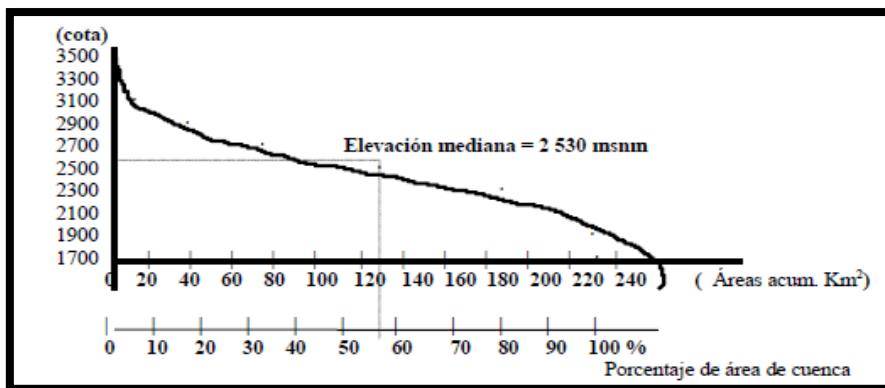


Figura 5: Cálculo de la altura media a partir de la curva hipsométrica de una cuenca.
Fuente: Aguirre (2007)

3.8.5. Coeficiente de Masividad (Km)

Es la relación entre la altitud media y la superficie total de la cuenca (Martonne, 1940).

$$K_m = \frac{\text{Altura media (m)}}{A(\text{Km}^2)}$$

Según Fuentes (2004) valores bajos es para cuencas de cumbres altas y valores altos en cuencas que indican terrenos planos y muestran superficies similares.

Tabla 6: Clases de valores de masividad

Rango de Km	Clases de masividad
0 – 35	Muy Montañosa
35 – 70	Montañosa
70 – 105	Moderadamente montañosa

Fuente: Fuentes (2004)

3.9. Parámetros de la Red de Drenaje

El sistema de drenaje está conformado por un cauce natural que es el principal y sus cauces tributarios, si la longitud del cauce natural es más larga tendrá más ramificaciones en la red de drenaje (Córdova, 2016). Estos parámetros son de suma importancia en la cuenca dado que caracterizan la magnitud de los escurrimientos.

3.9.1. Densidad de Drenaje (Dd)

Es la división entre la longitud total de los cauces y el área total de la cuenca hidrográfica, es decir, expresa la capacidad de desalojar un volumen de agua dado (López Cadenas de Llano, 1998):

$$D_d = \frac{L}{A}$$

L: Σ longitud total de todos los cauces en km.

A: superficie de la cuenca en km²

Una densidad de drenaje alta está relacionada con materiales impermeable a nivel sub-superficial, vegetación dispersa y relieves montañosos, es decir, una cuenca bien drenada

generaría poca oportunidad de darle tiempo a la escorrentía superficial de infiltrarse, en su defecto el volumen de recarga al acuífero es muy baja.

Una densidad de drenaje baja, refleja una cuenca pobremente drenada con una respuesta hidrológica muy lenta, trata de suelos duros pocos erosionables o muy permeables y cobertura vegetal densa (Linsley, *et at.* , 1977).

Tabla 7: Valores e interpretación de los resultados de la densidad de drenaje (km/km²)

<1,5	Bajo	Baja La Escorrentía y Aumenta La Infiltración
1,5-2,5	Medio	Tendencia Media De Escorrentía
2,5-3	Alto	Alta Tendencia A Fluir ya Las Inundaciones
> 3	Muy Alta	Alta Tendencia a la Escorrentía, y a la Erosión

Fuente: Horton (1945), Strahler (1957) y França (1968), citado por Rodrigues (2014).

3.9.2. Orden de Corrientes (O)

El Orden de los cauces permite tener una mejor idea de la complejidad del sistema de drenaje de la cuenca hidrográfica, siendo los más conocidos el de Horton (1945) y Strahler (1964) para el sistema de jerarquización de los cauces.

Campos (1987) menciona en donde mayor sea el número de orden, será mayor el potencial erosivo, el transporte de sedimentos y la escorrentía directa, que en otra cuenca de igual área.

Las cuencas que tienen un orden de cauce alto, sus tipos de suelo son impermeables; por tanto, la respuesta a una tormenta es rápida (Aparicio, 1996).

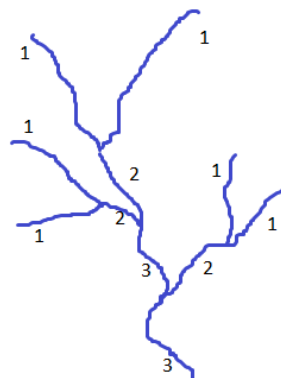


Figura 6: Ordenes de corriente según Strahler

3.9.3. Tiempo de Concentración (T_c)

Es el tiempo que tarda una gota de lluvia en trasladarse desde el punto más alejado de la cuenca hasta al punto de desagüe (Monsalve, 1999).

El T_c depende de los siguientes elementos:

- A mayor tamaño de la cuenca mayor T_c
- A mayor pendiente, menor T_c
- La forma: Las cuencas alargadas muestran menores T_c que las cuencas redondeadas.

A continuación, se muestra algunas formula empíricas:

Kirpich:

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

Dónde:

T_c : tiempo de concentración (min)

L =longitud del cauce principal (metros)

H =diferencia del cauce principal (metros)

Californiana :

$$T_c = 0,066 * \left(\frac{L}{J^{1/2}}\right)^{0,77}$$

Dónde:

T_c : tiempo de concentración (Horas)

L =longitud del cauce principal (km)

J =pendiente del cauce principal (m/m)

Tabla 8 : Clases de tiempo de concentración

Rangos de Tc (min)	Clases
0-41,6	Rápido
41,7-83,2	Moderado
83,3-125,1	Lento

Fuente: Fuentes (2004)

Los tiempos de concentración muy cortos tienen gastos intensos y secciones muy rápidas, en cambio los tiempos de concentración más largos determinan gastos atenuados y recesiones sostenidas, considerando que no existe evaporación y que la superficie es impermeable (Kirpich, 1940).

A mayor tiempo de concentración en la cuenca hidrográfica, indicara grandes volúmenes de agua.

3.9.4. Sinuosidad del Cauce Principal (s)

El cálculo de la sinuosidad es planteado por Schumm (1963), define “*el desarrollo de meandros existentes en el cauce principal de un río, y su cálculo se obtiene poniendo en relación la longitud de dicho cauce con la longitud máxima del valle que forma*”.

$$s = \frac{L \text{ en línea recta}}{L \text{ por el cauce}}$$

Cuanto mayor sea la sinuosidad en los cauces sus pendientes son bajas, es decir, lugares de planicie y un bajo potencial erosivo, cuando su sinuosidad es baja, los cauces son de mayor pendiente y por tanto con mayor fuerza erosiva (Schumm, 1963).

Tabla 9: Índice de Sinuosidad

Tipo de Canal	Índice De Sinuosidad
Canal Rectilíneo	1-1,2
Canal Transicional	1,2-1,5
Canal Regular	1,5-1,7
Canal Irregular	1,7-2,1
Canal Tortuoso	>2,1

Fuente: Schumm (1963)

3.10. Delimitación de la Microcuenca con la herramienta Hydrology del programa ArcMap 10.3.1

La delimitación de la microcuenca del río Cumbe se realizó con el MDT (Modelo digital de terreno). Este MDT se obtuvo de la Universidad del Azuay (UDA), su pixel o celda es de 3m*3m.

La herramienta Hydrology ayuda a modelar el flujo del agua mediante un área, con diferentes altitudes sobre el nivel medio del mar.

Pasos:

Fill: Esta herramienta rellena todas aquellas imperfecciones que se ven en el área del MDT, su objetivo es corregir los sumideros erróneos de la microcuenca.

Flow direction: Este instrumento crea un ráster que contendrá la dirección de flujos de agua en cada una de sus píxeles.

Flow accumulation: Crea un ráster con el flujo acumulado para cada una de sus píxeles, en donde esta herramienta determinará las partes de mayor concentración de agua en las celdas.

Raster calculator: Esta herramienta permite utilizar operaciones matemáticas con capas ráster como una calculadora, para esta delimitación de la microcuenca se debe escoger un umbral para determinar la red hídrica se escogió 20000, porque si el umbral es menor muchos píxeles serán seleccionados como pertenecientes a la red de drenaje, por el contrario, si el umbral es mayor solo aquellos píxeles serán definidos como red hídrica, se pone la condición de: $Con(rio-Cumbe > 20000, 1)$

Stream Link: Define un valor específico a los píxeles de la misma superficie del río, que permite la unión entre los cauces, en donde estos cauces presentan segmentos interrumpidos.

Stream Order: Genera un ráster en donde se presenta una jerarquía del orden de los cauces, su método se basa en la jerarquía de Strahler.

Stream to Feature: Esta herramienta transforma el pixel (ráster) a una entidad geométrica (vector), se crea una capa de la red hidrográfica.

