



# **UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS**

**AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES**

**CARRERA DE INGENIERÍA FORESTAL**

**Trabajo de titulación presentado como requisito previo  
a la obtención del título de Ingeniera Forestal**

**INFLUENCIA DE LA COBERTURA FORESTAL EN LA GENERACIÓN DE  
CAUDALES DE LA MICROCUENCA DEL RÍO CHORLAVÍ**

**AUTORA**

Jennifer Elizabeth Gómez Arcos

**DIRECTOR**

Ing. Jorge Luis Ramírez López, M.Sc.

**IBARRA – ECUADOR**

2019

# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS

AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES

CARRERA DE INGENIERÍA FORESTAL

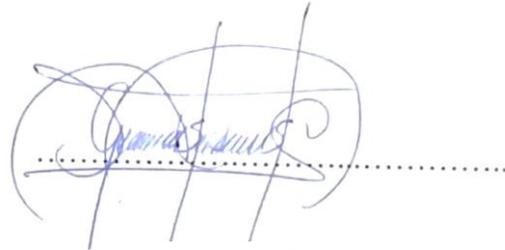
## “INFLUENCIA DE LA COBERTURA FORESTAL EN LA GENERACIÓN DE CAUDALES DE LA MICROCUENCA DEL RÍO CHORLAVÍ”

Trabajo de titulación revisado por el Comité Asesor, por lo cual se autoriza la presentación como requisito parcial para obtener el título de:

**INGENIERO FORESTAL**

### APROBADO

Ing. Jorge Luis Ramírez López M.Sc.  
**Director de trabajo de titulación**



Ing. José Raúl Guzmán Paz, M.Sc.  
**Tribunal de trabajo de titulación**



Ing. Dario Paúl Arias Muñoz, M.Sc.  
**Tribunal de trabajo de titulación**

Ing. Andrés Manolo Carrión Burgos, Mgs.  
**Tribunal de trabajo de titulación**



Ibarra - Ecuador

2019



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

## BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

### AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN

#### A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

#### 1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
<b>CÉDULA DE IDENTIDAD:</b>		100397695-6	
<b>APELLIDOS Y NOMBRES:</b>		Gómez Arcos Jennifer Elizabeth	
<b>DIRECCIÓN:</b>		Atuntaqui, Calles García Moreno y Santa Bertha	
<b>EMAIL:</b>		<a href="mailto:jegomeza@utn.edu.ec">jegomeza@utn.edu.ec</a>	
<b>TELÉFONO FIJO:</b>		<b>TELÉFONO MÓVIL:</b>	0979491830

DATOS DE LA OBRA	
<b>TÍTULO:</b>	INFLUENCIA DE LA COBERTURA FORESTAL EN LA GENERACIÓN DE CAUDALES DE LA MICROCUENCA DEL RÍO CHORLAVÍ
<b>AUTOR (ES):</b>	Gómez Arcos Jennifer Elizabeth
<b>FECHA: DD/MM/AAAA</b>	01 de octubre del 2019


SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
<b>PROGRAMA:</b>	<input checked="" type="checkbox"/> <b>PREGRADO</b> <input type="checkbox"/> <b>POSGRADO</b>
<b>TITULO POR EL QUE OPTA:</b>	Ingeniera Forestal
<b>ASESORES /DIRECTOR:</b>	Ing. José Raúl Guzmán Paz, M. Sc. Ing. Darío Paúl Arias Muñoz, M.Sc. Ing. Andrés Manolo Carrión Burgos, Mgs. Ing. Jorge Luis Ramírez López M.Sc.

## 2. CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, al 01 día del mes de octubre del 2019.

**LA AUTORA:**



Jennifer Elizabeth Gómez Arcos



## UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

### CESIÓN DE DERECHOS DEL AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Yo, Jennifer Elizabeth Gómez Arcos, con cédula de ciudadanía Nro. 100397695-6; manifiesto la voluntad de ceder a la Universidad Técnica del Norte los derechos patrimoniales consagrados en la Ley de Propiedad Intelectual del Ecuador, artículos 4, 5 y 6, en calidad de autor de la obra o trabajo de titulación denominado **“INFLUENCIA DE LA COBERTURA VEGETAL EN LA GENERACIÓN DE CAUDALES DE LA MICROCUENCA DEL RÍO CHORLAVÍ”**, que ha sido desarrollada para optar por el título de Ingeniero Forestal en la Universidad Técnica del Norte, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente. En mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Técnica del Norte.