Feature vértice to point: Determina los puntos en donde se unen cada uno de los drenajes que convierte los vértices a puntos, para este caso solo nos interesa el punto de desagüe.

Watershed: Por último, esta herramienta permite delimitar la microcuenca del Rio Cumbe (Verdugo, 2017).

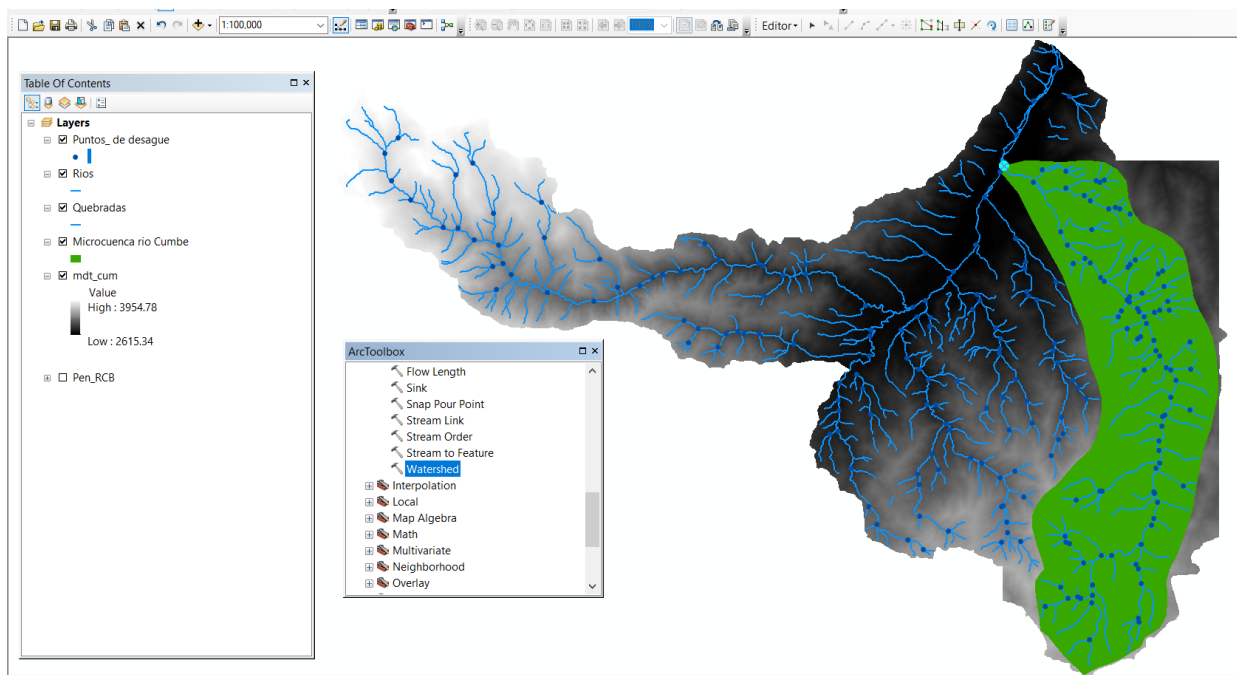


Figura 7: Delimitación de la microcuenca del Rio Cumbe

3.11. Estimación de los Caudales Máximos para Diferentes Periodos de Retorno

Para el estudio de caudales máximos para el diseño de inundación se aplicó el método estadístico de Gumbel (1958), esta metodología permite determinar caudales máximos para diferentes períodos de recurrencia, este método sirve para aplicar tanto en caudales y precipitaciones para diseño de presas o avenidas.

El valor máximo que se quiere determinar para un determinado período de retorno se determina por medio de la expresión:

$$PT = u + a.YT$$

PT: valor máximo (caudal o precipitación) para un período de retorno T.

$$u = P_m - (\tilde{Y}/S_y) * P_s$$

$$a = (1/S_y) * P_s$$

En donde:

P_m: es el valor medio de los datos Q_i

Ȳ: Valor medio de Y

S_y: Desviación típica poblacional de Y

P_s: Desviación típica (de la muestra) de los datos Q_i

$$Y_T = -\ln(\ln(T/(T-1)))$$

Y_T: variable de Gumbel para el período de retorno T. Se determina a partir del valor del período de retorno (5,50,100 en años).

Tabla 10: Datos de caudales máximos instantáneos anuales (m³/s)

Años	Estación meteorológica : Tarqui DJ cumbe
1998	27,076
1999	34,001
2000	27,802
2001	24,278
2002	19,787
2003	11,402
2004	19,787
2005	16,89
2006	43,208
2007	36,082
2008	80,304
2009	44,04
2010	19,072
2011	35,086
2012	34,451
2013	17,798

Fuente: Coello (2015)

3.12. Modelos Matemáticos

Para realizar los mapas de inundación de una corriente es preciso modelizar la conducta del curso fluvial, a través de los modelos matemáticos apoyados en las técnicas de los Sistemas de información geográfica.

El más conocido es el modelo Unidimensional o 1D, determina el nivel de cota máxima que alcanzara la lámina de agua, ejemplo la máxima avenida ordinaria o diferentes períodos de retorno.

Se establecen en esquemas numéricos simples pero significativos (ecuación de la conservación de la energía, ecuación de Manning, ecuación de la cantidad de movimiento), que pueden considerar cambios de régimen, cauces con geometrías complejas y con llanuras de inundación (Bladé, *et al.*, 2009).

3.13. Pre proceso en Arcgis Mediante la Extensión Hec-GeoRAS.

Hec-GeoRAS es una extensión para utilizar en ArcMap particularmente diseñada para tratar datos georeferenciados para usar posteriormente con Hec-Ras.

HEC-GeoRAS crea un archivo para importar a HEC-RAS datos de geometría del terreno incluyendo cauce del río, áreas transversales, etc. Consecutivamente los resultados obtenidos de calados y velocidades se exportan desde HEC-RAS a ArcMap y se obtienen los mapas de inundación (Marin,2006).

3.14. Determinación de la Geometría de Canal

Se usó un MDT (Modelo Digital del Terreno) de 3 metros de resolución espacial, este modelo se logró con la extensión 3D Analyst. Se crea las capas (RAS Layers), estas son en archivo shape, que almacenan dentro de una base de datos Geodatabase.

La geometría básica para los cálculos posteriores en HECRAS, se define a través de las RAS Layers. Estas capas se clasifican como:

Línea del Cauce (Stream Centerline): Necesaria para definir el eje del canal natural, su trazado se realizó desde aguas arriba hasta aguas abajo, siguiendo el lugar geométrico de los puntos de mayor profundidad. Se le asignó el nombre del río al tramo en estudio (Encalada y Jara, 2010).

Líneas de Banco (Bank Lines): Capa donde se marca cuáles van a ser los límites del cauce del río.

Línea de Centro Sobre Flujo (Flow Path Centerlines): Estas líneas representan la extensión máxima de los desbordes y son perpendiculares a las áreas de flujo. También esta línea se utilizó para definir el banco izquierdo, cauce principal y banco derecho.

Líneas de Corte de las Secciones Transversales (XS CutLines): Son líneas de corte que se trazan perpendiculares a la dirección del flujo. Se trazaron desde el banco izquierdo hacia el banco derecho y avanzando hacia aguas abajo, sin interceptarse, cruzando la línea del cauce (Stream Centerline) solo una vez (Cartaya y Mantuano, 2016). En total se trazaron 11 secciones transversales, de 1000 metros de ancho y separadas equidistantemente de 700 metros.

3.15. Hec-Ras

El programa HEC RAS (River Analysis System) ha sido desarrollado por el Hydrologic Engineering Center del U.S. Army Corps of Engineers, de los Estados Unidos, siendo uno de los modelos hidráulicos más utilizados en la modelización hidráulica de los ríos (Horno y Sánchez, 1987).

3.15.1. Ecuaciones Básicas para el Cálculo de los Perfiles

El cálculo se basa en la solución de la ecuación de energía unidimensional con pérdidas de energía debido a la fricción evaluadas con la ecuación de Manning; la ecuación de energía es la siguiente:

$$Z_2 + Y_2 + \frac{a_2 V_2^2}{2g} = Z_1 + Y_1 + \frac{a_1 V_1^2}{2g} + h_e$$

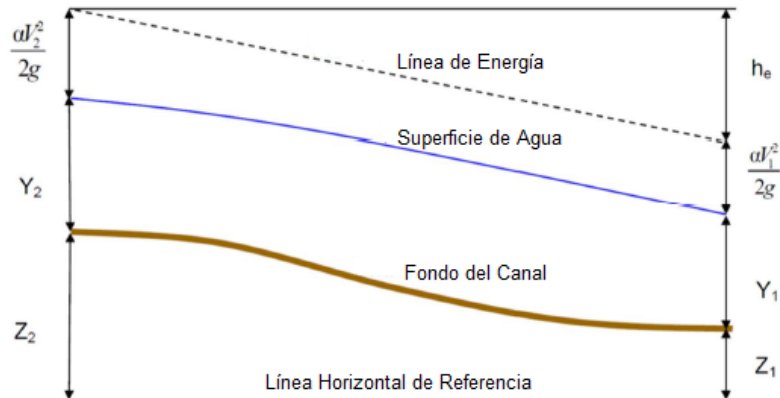


Figura 8: Diagrama con los términos de la ecuación de energía y ubicación de cada término
Fuente: US Army Corps of Engineers (2008)

Para la resolución de las pérdidas de energía se debe tomar en cuenta las pérdidas por fricción, así como las pérdidas de conversión provocadas por una contracción o expansión, en la siguiente forma (Coello, 2015):

$$h_e = LS_f + C \left[\frac{a_2 V_2^2}{2g} - \frac{a_1 V_1^2}{2g} \right]$$

Donde:

L= longitud entre tramos ponderada (m).

S_f= pendiente de fricción entre dos secciones.

C = coeficiente de pérdida por expansión o contracción.

Para obtener la longitud entre tramos ponderada, se utiliza la siguiente ecuación:

$$L = \frac{L_{lob} \overline{Q_{lob}} + L_{ch} \overline{Q_{ch}} + L_{rob} \overline{Q_{rob}}}{\overline{Q_{lob}} + \overline{Q_{ch}} + \overline{Q_{rob}}}$$

lob= left overbank (llanura de inundación izquierda).

ch= main channel (cauce principal).

rob= right overbank (llanura de inundación derecha).

3.15.2. Coeficiente de Manning o Rugosidad

El coeficiente de rugosidad significa la resistencia al flujo de agua en cauces y llanuras de inundación, escoger correctamente un valor de “n” significa hacer una buena valoración de la resistencia al flujo en un determinado cauce.

Es uno de los parámetros principales que interviene en la calibración del modelo hidráulico de un canal abierto (Encalada y Jara, 2010).

Los valores más utilizados para los coeficientes de Manning son los propuestos por Ven Te Chow (1959). Esta tabla muestra valores máximos, mínimos y normales para una variedad de canales naturales y artificiales, para planicies de inundación y ríos con ancho variable.

Se pudo observar en la Ortofoto, de las riberas del río Cumbe, que su tipo de rugosidad es de pasto corto, se escogió el valor **0,03**.

Tabla 11: Coeficientes de rugosidad típicos para ríos de montaña y planicies de inundación

Ríos naturales menores (< 30 metros)		Mínimo	Normal	Máximo
a. Ríos de montaña , sin presencia de vegetación en el canal , márgenes usualmente escarpadas , árboles y arbustos a lo largo de las márgenes sumergidas en eventos de crecidas	1.Fondo : gravas , piedras redondas grandes y pocas piedras muy grandes	0,03	0,04	0,05
	2.Fondos:Piedras redondas grandes y muy grandes	0,04	0,05	0,07
Planicies de inundación		Mínimo	Normal	Máximo
a. Pasto , sin arbusto	1.Corto	0,025	0,03	0,035
	2.Alto	0,03	0,035	0,05
b. Áreas cultivadas	1.Sin cultivos	0,02	0,03	0,04
	2.Cultivos en hileras maduros	0,025	0,035	0,045
	3.Campo cultivado maduro	0,03	0,04	0,05
c. Arbustos	1.Arbustos aislados o escasos	0,035	0,05	0,07
	2.Pocos arbustos y árboles , en invierno	0,035	0,05	0,06
	3.Pocos arbustos y árboles , en verano	0,04	0,06	0,08
	4.Medio a densos arbustos , en invierno	0,045	0,07	0,11
	5.Medio a densos arbustos , en verano	0,07	0,1	0,16
d. Arboles	1.Densos sauces , en verano	0,11	0,15	0,2
	2. Sin árboles , troncos sin retorno	0,03	0,04	0,05
	3. Igual que en 2 , pero con masivos retoños	0,05	0,06	0,08
	4.Muchos árboles maderables , pocos árboles caídos , poca maleza , nivel de flujo bajo ramas	0,08	0,1	0,12
	5.Igual que anterior , pero el nivel de flujo alcanza las ramas	0,1	0,1	0,16

Fuente: Ven Te Chow (1959)

3.15.3. Coeficientes de Contracción y Expansión.

Una causa de desgaste de energía dentro de un tramo es la contracción y expansión de flujo debido a cambios en el área transversal (Encalada y Jara, 2010)

El programa maneja los coeficientes de contracción y expansión para establecer las pérdidas de energía entre dos superficies contiguas.

Los autores para una transición gradual aconsejan 0,1 (contracción) y 0,3 (expansión), mientras que en las proximidades de un puente pueden ser, respectivamente de 0,3 y 0,5 o mayores, por la mayor pérdida de energía (Sánchez, 2007).

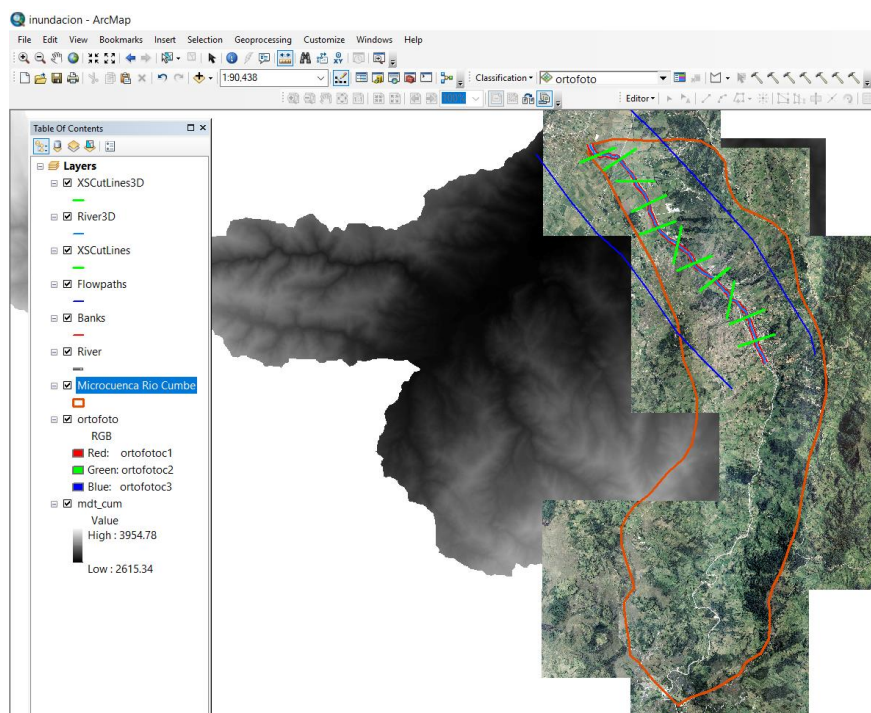


Figura 9: Geometría de Canal del Río Cumbe

3.16. Cobertura vegetal y uso del suelo de la Microcuenca del río Cumbe

Para determinar la cobertura vegetal y uso de suelo de la microcuenca del Río Cumbe se descargó la capa o shape de la cobertura y uso de la tierra del año 2016 de la página web del SUIA², se realizó un corte (clip) con la capa de la cobertura vegetal sobre la microcuenca y se calculó su área en porcentaje.

² SUIA (Sistema Único De Información Ambiental)