Jennifer Elizabeth Gómez Arcos

C.C.: 100397695-6

Ibarra, al 01 día de octubre del 2019

## REGISTRO BIBIOGRÁFICO

**Guía:** FICAYA - UTN

**Fecha:** 01 de octubre del 2019

Jennifer Elizabeth Gómez Arcos: **“INFLUENCIA DE LA COBERTURA FORESTAL EN LA GENERACIÓN DE CAUDALES DE LA MICROCUENCA DEL RÍO CHORLAVÍ”** /Trabajo de titulación. Ingeniero Forestal. Universidad Técnica del Norte. Carrera de Ingeniería Forestal. Ibarra, 01 de octubre del 2019. 128 páginas.

**DIRECTOR:** Ing. Jorge Luis Ramírez López M.Sc.


El objetivo principal de la presente investigación fue: Identificar la variación multitemporal de las áreas cubiertas por bosques y su influencia en la generación de caudales de la microcuenca del río Chorlaví. Entre los objetivos específicos se encuentra: Determinar la respuesta hidrológica de la microcuenca frente a fenómenos pluviales en base a sus características morfométricas. Identificar la variación de la cobertura forestal dentro de la microcuenca en el periodo 2000 – 2015 y Determinar la influencia de los cambios multitemporales de la vegetación boscosa sobre el caudal de la microcuenca.

**Fecha:** 01 de octubre del 2019



Ing. Jorge Luis Ramírez López M. Sc.

**Director de trabajo de titulación**



Jennifer Elizabeth Gómez Arcos

**Autora**

## **DEDICATORIA**

*Quiero dedicar esta tesis con mucho cariño a mis padres, gracias por educarme con amor, cariño, sabiduría, respeto y responsabilidad. Ustedes siempre serán mi pilar fundamental para que yo siga adelante y de todo corazón agradezco que siempre estuvieron a mi lado y que me apoyaran en el camino que elegí.*

*A mis familiares y amigos que siempre estuvieron pendientes de mí y me supieron dar su apoyo cuando más lo necesitaba.*

*Finalmente a mi persona que con mucho esfuerzo y dedicación logré culminar con una de mis metas, aunque fue un camino muy difícil nunca decaí y siempre me di fuerzas. ¡Fighting!*

*Jennifer Gómez*

## AGRADECIMIENTO

*En primera instancia quiero agradecer a Dios por guiarme por el camino del bien, por darme una familia maravillosa y por estar siempre en mi corazón. Un agradecimiento especial a mis padres William y Andrea que supieron comprenderme y darme su amor incondicional. ¡Los amo! También a mi hermana Joselyn por su cariño y apoyo. ¡Te adoro pequeña!*

*Un profundo agradecimiento a mi director el Ing. Jorge Ramírez quien supo guiarme, aconsejarme y ayudarme en la realización de mi trabajo, gracias por su paciencia y apoyo. ¡Es el mejor!*

*Un agradecimiento a mis asesores Ing. Paúl Arias, Ing. José Guzmán e Ing. Manolo Carrión, quienes colaboraron con la realización de este trabajo.*

*A mi tía Gloria y mis primas Jessy, Taty y Lore que son como mis hermanas y siempre me apoyaron en todo momento. ¡Las quiero!*

*A mi mejor amiga Pathy gracias por ser como una hermana mayor para mí, por cuidarme, protegerme y brindarme tu cariño, eres muy importante en mi vida. A mi mejor amigo Andrés gracias por el apoyo y los buenos momentos compartidos. A mis amigos en general quienes me acompañaron en los días buenos y malos. ¡Los quiero mucho!*

*Jennifer Gómez*

## ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN .....	xvi
Capítulo I .....	1
Introducción .....	1
1.1 Objetivos .....	2
1.1.1 Objetivo General .....	2
1.1.2 Objetivos Específicos .....	2
1.2 Hipótesis .....	2
Capítulo II .....	3
Marco teórico .....	3
2.1 Fundamentación legal .....	3
2.1.1 Constitución de la República del Ecuador 2008 .....	3
2.1.2 Ley orgánica de recursos hídricos, usos y aprovechamiento del agua .....	3
2.1.3 Línea de investigación .....	4
2.2 Fundamentación Teórica .....	4
2.2.1 Cuenca hidrográfica .....	4
2.2.2 Cobertura forestal .....	13
2.2.3 Relación del bosque con los procesos hidrológicos .....	14
2.2.4 Sistemas de Información Geográfica .....	14
2.2.5 Teledetección .....	15
2.2.6 Balance hídrico .....	17
2.2.7 Modelamiento Hidrológico con HEC-HMS .....	19
2.2.8 Crecidas de inundación .....	22
2.2.9 Modelamiento con HEC-RAS .....	25
2.2.10 Pruebas estadísticas .....	25
Capítulo III .....	27