4. RESULTADOS Y DISCUSION

Parámetros de Forma, Relieve y de la Red de Drenaje

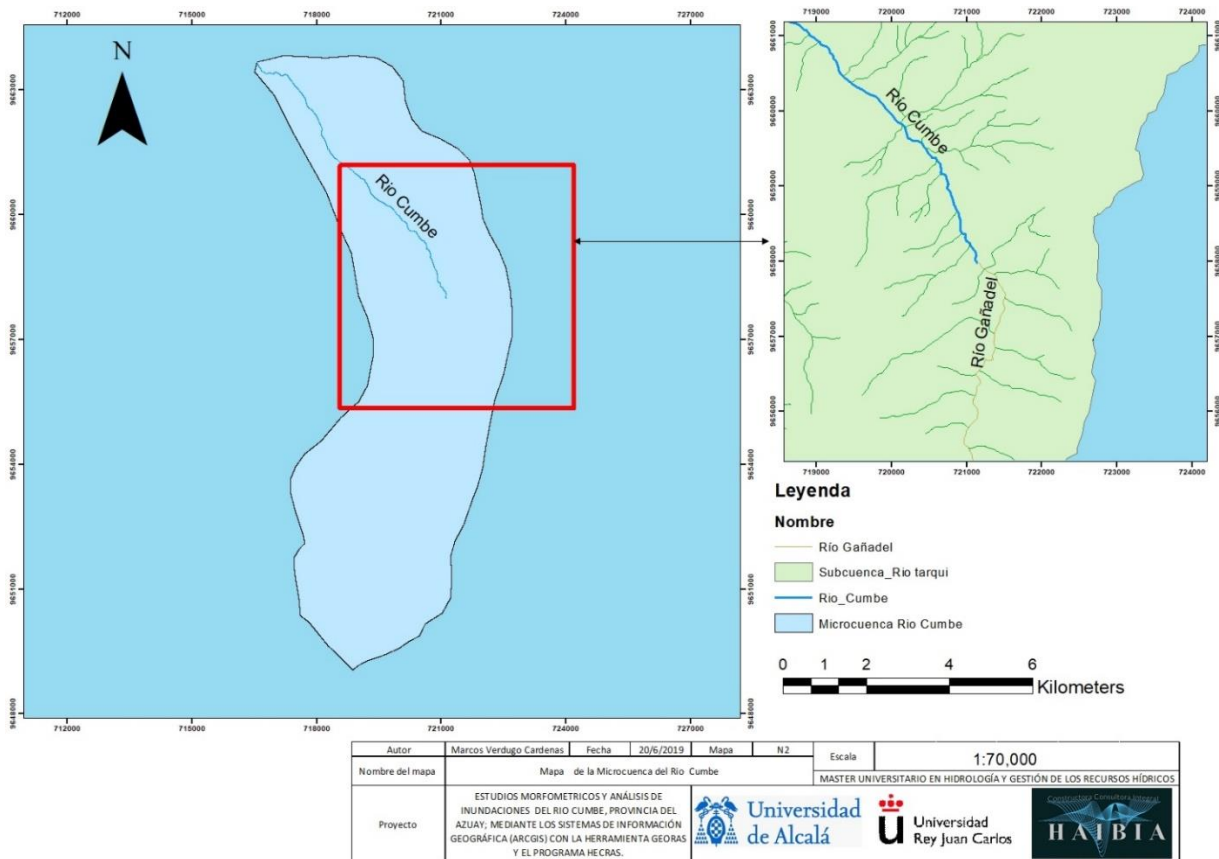


Figura 10: Ubicacion y delimitación de la microcuenca del Rio Cumbe

Tabla 12: Parámetros morfométricos de la microcuenca Rio Cumbe

Microcuenca del Rio Cumbe		
PARAMETROS	UNIDAD	VALOR
Área de la microcuenca	km ²	51,14
Perímetro	km	37,13
Cota máxima de la microcuenca	msnm	3476
Cota mínima de la microcuenca	msnm	2622
Altura Media (H)	msnm	3074
DA	m	854
Factor de Forma (Ff)	Adimensional	0,8
Índice de Compacidad o de Gravelius	Adimensional	1,46
Coefficiente De Masividad (km)	km	0,06
Ancho de la microcuenca	km	6,38
Pendiente media de la cuenca	%	38,24
Longitud del cauce principal	km	8
Orden del cauce principal	Adimensional	4
Longitud de la red hídrica	km	129
Densidad de drenaje	km/km ²	2,52
tiempo de concentración Kirpich (tc)	min	46,79
tiempo de concentración Californiana (tc)	min	46,54
Sinuosidad del Cauce Principal	Adimensional	1
Pendiente media del cauce principal	km/km	0,11

Área

La cuenca del Río Cumbe tiene una superficie total de 51,14 km², según la tabla 1 propuesta por INEFAN (1995) se considera una microcuenca con dimensiones pequeñas, este parámetro es muy importante para determinar los datos morfométricos posteriores.

Coefficiente de Compacidad o Gravelius y Factor de Forma

Su Kc es de 1,48 según Sánchez (1987) de la tabla 2 su forma es Oval - redonda a oval – alargada, explica que su forma es alargada, pero con un ancho medio, es decir que la mayoría de la cantidad de agua no fluye a una sola dirección en el cauce sino en varias direcciones y su tiempo de concentración no son menores; mientras en la tabla 3 para la evaluación de una interpretación ambiental o fenómenos naturales se encuentra en un rango de 1,25-1,50 que tiene una mediana tendencia a inundaciones , es decir que la microcuenca es vulnerable a inundaciones frente a una tormenta alta. Por el contrario, el **Ff** de la microcuenca calcula 0,8 según Horton (1945), es una cuenca alargada, que presentara en su punto de descarga caudales mínimos, por lo tanto, las descargas de aguas serán de menor volumen.

Pendiente Media de la Cuenca y Coeficiente de Masividad

La pendiente media de la microcuenca es 38,24%, según Heras (1972) de la tabla 5, se encuentra en un rango de 25-50%, indica que el tipo de terreno escarpado, esta microcuenca posee cambios bruscos de pendiente, por lo cual a mayor pendiente aumenta la velocidad de agua , existiendo problemas de erosión y fuerte arrastre de materiales , poca recarga en los acuíferos (Villon, 2002), pero hay que destacar la cobertura vegetal poblada que ayudaría a regular el comportamiento hidrológico de la microcuenca y justificando con el coeficiente de masividad de la microcuenca es 0,06 km según Fuentes (2004) de la tabla 6 son zonas muy montañosas debido que este lugar pertenece a la cordillera de los Andes.

Tabla 13: Curva Hipsométrica de la microcuenca del Rio Cumbe

Número	Cota (msnm)			km2			
	Mínima	Máxima	Promedio	Intervalo	Acumulado	% acumulado	% inter
1	2622	2699	2660	6,93	51,14	100,00	13,54
2	2699	2783	2741	6,21	44,21	86,46	12,14
3	2783	2866	2825	6,94	38,00	74,32	13,57
4	2866	2950	2908	6,50	31,07	60,75	12,70
5	2950	3034	2992	6,06	24,57	48,05	11,85
6	3034	3118	3076	4,47	18,51	36,20	8,73
7	3118	3201	3159	3,55	14,05	27,47	6,94
8	3201	3285	3243	4,21	10,50	20,52	8,24
9	3285	3369	3327	4,01	6,28	12,28	7,84
10	3369	3452	3411	2,19	2,27	4,45	4,28
11	3452	3481	3467	0,09	0,09	0,17	0,17

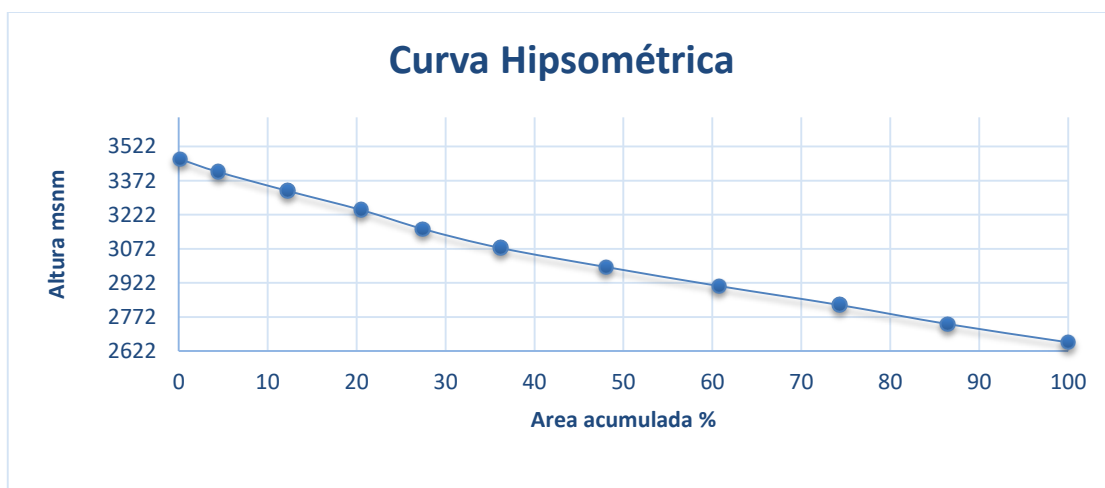


Figura 11: Curva hipsométrica de la microcuenca Rio Cumbe

Curva Hipsométrica

La curva hipsométrica de la microcuenca posee pendientes que no son prolongadas, según Llamas (1993) se trata de una cuenca de cauces maduros, es decir una cuenca en equilibrio en la cual se da el transporte de agua y materiales de sedimento, con un medio potencial erosivo. Como podemos observar en la figura 11 de la curva desde la altitud 3481 hasta 2622 msnm, son pendientes suaves que indica la presencia de zonas planas en toda parte de la curva lo que

presentara un posible peligro de inundación (Tragsa, 1994) cuando exista una lluvia fuerte en lugares aledaños al río.

La Densidad de Drenaje y Orden de Corrientes (O)

La densidad de drenaje de la microcuenca es de 2,52 km/km² según Horton (1945), Strahler (1957) y França (1968) posee una alta densidad que indica la tabla 7 , con una alta tendencia a fluir a las inundaciones y el orden de corriente es de 4, de cauce alto , podemos concluir entonces que se trata de materiales impermeables a nivel sub-superficial de relieve muy montañoso, justificando con los resultados anteriores, en donde la infiltración es escasa (Linsley, *et at.* , 1977), por lo tanto en presencia de una tormenta alta la microcuenca tiende a tener una respuesta hidrológica rápida (Verdugo,2017).

Tiempo de Concentración

Se calculó el tiempo de concentración de las dos fórmulas citadas, el Tc de **Kirpich** es 46,79 min y el de **Californiana** es 46,54 min, según la tabla 8 de Fuentes (2004) es de clase moderado, en donde los Tc no son tan cortos ni largo por lo cual la microcuenca indicará medios volúmenes de agua de descarga, pero esta correlación no pertenece exactamente a la realidad ya que el tiempo de concentración es heterogéneo, depende primordialmente de una precipitación (Mantilla, et al., 2005).

Sinuosidad del Cauce Principal

La sinuosidad del cauce principal de la microcuenca es de 1 según Schumm (1963) de la tabla 9, su tipo de canal es Rectilíneo en donde sus vertientes tienen pendientes fuertes y gran potencial erosivo.

Cobertura Vegetal y el Uso del Suelo

Tabla 14: Cobertura vegetal y uso del suelo de la Microcuenca del río Cumbe

TIPO DE SUELO	Area_km2	Cobertura vegetal (%)
AREA SIN COBERTURA VEGETAL	0,11	0,21
BOSQUE NATIVO	3,92	7,66
INFRAESTRUCTURA	0,28	0,55
PARAMO	1,86	3,64
PLANTACION FORESTAL	0,49	0,96
TIERRA AGROPECUARIA	42,88	83,85
VEGETACION ARBUSTIVA	1,6	3,12

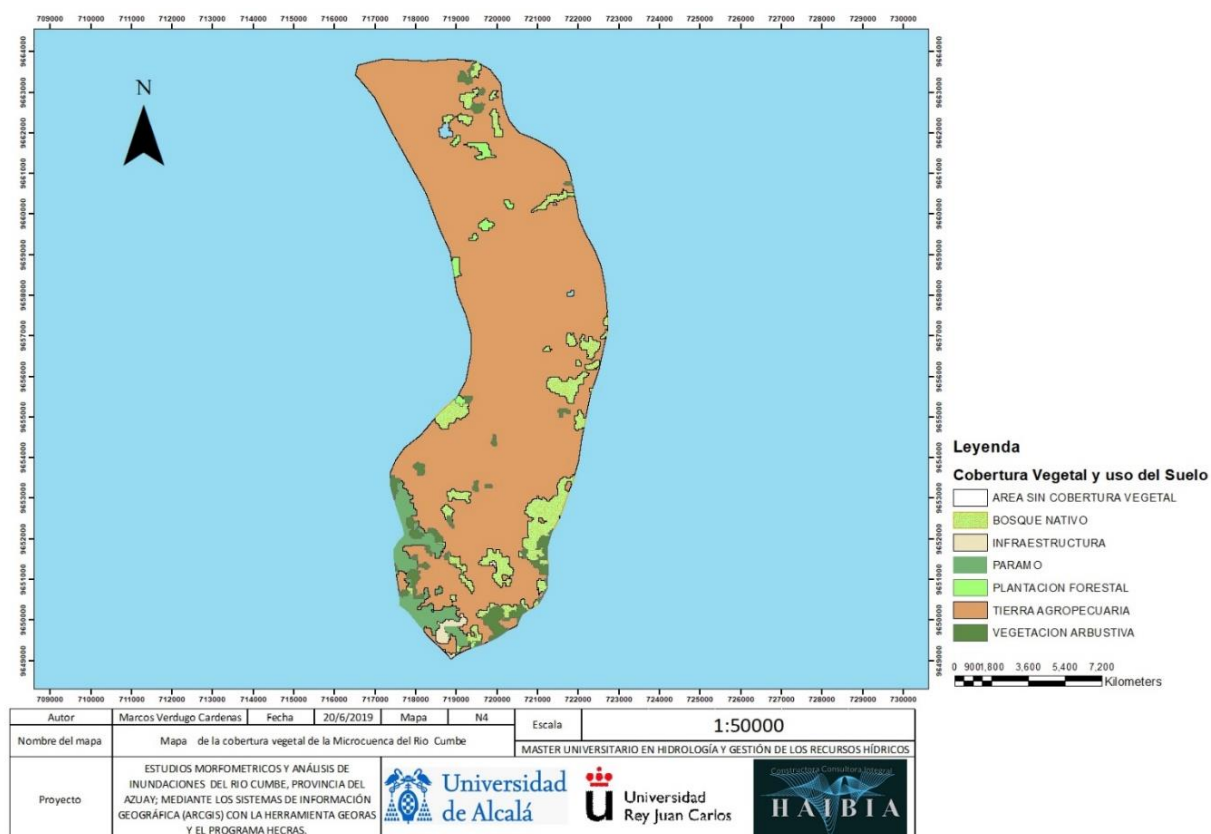


Figura 12: Cobertura vegetal y uso del suelo de la Microcuenca del río Cumbe

La microcuenca en mayor cantidad de uso de suelo es de actividad agrícola con 83,33%, siendo una superficie de bajo cultivo agrícola y pastos plantados, que se encuentran dentro de una rotación entre estos, seguido con 7,66% de bosque nativo de ecosistemas primarios o secundarios, se manifiesta por la presencia de árboles de diversas especies nativas.

Análisis de Inundación

Tabla 15: Cálculo de los caudales de periodos de retorno con el método Gumbel

n	Años	Qi(m ³ /s)	P = n / (N+1)	Y = -Ln (-Ln (P))
1	1998	27,076	0,058824	-1,041412
2	1999	34,001	0,117647	-0,760837
3	2000	27,802	0,176471	-0,550777
4	2001	24,278	0,235294	-0,369436
5	2002	19,787	0,294118	-0,201941
6	2003	11,402	0,352941	-0,040618
7	2004	19,787	0,411765	0,119569
8	2005	16,89	0,470588	0,282666
9	2006	43,208	0,529412	0,452574
10	2007	36,082	0,588235	0,633694
11	2008	80,304	0,647059	0,831678
12	2009	44,04	0,705882	1,054672
13	2010	19,072	0,764706	1,315784
14	2011	35,086	0,823529	1,639093
15	2012	34,451	0,882353	2,078137
16	2013	17,798	0,941176	2,803054

Tabla 16: Cálculo de los caudales de periodos de retorno con el método Gumbel2

Número de datos	16
Valor medio (Pm)	30,6915
Desviación típica (de la muestra) Ps	16,398969
Valor medio \bar{Y}	0,515
Desviación típica poblacional Sy	1,0306
\bar{Y}/Sy	0,500065
$1/Sy$	0,970305
$u=Pm-(\bar{Y}/Sy)*Ps$	22,491
$a=(1/Sy)*Ps$	15,912

Tabla 17: Caudales de periodo de retorno

Periodo de Retorno T (años)	$YT=-Ln(Ln(T/(T1-1)))$	a. YT	PT=u + a.YT
10	2,250367	35,81	58,30
50	3,901939	62,09	84,58
100	4,600149	73,20	95,69

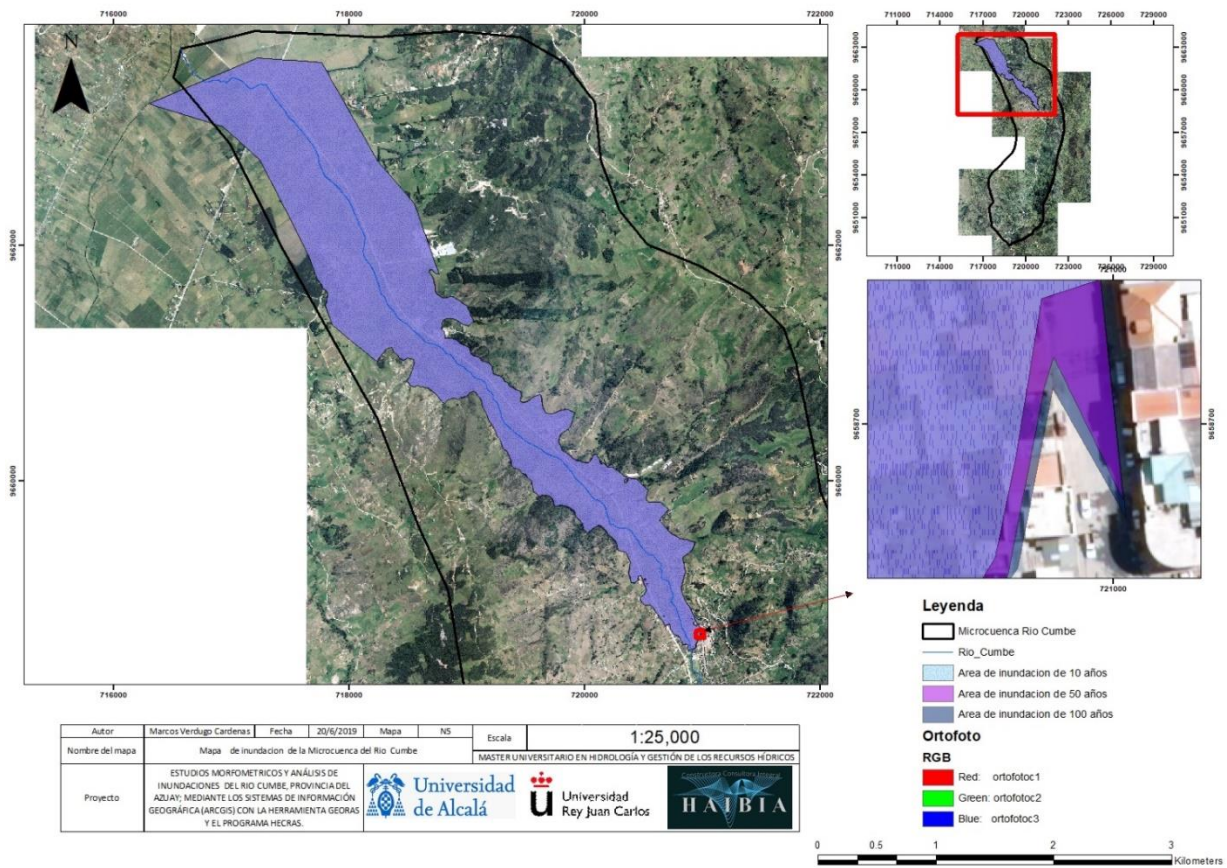


Figura 13: Mapa de inundación de la microcuenca del Rio Cumbe de los tiempos de retorno de 10, 50 y 100 años