Materiales y Métodos .....	27
3.1 Características del sitio .....	27
3.1.1 Ubicación Política .....	27
3.1.2 Datos climáticos .....	27
3.2 Materiales, equipos y softwares.....	27
3.2.1 Materiales .....	27
3.2.2 Equipos .....	27
3.2.3 Softwares .....	27
3.3 Metodología.....	28
3.3.1 Recolección de información .....	28
3.3.2 Delimitación del área de estudio .....	28
3.3.3 Determinación de la respuesta hidrológica de la microcuenca del río Chorlaví .....	28
3.3.4 Identificación de la variación de la cobertura forestal.....	36
3.3.5 Determinación de la influencia de los cambios multitemporales con relación a los caudales .....	41
Capítulo IV .....	51
Resultados y Discusión.....	51
4.1 Delimitación de la microcuenca del río Chorlaví.....	51
4.2 Determinación de la respuesta hidrológica de la microcuenca del río Chorlaví .....	52
4.2.1 Caracterización Morfométrica .....	52
4.2.2 Caracterización Biofísica.....	57
4.3 Identificación de la variación de la cobertura forestal .....	62
4.3.1 Validación de la clasificación supervisada .....	62
4.3.2 Mapas de cobertura.....	64
4.3.3 Cambio de uso de suelo .....	66

4.4 Determinación de la influencia de los cambios multitemporales con relación a los caudales.....	70
4.4.1 Delimitación de la subcuenca del río Ambi .....	70
4.4.2 Determinación del número de curva de la subcuenca del río Ambi.....	71
4.4.3 División de la subcuenca del río Ambi.....	74
4.4.4 Modelamiento del caudal superficial con HEC-HMS.....	75
4.4.5 Determinación de la relación caudal-vegetación boscosa .....	82
4.4.6 Simulación de posibles crecidas mediante HEC-RAS .....	87
Capítulo V .....	91
Conclusiones y Recomendaciones .....	91
5.1 Conclusiones.....	91
5.2 Recomendaciones .....	92
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	93
ANEXOS.....	102
Anexo A: Figuras .....	102
Anexo B: Tablas .....	106
Anexo C: Fotografías.....	107

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1:</b> Ponderaciones para el área de la microcuenca .....	288
<b>Tabla 2:</b> Ponderaciones para el factor de forma .....	299
<b>Tabla 3:</b> Ponderaciones para el Coeficiente de Gravelius.....	30
<b>Tabla 4:</b> Ponderaciones del tipo de relieve.....	32
<b>Tabla 5:</b> Ponderaciones de la densidad de drenaje .....	33
<b>Tabla 6:</b> Estaciones de precipitación cercanas a la microcuenca .....	344
<b>Tabla 7:</b> Estaciones meteorológicas cercanas a la microcuenca .....	355
<b>Tabla 8:</b> Rangos de valoración del coeficiente Kappa .....	40
<b>Tabla 9:</b> Tipos de suelo y textura de suelo .....	42
<b>Tabla 10:</b> Clases de uso de suelo para la determinación del número de curva .....	443
<b>Tabla 11:</b> Valores de referencia del criterio Nash-Sutcliffe.....	488
<b>Tabla 12:</b> Parámetros de forma .....	52
<b>Tabla 13:</b> Parámetros relativos a la red hidrográfica.....	55
<b>Tabla 14:</b> Cálculo de la precipitación media anual. ....	588
<b>Tabla 15:</b> Cálculo de la temperatura media anual .....	599
<b>Tabla 16:</b> Zonas climáticas de la microcuenca.....	61
<b>Tabla 17:</b> Matriz de confusión para el año 2000.....	62
<b>Tabla 18:</b> Matriz de confusión para el año 2008.....	63
<b>Tabla 19:</b> Matriz de confusión para el año 2015.....	63
<b>Tabla 20:</b> Matriz de transición para el periodo 2000-2008.....	66
<b>Tabla 21:</b> Matriz de transición para el periodo 2008-2015.....	66
<b>Tabla 22:</b> Tasa de deforestación anual .....	68
<b>Tabla 23:</b> Área y porcentaje de cada tipo de suelo.....	72
<b>Tabla 24:</b> Números de curva parciales y número de curva ponderado todos los años de estudio.....	73