Tabla 18: Análisis de las áreas de inundación

Periodo de retorno	Caudal m ³ / seg	Llanura de inundación (km ²)
10	58,30	4,14
50	84,58	4,5
100	95,69	5

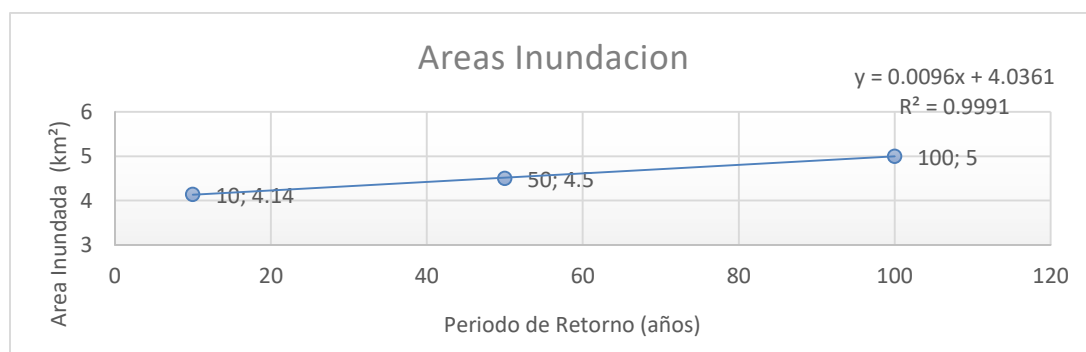


Figura 14: Análisis de las áreas de inundación (regresión lineal)

Una vez creado el perfil hidráulico con el modelo HEC RAS y GEO RAS, a través de los Sistemas de información geográfica, obtenemos las llanuras de inundación para cada período

de retorno, en donde en un período de retorno de 10 años se tiene una superficie de inundación 4,14 km², el de 50 años una superficie de 4,5 km² y el de 100 años una llanura de inundación de 5 km², donde podemos observar que en los tiempos de retorno de los caudales es proporcional al área de inundación. Considerando que el incremento del área de inundación es poca a medida que aumenta los tiempos de retorno, no existirán cambios grandes. En la figura 14 explica que el área de inundación tiene un incremento lineal de primer orden, con respecto al período de retorno.

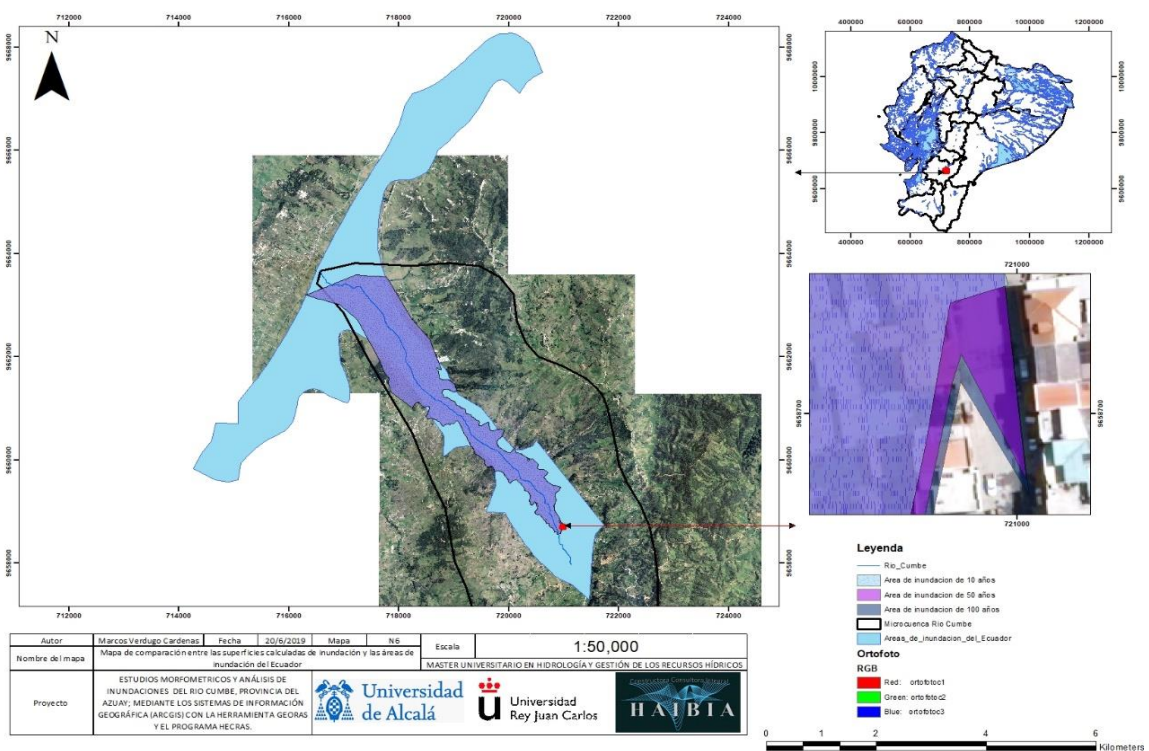


Figura 15: Mapa de comparación entre las superficies estudiadas de inundación y las áreas de inundación del Ecuador

Se descargó el shape de las áreas de inundación del INAMHI³-MAGAP⁴ (2002) del Ecuador, se cargó la capa en el ArcMap y su área es de 15,42 km², se comparó con las áreas de inundación estudiadas en donde no existe mucha diferencia, justificando que la capa descargada y las capas estudiadas del perfil hidráulico determina que la microcuenca es una zona propensa a inundaciones.

³ INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología – Ecuador)

⁴ MAGAP (Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuicultura y Pesca)

5. CONCLUSIONES

- Se delimito la microcuenca del río Cumbe y se obtuvo su mapa de ubicación mediante los sistemas de información geográfica; creando una base de datos de parámetros morfométricos que ayudará a instituciones públicas y privadas para la Gestión Integral de las Cuencas en la provincia del Azuay para futuras investigaciones.

-Los índices como la Pendiente media de la cuenca, coeficiente de masividad y Sinuosidad del Cauce Principal establecen que la microcuenca tiene pendientes fuertes en donde se presenta una fuerte erosión y arrastre de sedimentos en todo el recorrido, concluyendo que es una microcuenca montañosa en donde la mayoría de las vertientes nacen en las cabeceras de las montañas.

-Los parámetros morfométricos más significativos respecto a fenómenos naturales o crecidas en la microcuenca son el Coeficiente de compacidad, curva hipsométrica y la densidad de drenaje, que indica que es una microcuenca con materiales impermeables con poca infiltración teniendo una respuesta hidrológica rápida en sus llanuras, concluyendo que la microcuenca es vulnerable a una inundación frente a una lluvia alta, referido con el estudio morfométrico.

-La utilización de los sistemas de información geográfica y el programa HecRas son herramientas importantes para determinar las zonas de inundación, es muy importante la calibración correcta del modelo para así alcanzar un mejor acercamiento con la realidad.

-Podemos concluir que el Río Cumbe es una llanura en donde no se generan inundaciones permanentes sino temporales, se lo demuestra a través de la capa descargada de inundaciones del Ecuador y las capas estudiadas que coinciden en la misma zona.

-Al existir una inundación en la microcuenca del Río Cumbe afectaría más en la actividad agrícola (83,33%), por lo que existiría una pérdida económica en la zona de la microcuenca.

6. BIBLIOGRAFÍA

Aguirre N., (2007). Manual para el Manejo Sustentable de Cuencas Hidrográficas. Universidad Nacional de Loja.

Aparicio Mijares, F. J. (1992). Fundamentos de Hidrología de Superficie. (Primera Ed.). México D.F.: Editorial Limusa S.A.

Aparicio, F. (1996). Fundamentos de Hidrología de Superficie. 4ta. Edición. México. Editorial Limusa S.A. PP 303

Aparicio, F. (1999). Fundamentos de hidrología de superficie. México, D.F.: Editorial Lirnusa. Grupo Noriega Editores

Beltrán, G. (2010). Apuntes Cuencas Hidrográficas SIG. Universidad Técnica del Norte. Ibarra Ecuador.

Bladé, E., Sanchez, M., Sánchez, H.P., Niñerola, D., & Gomez, M. (2009). Modelación numérica en ríos en régimen permanente y variable. Una visión a partir del modelo HEC – RAS. Ediciones UPC

Burbano, F. (1989). Notas de Hidrología Preparado para el 4° Año de ingeniería Forestal. Universidad Técnica del Norte. Ibarra-Ecuador. 125 p.

Cartaya, S., & Mantuano, R. (2016). Identificación de zonas en riesgo de inundación mediante la simulación hidráulica en un segmento del Río Pescadillo, Manabí, Ecuador.

Chow, Ven Te, (1959). “Open Channel Hydraulics”. McGraw-Hill (New York, Toronto).

Coello, C. (2015). Análisis De La Vulnerabilidad A Eventos De Crecida Y Diseño De Obras Físicas Para La Protección De Márgenes E Infraestructura Del Río Tarqui. Cuenca, Ecuador.

Cordero Domínguez, I. (2013). Evaluación de la Gestión territorial de la Cuenca del rio Paute, estrategias y líneas de acción para superarlas.

Córdova, M. (2016). Parámetros geomorfológicos de cuencas hidrográficas.

Cotler, H., Mazari, M., & De Anda, J. (2006). Atlas de la cuenca Lerma-Chapala: construyendo una visión conjunta.

Díaz de la Cruz, V. (2012). Análisis Hidrológico E Hidráulico Mediante Técnicas Sig De La Peligrosidad Por Inundaciones En La Cuenca Del Pla De Sant Jordi (Mallorca). Universidad Complutense de Madrid.

Duque Sarango, P. J. (2012). Estudio de la influencia de la adición de cloruro férrico en la sedimentabilidad de los fangos activados. Universidad Politécnica de Valencia.

Encalada, J., y& Jara, R. (2010). “Implementación del Modelo Hidráulico HEC GeoRAS en la Modelación Hidráulica del Sistema para el Control de Inundaciones de los ríos Cañar y Bulubulu”. Cuenca, Ecuador.

Faustino, J. (2006). *Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas*. Turrialba- Costa Rica.: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CA TIE).

Fierro, D. y Jiménez, L. (2011). *Caracterización de la Microcuenca del río Manzano, Cantón Alausí, Provincia de Chimborazo y Propuesta de Plan de Manejo, Utilizando Herramientas SIG*. Escuela Politécnica del Ejército. Sangolqui, Ecuador.

França, G.V. (1968). *Interpretação fotográfica de bacias e redes de drenagem aplicada a solos da região de Piracicaba*. Tese de Doutorado. Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.

Fuentes Junco, J. D. J. A. (2004). "Análisis Morfométrico de Cuencas: Caso de Estudio del Parque Nacional Pico de Tancitaro". Instituto Nacional de Ecología.

Gaspari, F., Senisterra, G., Delgado, M., Rodríguez, A., & Besteiro, S. (2010). *Manual de Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas*. Grupo de Manejo de Cuencas. La Plata - Argentina. 321 p.

Gaspari, F.J. (2002). *Plan de ordenamiento territorial en cuencas serranas degradadas. Aplicación de sistemas de información geográfica*. Huelva. España. Ediciones cooperativas. Buenos aires. 179 pp.

Gumbel, E.J. (1958). *Statistics of Extremes*. Columbia Univ. Press, New York. value. Colum. Univ. Press. N.Y.,375.

Heras, R. (1972). *Manual de Hidrología*. Madrid, España: Instituto de Hidrología.

Horno, J.M. y Sánchez, J. (1987). *Aplicación Práctica Del Programa Hec-Ras*.

Horton, R.E. (1945). *Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology*. Geological Society of America Bulletin.

Ibáñez Asensio, S., Moreno Ramón, H., & Gisbert Blanquer, J. (2008). "Métodos para la Determinación del Tiempo de Concentración (tc) de una Cuenca Hidrográfica."

Kirpich, Z. P. (1940). *Times of concentration of small agricultural watersheds*, Civ. Eng. Vol. 10, no. 6, 362 P.

Langbein, W. B. et al., (1947). *Topographic characteristics of drainage basins*; U. S. Geol. Survey on water supply, document 968-C, p. 125-157.

Linsley, A., Kohler, T., & Paulus, E. (1977). *HIDROLOGIA PARA INGENIEROS*. Editorial Mc GRAW-HILL. Segunda edición. Cali – Colombia. 398 pág.

Llamas, J. (1993). *Hidrología General, Principios y Aplicaciones*. Bilbao: Servicios Editorial de la Universidad del País Vasco.

López Cadenas de Llano (1998). Restauración Hidrológica Forestal de Cuencas y Control de Erosión. Ingeniería Medioambiental, TRAGSATEC, Ministerio de Medio Ambiente. Madrid, España. Editorial Mundi Prensa. PP 945

Mantilla R., Mesa O, & Poveda G. (2005). Geometría, topología y morfometría de las cuencas Magdalena-Cauca a partir de modelos digitales de elevación de terreno. Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia, Medellín.

Marin, A.(2006). Metodología a Seguir para realizar una simulación utilizando Hec-Georas para Arcview. <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3274/53816-9.pdf>

Martonne, E. (1940). *Traité de géographie physique*. Armand Colin, Paris.

Monsalve S, G. (1999). "Hidrología en la Ingeniería". 2da Edición. Santa Fe de Bogotá-Colombia: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.

Palma, E., y& Villagómez, E. (2012). ANÁLISIS, EVALUACIÓN Y PROPUESTA DE UNA RED DE MONITOREO HIDROGEOLOGICO PARA LA SUBCUENCA DEL RÍO TARQUI. Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador.

Rodrigues, V.A. (2014). Evaluación de los procesos hidrológicos en microcuencas hidrográficas. Universidad Estatal Paulista (UNESP). Botucatu, San Paulo, Brasil.

Sánchez, J. (2007). Manual introductorio a HEC-RAS.

Sánchez, V. A. (1987). Conceptos elementales de hidrología forestal agua, suelo y vegetación. La cuenca hidrográfica. Editorial. División de Ciencias Forestales. Primera Edición. Volumen 1. Universidad Autónoma de Chapíngo. Pp. 57-97

Schumm, S. A. (1963). Sinuosity of alluvial rivers on the Great Plains. *Geological Society of America Bulletin*. 74(9), 1089-1100.

Campos, A. (1987). Procesos del ciclo hidrológico. Universidad Autónoma de San Luís Potosí. Vol. 1, t. 1/2. San Luís Potosí. México. Pp. 2-52.

Strahler, A. (1964). Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks. In: Chow, V (ed.). *Manual of Applied Hydrology*. Mc Graw-Hill. New York, USA. Mc Graw-Hill.

Strahler, A.N. (1957). Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Transactions of the American Geophysical Union* 38, 913-920.

Tragsa. (1994). "Restauración hidrológica forestal de las cuencas y control de erosión". Mundiprensa. Madrid, España.

U.S. Army Corps of Engineers. (2008). HEC RAS River Analysis System. Users manual .
www.hec.usace.army.mil

Vallejo, E. (2014). Análisis de las crecidas presentadas en los ríos Tarqui, Yanuncay y Tomebamba desde 1997 hasta 2011. Cuenca, Ecuador.

Vanacker, V., Molina, A., Govers, G., Poesen, J. & Deckers, J., (2007). Spatial variation of suspended sediment concentrations in a tropical Andean river system: The Paute River, southern Ecuador Human Impact and Geomorphology in Tropical Mountain Areas. *Geomorphology*, Vol. 87(1-2), pp. 53-67.

Verdugo ,M.(2017). Análisis Morfométrico de las Microcuencas a las que Pertenece El Bosque y Vegetación Protectora Aguarongo (BVPA), Influencia en el Comportamiento Hidrológico. Universidad Politécnica Salesiana .Cuenca, Ecuador.

Villa, D., y& Matute, L. (2011). Cambios en las actividades agrícolas y ganaderas ocasionadas por migración en la Parroquia San Luis de Cumbe, Cantón Cuenca, Provincia del Azuay, (2000 – 2011). UNIVERSIDAD DE CUENCA, Cuenca, Ecuador.

Villanueva, M. (2002). Microcuencas (1 ed.). México.D.F.: Universidad Autónoma Chapingo.

Villon, M. (2002). Hidrología. (2, Ed.) . Lima, Perú: Editorial Villon .Instituto Tecnológico de Costa Rica-Escuela de Ingeniería Agrícola.

Villon, M. (2002). Hidrología. (2, Ed.). Lima, Perú: Editorial Villon. Instituto Tecnológico de Costa Rica-Escuela de Ingeniería Agrícola.

Yaguachi, T. (2013). Diagnóstico Ambiental y Desarrollo del Plan de Manejo y Conservación de la Subcuenca del Río Chillayacu de la Cuenca Media del Río Jubones en la Provincia de el Oro. Universidad Central del Ecuador. Quito-Ecuador.