<b>Tabla 25:</b> Área y porcentaje de las subdivisiones .....	75
<b>Tabla 26:</b> Datos del modelamiento hidrológico para cada subcuenca. ....	76
<b>Tabla 27:</b> Valores optimizados de los parámetros del método de recesión.....	76
<b>Tabla 28:</b> Resultado de la simulación para la subcuenca del río Ambi.....	81
<b>Tabla 29:</b> Datos del modelamiento hidrológico para la microcuenca.....	82
<b>Tabla 30:</b> Valores máximos de las simulaciones de la microcuenca.....	83
<b>Tabla 31:</b> Valores totales de las simulaciones de la microcuenca.....	84
<b>Tabla 32:</b> Caudales promedios de la microcuenca del río Chorlaví.....	85
<b>Tabla 33:</b> Resultados de la prueba de normalidad.....	86
<b>Tabla 34:</b> Resultados de la prueba de igualdad de medias.....	86
<b>Tabla 35:</b> Resultados de la prueba T student.....	86
<b>Tabla 36:</b> Caudales máximos para los distintos tiempos de retorno.....	88
<b>Tabla 37:</b> Afectación por inundación en la microcuenca .....	89
<b>Tabla 38:</b> Afectación en las parroquias por inundación.....	89
<b>Tabla 39:</b> Caudales simulados para los periodos de retorno.....	90

## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.</i> Cuenca hidrográfica.....	5
<i>Figura 2.</i> Zonas de un sistema fluvial .....	9
<i>Figura 3.</i> Etapas de una cuenca hidrográfica .....	11
<i>Figura 4.</i> Ciclo hidrológico del agua.....	18
<i>Figura 5.</i> Métodos hidrológicos utilizados en el HEC-HMS.....	20
<i>Figura 6.</i> Niveles de especificación del método SMA.....	21
<i>Figura 7.</i> Elementos de un río .....	23
<i>Figura 8.</i> Delimitación de la microcuenca del río Chorlaví.....	51
<i>Figura 9.</i> Polígonos altitudinales en intervalos de 200 m. ....	53
<i>Figura 10.</i> Curva hipsométrica de la microcuenca del río Chorlaví. ....	53
<i>Figura 11.</i> Mapa de pendientes de la zona de estudio.....	54
<i>Figura 12.</i> Orden de drenaje de los ríos .....	56
<i>Figura 13.</i> Mapa de Isoyetas de la precipitación media anual de la microcuenca .....	57
<i>Figura 14.</i> Mapa de Isotermas de la temperatura media anual de la microcuenca .....	59
<i>Figura 15.</i> Mapa de zonas climáticas de la microcuenca.....	61
<i>Figura 16.</i> Análisis multitemporal para los años 2000, 2008 y 2015 .....	64
<i>Figura 17.</i> Cambio de la cobertura forestal en los años 2000, 2008 y 2015.....	65
<i>Figura 18.</i> Variación de la cobertura forestal.....	68
<i>Figura 19.</i> Delimitación de la subcuenca del río Ambi .....	70
<i>Figura 20.</i> Mapa de tipos de suelos de la subcuenca del río Ambi.....	71
<i>Figura 21.</i> Mapa de número de curva de la subcuenca del río Ambi.....	72
<i>Figura 22.</i> Mapa de subdivisiones de la subcuenca del río Ambi.....	74
<i>Figura 23.</i> Modelo básico de la subcuenca del río Ambi.....	75
<i>Figura 24.</i> Hidrograma de la prueba de calibración.....	77

<i>Figura 25.</i> Diagrama de dispersión entre caudales simulados y observados calibrados.....	77
<i>Figura 26.</i> Resumen de la calibración.....	78
<i>Figura 27.</i> Hidrograma de la prueba de validación.....	79
<i>Figura 28.</i> Diagrama de dispersión entre caudales simulados y observados validados.....	79
<i>Figura 29:</i> Resumen de la validación.....	80
<i>Figura 30.</i> Hidrograma de la subcuenca del río Ambi.....	81
<i>Figura 31.</i> Resumen de la simulación de la microcuenca del Chorlaví para el año 2015. .	83
<i>Figura 32.</i> Mapa de comparación de inundaciones en la microcuenca del río Chorlaví. ...	88