7. ANEXOS

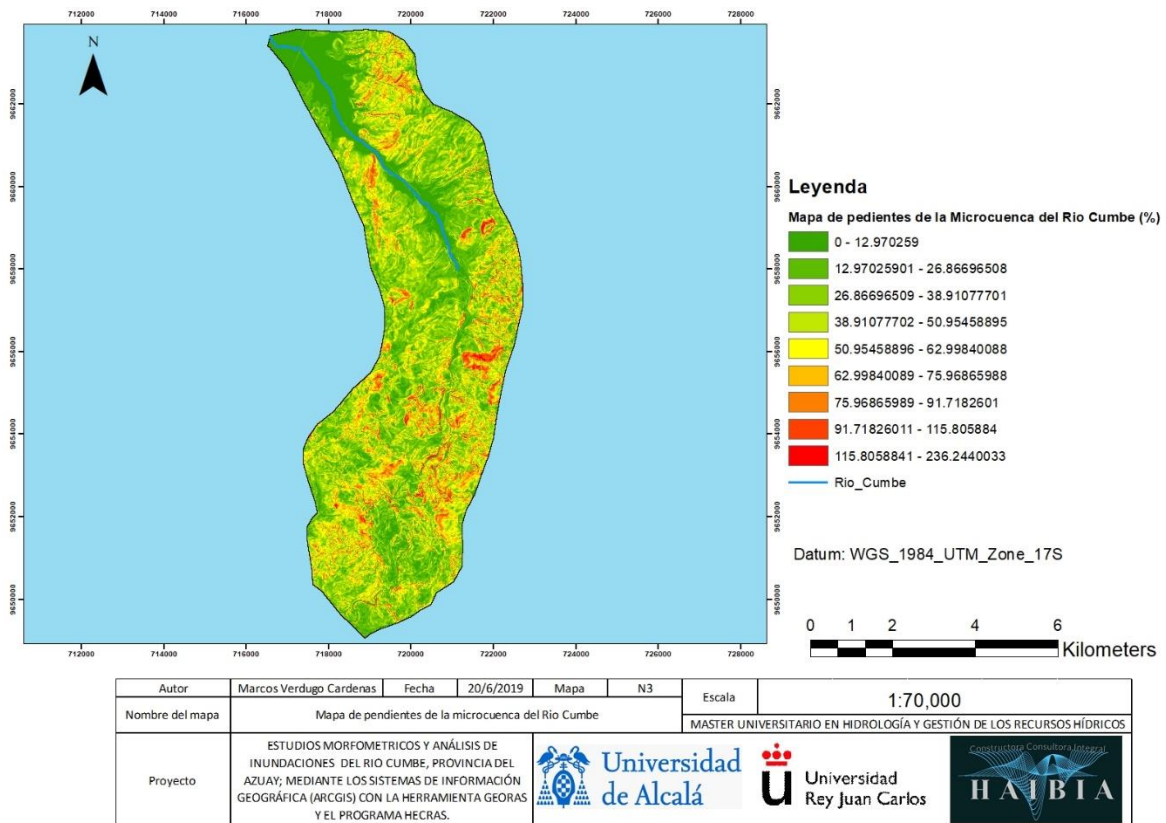


Figura 16: Mapa de pendientes de la microcuenca del Río Cumbe

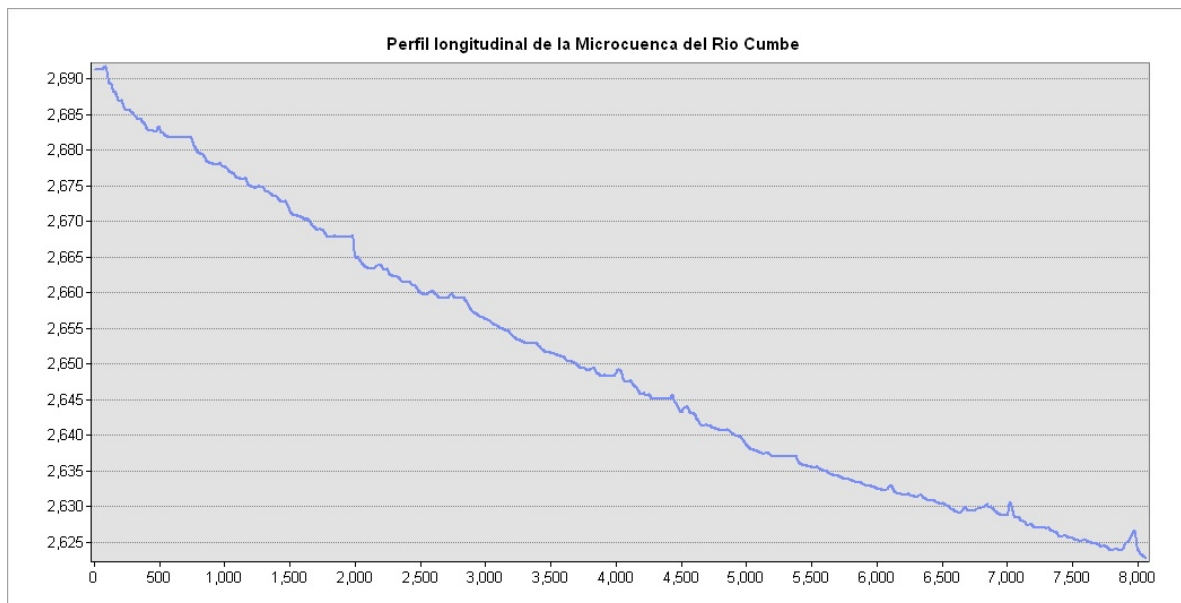


Figura 17: Perfil longitudinal del Río Cumbe

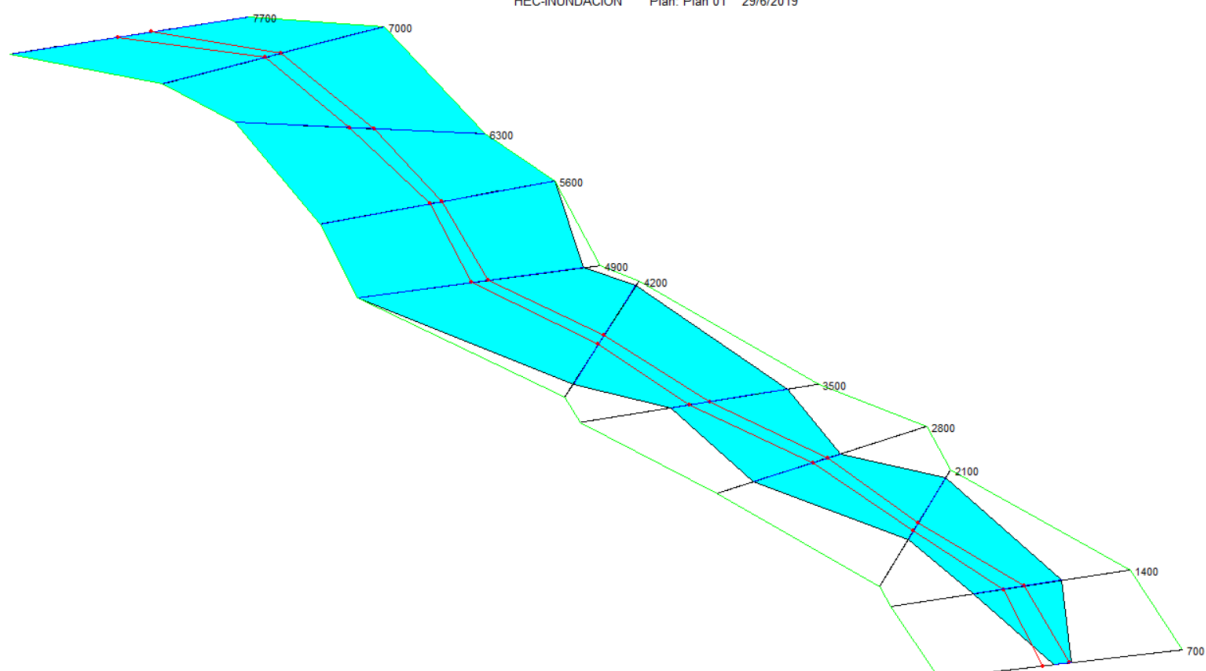


Figura 18: Perfil hidráulico del Rio Cumbe

Tabla 19: Datos del último tramo del Perfil hidráulico del Rio Cumbe

Paramentos	Tiempos de Retorno(años)		
	10	50	100
E.G.Elev (m)	2682,44	2682,63	2682,70
Vel Heah(m)	0,20	0,26	0,30
W.S.Elev (m)	2682,44	2682,63	2682,70
Crit W.S.(m)	2622,86	2622,90	2622,92
E.G. Slope(m/m)	0,11	0,23	0,30
Q Total (m3/s)	58,30	84,58	95,69
Top Width (m)	1000	1000	1000
Vel total(m/s)	3	3,20	3,70
Max Chl Dpth(m)	61,16	61,35	61,42
Conv. Total (m3/s)	27562950	27700970	27754090
Length Wtd.(m)	432,04	432,05	432,05
Min Ch El(m)	2623,64	2623,64	2623,64
Alpha	1	1	1
Frctn Loss(m)	1	1	1
C & E Loss (m)	1	1	1