**TITULO: “INFLUENCIA DE LA COBERTURA FORESTAL EN LA GENERACIÓN DE CAUDALES DE LA MICROCUENCA DEL RÍO CHORLAVÍ”**

**Autora:** Jennifer Elizabeth Gómez Arcos

**Director de trabajo de titulación:** Ing. Jorge Luis Ramírez López, M.Sc.

**Año:** 2019

**RESUMEN**

El presente estudio determinó la influencia que tienen las áreas cubiertas por bosques en la generación de caudales de la microcuenca del río Chorlaví. Esto se realizó a través del cumplimiento de tres objetivos: determinar la respuesta hidrológica de la microcuenca en base a sus características morfométricas, identificar la variación de la cobertura forestal en el periodo 2000-2015 y determinar la influencia de los cambios multitemporales sobre el caudal de la microcuenca. Las características morfométricas especialmente la curva hipsométrica indicó que el río se encuentra en un estado de vejez lo que lo hace susceptible al arrastre de sedimentos. El análisis multitemporal mostró que la cobertura forestal varió de 3341,42 ha en el año 2000 a 2252,87 ha en al año 2015, por otro lado, los cultivos agrícolas e infraestructura aumentaron de 2625,76 ha a 3775,89 ha en los 15 años de estudio. En el modelamiento hidrológico del caudal se pudo observar que la disminución de la cobertura forestal incidió en la captación de agua lluvia, es así que para los años 2008 y 2015 la pérdida de precipitación fue menor que en el año 2000, esto favoreció al volumen total de descarga de 944, 20 mm en el año 2000 a 973,22 mm en el año 2015. Los resultados obtenidos permiten concluir que la microcuenca de acuerdo a parámetros de forma y relieve tiene una tendencia a crecidas de mediana magnitud y procesos de sedimentación. Existió un cambio en las coberturas forestales bosques, vegetación arbustiva y herbácea en cada periodo analizado debido al crecimiento del área urbana y cultivos, con un fuerte impacto en el periodo 2000-2008. La disminución de la cobertura forestal incidió en el incremento de escorrentía superficial y el crecimiento del caudal en épocas de precipitación en la microcuenca.

**Palabras claves:** respuesta hidrológica, análisis multitemporal, modelamiento hidrológico, sedimentación, escorrentía superficial

**TOPIC: “INFLUENCE OF FOREST COVER IN THE GENERATION OF FLOW RATES OF THE CHORLAVÍ RIVER MICROBASIN”**

**Author:** Jennifer Elizabeth Gómez Arcos

**Director of thesis:** Ing. Jorge Luis Ramírez López, M.Sc.

**Year:** 2019

**ABSTRACT**

This document aimed to determine the influence that the areas covered by forests have in the water generation of the “Chorlaví” river microbasin. This was done through the fulfillment of three objectives: to determine the hydrological response of the microbasin based on its morphometric characteristics, to identify the variation of forest cover from 2000 to 2015 and determine the influence of multitemporal changes on the microbasin flow. The morphometric characteristics, especially the hypsometric curve, showed that the river is in a state of old age, which makes it susceptible to sediment dragging. The multitemporal analysis showed that forest cover varied from 3341.42 ha in 2000 to 2252.87 ha in 2015, on the other hand, agricultural crops and infrastructure increased from 2625.76 ha to 3775.89 ha during the 15 years of study. In the hydrological modeling of the flow it was observed that the decrease in forest cover affected rainwater collection, so that for the years 2008 and 2015 the loss of precipitation was lower than in the year 2000, this favored the total discharge volume from 944.20 mm in the year 2000 to 973.22 mm in the year 2015. The results obtained allow to conclude that the microbasin according to parameters of shape and relief has a tendency to medium magnitude floods and sedimentation processes. Existed a change in forest cover, shrub and herbaceous vegetation in each period analyzed due to the growth of the urban area and crops, with a strong impact in the period 2000-2008. The decrease in forest cover affected the increase in surface runoff and the growth of the flow in times with precipitation of the microbasin.

**Keywords:** hydrological response, multitemporal analysis, hydrological modeling, sedimentation, surface runoff.

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

La estrecha relación que tiene la cobertura forestal con los procesos hidrológicos dentro de las cuencas hidrográficas se estudia desde hace aproximadamente 100 años (Huber y Trecaman, 2002). De entre los componentes del ciclo hidrológico la precipitación es el punto de partida de ingreso de agua al sistema (Villegas, 2004).

Parte de la precipitación es interceptada por las hojas y ramas de los bosques, cuando la capacidad de intercepción es rebasada empieza un descenso de agua por el fuste hasta llegar al suelo, aquí se infiltra hasta remplazar por completo el aire de los micro y macroporos. En este momento empieza otro proceso conocido como escorrentía, generándose una película de agua sobre el suelo que se mueve por efecto de gravedad (Cantú y González, 2005).

La cobertura forestal con su aporte de materia orgánica hace que la textura del suelo se vuelva granulosa, lo que favorece el proceso de infiltración y recarga de acuíferos subterráneos (Pizarro *et al.*, 2005). Es así que, al reducir las superficies cubiertas por bosques, en especial en la parte alta de la microcuenca, los procesos hidrológicos se ven alterados.

La pérdida de la capacidad de almacenamiento de agua por parte de los suelos, la disminución de reservas subterráneas que alimentarían los caudales en épocas secas, los incrementos de deslaves, inundaciones y procesos erosivos son los principales problemas registrados (Foley *et al.*, 2005).

La parte alta de la microcuenca del río Chorlaví, donde se genera la mayor parte de recargas hídricas que alimentan los cauces de las partes medias y bajas, está afectada principalmente por la deforestación y el cambio de uso de suelo (Tituaña, 2011). En este contexto el propósito de la investigación fue conocer cuáles son los cambios de la vegetación boscosa a lo largo de un periodo de tiempo y sus efectos en la generación de escorrentía y abastecimiento hídrico del cauce principal de la microcuenca (Pizarro *et al.*, 2005).

Para cumplir con el propósito de la investigación se realizó un análisis multitemporal de las coberturas forestales en tres periodos de tiempo diferentes, una simulación hídrica mediante el software HEC-HMS y una simulación crecidas mediante el software HEC-RAS;

de tal modo que el estudio genere información importante para la toma de decisiones en el manejo de la microcuenca del río Chorlaví, y la protección del recurso hídrico para sus habitantes.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo General**

Identificar la variación multitemporal de las áreas cubiertas por bosques y su influencia en la generación de caudales de la microcuenca del río Chorlaví.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

- Determinar la respuesta hidrológica de la microcuenca frente a fenómenos pluviales en base a sus características morfométricas.
- Identificar la variación de la cobertura forestal dentro de la microcuenca en el periodo 2000 – 2015.
- Determinar la influencia de los cambios multitemporales de la vegetación boscosa sobre el caudal de la microcuenca.

## **1.2 Hipótesis**

**H. 0.:** Las variaciones multitemporales de la vegetación boscosa no influyen en la cantidad de escorrentía producida dentro de la microcuenca del río Chorlaví.

**H. A.:** Las variaciones multitemporales de la vegetación boscosa influyen en la cantidad de escorrentía producida dentro de la microcuenca del río Chorlaví.

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1 Fundamentación legal**

##### **2.1.1 Constitución de la República del Ecuador 2008**

**Art. 12.-** El derecho humano al agua es fundamental e irrenunciable. El agua constituye patrimonio nacional estratégico de uso público, inalienable, imprescriptible, inembargable y esencial para la vida. (Asamblea Nacional del Ecuador, 2008, p.13).

##### **2.1.2 Ley orgánica de recursos hídricos, usos y aprovechamiento del agua**

La presente ley pertenece al registro oficial N° 305 en la constitución de la república.

**Artículo 6.- Prohibición de privatización.** Se prohíbe toda forma de privatización del agua, por su trascendencia para la vida, la economía y el ambiente; por lo mismo esta no puede ser objeto de ningún acuerdo comercial, con gobierno, entidad multilateral o empresa privada nacional o extranjera. (Asamblea Nacional del Ecuador, 2014, p.4).

**Artículo 8.- Gestión integrada de los recursos hídricos.** La Autoridad Única del Agua es responsable de la gestión integrada e integral de los recursos hídricos con un enfoque ecosistémico y por cuenca o sistemas de cuencas hidrográficas, la misma que se coordinará con los diferentes niveles de gobierno según sus ámbitos de competencia. (Asamblea Nacional del Ecuador, 2014, p.5).

**Artículo 12.- Protección, recuperación y conservación de fuentes.** El Estado, los sistemas comunitarios, juntas de agua potable y juntas de riego, los consumidores y usuarios, son corresponsables en la protección, recuperación y conservación de las fuentes de agua y del manejo de páramos así como la participación en el uso y administración de las fuentes de aguas que se hallen en sus tierras, sin perjuicio de las competencias generales de la Autoridad Única del Agua. (Asamblea Nacional del Ecuador, 2014, p.6).

**Artículo 13.- Formas de conservación y de protección de fuentes de agua.** Constituyen formas de conservación y protección de fuentes de agua: las servidumbres de uso público, zonas de protección hídrica y las zonas de restricción. (Asamblea Nacional del Ecuador, 2014, p.6).

**Artículo 14.- Cambio de uso del suelo.** El Estado regulará las actividades que puedan afectar la cantidad y calidad del agua, el equilibrio de los ecosistemas en las áreas de protección hídrica que abastecen los sistemas de agua para consumo humano y riego; con base en estudios de impacto ambiental que aseguren la mínima afectación y la restauración de los mencionados ecosistemas. (Asamblea Nacional del Ecuador, 2014, p.6).

**Artículo 64.- Conservación del agua.** La naturaleza o Pacha Mama tiene derecho a la conservación de las aguas con sus propiedades como soporte esencial para todas las formas de vida. (Asamblea Nacional del Ecuador, 2014, p.16).

En la conservación del agua, la naturaleza tiene derecho a:

- a) La protección de sus fuentes, zonas de captación, regulación, recarga, afloramiento y cauces naturales de agua, en particular, nevados, glaciares, páramos, humedales y manglares;
  - b) El mantenimiento del caudal ecológico como garantía de preservación de los ecosistemas y la biodiversidad;
  - c) La preservación de la dinámica natural del ciclo integral del agua o ciclo hidrológico;
  - d) La protección de las cuencas hidrográficas y los ecosistemas de toda contaminación;
- y,
- e) La restauración y recuperación de los ecosistemas por efecto de los desequilibrios producidos por la contaminación de las aguas y la erosión de los suelos.

### **2.1.3 Línea de investigación**

El estudio se enmarca en la línea de investigación de la carrera: Desarrollo agropecuario y forestal sostenible.

## **2.2 Fundamentación Teórica**

### **2.2.1 Cuenca hidrográfica**

#### ***2.2.1.1 Definición***

Una cuenca hidrográfica es el área territorial definida por divisorias topográficas, donde sus ríos y afluentes desembocan a un punto en común; sea este un río principal, un lago, un pantano o directo al mar (López, 2014).

También se define como el área delimitada por un parteaguas en la parte alta de las montañas que está formada por aguas superficiales y subterráneas que vierten a una red natural o punto de salida de la cuenca, con un caudal continuo o intermitente (Bernal y Prado, 2015).

Dentro de la cuenca confluyen relaciones entre recursos naturales y pobladores de la cuenca. La diversidad de condiciones físicas, biológicas, económicas, sociales y culturales, hacen que cada cuenca tenga su dinámica y equilibrio distinto, al variar uno de los contextos el equilibrio se afecta (López y Patrón, 2013).

Por lo tanto una cuenca es un espacio donde confluyen el ser humano y los recursos naturales, en una constante interacción a través de tiempo y espacio. Lo que la transforma en una unidad de planificación de ordenamiento territorial, gestión y manejo de los recursos naturales como se puede apreciar en la Figura 1 (Mundial Visión, 2004).



Figura 1. Cuenca hidrográfica  
Fuente: Mundial Visión, 2004

### 2.2.1.2 Componentes de una cuenca hidrográfica

Varios son los componentes que conforman una cuenca hidrográfica, los mismos que pueden ser naturales o antrópicos. Los naturales corresponden a elementos como: agua, suelo, vegetación, clima; mientras que los antrópicos pueden ser socioeconómicos,

culturales, jurídicos o institucionales (Parra, 2009). Entre los componentes principales se tienen:

**Divisoria de agua:** es la línea imaginaria que separa las cuencas hidrográficas y hace que el agua de la precipitación fluya hacia un punto de desagüe; esta línea puede ser determinada topográficamente (superficial) o geológicamente (subsuperficial), pero debido a la facilidad de apreciación se lo realiza de manera superficial en la mayoría de los casos (Mundial Visión, 2004).

**Vertiente:** es el área de captación de aguas cuyos ríos desembocan en un mismo lugar; la misma que define el uso de las cuencas (Ceballos, Schnabel, Gómez, y Cerdá, 1998).

**Cauce:** es un conducto natural o artificial de un terreno por donde circula el agua de un río o canal (Ceballos *et al.*, 1998).

### ***2.2.1.3 Tipos de cuencas***

La clasificación de las cuencas hidrográficas es de gran importancia ya que permite llevar a cabo un adecuado manejo de los recursos naturales, la preservación de la calidad y cantidad de agua del caudal y la protección de fuentes de agua (Gaspari, Rodríguez, Senisterra, Delgado, y Besteiro, 2013).

Existen diversas maneras de clasificar una cuenca hidrográfica; de acuerdo a diversos criterios mencionados a continuación (Aguirre, 2007).

Según el destino de drenaje (Salazar, 2017):

- Exorreicas: sus afluentes desembocan en el mar de manera superficial o subterránea.
- Endorreicas: sus ríos desembocan en lagos o lagunas, no tienen salida al océano.
- Arreicas: sus aguas se evaporan antes de llegar a una red de drenaje.

Según el uso (Aguirre, 2007):

- Urbanas
- Agrícolas
- Forestales
- Uso múltiple

Según la altitud (Faustino, Jiménez, Velásquez, Alpízar, y Prins, 2006):

- Alta: se ubica en la parte donde se forma la divisoria de aguas, correspondiente a montañas.
- Media: se juntas las aguas de la parte alta, el cauce del río principal permanece definido.
- Baja: el agua de la parte alta llega y trae consigo sedimentos, el río es más caudaloso esto corresponde a zonas de llanuras o valles.

Según el clima (Aguirre, 2007):

- Cuencas de zona húmeda: son propensas a crecidas y procesos erosivos altos.
- Cuencas de zona seca: son propensas a tener un alto grado de evapotranspiración.

Según la permanencia (López, 2014):

- Permanentes: tienen escorrentía todo el año.
- Intermitentes: tienen escorrentía solo en meses de precipitación.
- Efímeras: tienen escorrentía por pocas horas después de una precipitación.

Según el área: el Centro Interamericano de Desarrollo Integral de Aguas y Suelos (CIDIAT) propone la siguiente clasificación (Faustino *et al.*, 2006):

Sistema hidrográfico: Área natural mayor a 300 000 ha formada por varios elementos que interactúan entre sí; donde el principal componente es la red hidrológica que conforman varias cuencas hidrográficas (Aguirre, 2007).

- Cuenca: Fuente natural que comprende 60 000 hasta 300 000 ha de superficie, donde el agua de la precipitación captada es desembocada en un lugar de almacenamiento mediante los afluentes que nacen del río principal (Faustino y Jiménez, 2000).
- Subcuenca: Área que comprende de 10 000 hasta 60 000 ha capta los escurrimientos superficiales y los conduce hacia el cauce principal de una cuenca o a una corriente secundaria. Esta puede ser tributaria o específica (Faustino y Jiménez, 2000).
- Microcuenca: Comprende una superficie menor a 1000 ha, tiene una red de drenaje de primer o segundo orden. Esta unidad topográfica es drenada por una misma corriente de agua y al unirse con varias microcuencas forman una subcuenca (Cuasapud, 2017).

En el Ecuador se adapta una diferente clasificación de cuencas hidrográficas de acuerdo a su superficie (Aguirre, 2007):

- Sistema hidrográfico (> 300 000 ha)
- Cuenca (100 000 - 300 000 ha)
- Subcuenca (15 000 - 100 000 ha)
- Microcuenca (4000 - 15 000 ha)
- Minicuenca o Quebrada (< 4000 ha)

#### ***2.2.1.4 Importancia de la cuenca***

Las cuencas están interrelacionadas con elementos naturales los mismos que se ven afectados por el hombre al desarrollar malas prácticas en la parte alta de la cuenca, es decir que las acciones realizadas en la parte alta influyen definitivamente en la parte baja (Franquet, 2005).

Así mismo las cuencas cumplen varias funciones importantes que le permite trascender límites cantonales o provinciales hasta algunas veces nacionales (López, 2014):

Función hidrológica: captación, almacenamiento y descarga de agua en diferentes momentos.

Función ecológica: proporciona hábitats para la flora y fauna, además de diferentes climas.

Función ambiental: captura de carbono, conserva de la biodiversidad, regula la recarga hídrica, mantiene los suelos y alberga bancos de germoplasma.

Función socioeconómica: brinda recursos naturales para desarrollar las actividades productivas del sustento humano, genera espacios para el desarrollo de la sociedad.

#### ***2.2.1.5 Sistema fluvial***

El sistema fluvial de una cuenca está conformado por canales principales, redes de drenaje y zonas de sedimentación que no siempre son estables debido a cambios antrópicos, climáticos y procesos erosivos, sedimentarios (Anaya, 2012).

Un sistema fluvial está dividido principalmente en tres zonas como se aprecia en la Figura 2 (Schumm, 1977):

- Zona de recepción: se produce la escorrentía y los sedimentos.
- Zona de contracción: se transfieren los sedimentos.
- Zona de depositación: se depositan los sedimentos y se producen los abanicos fluviales y las llanuras de inundación.

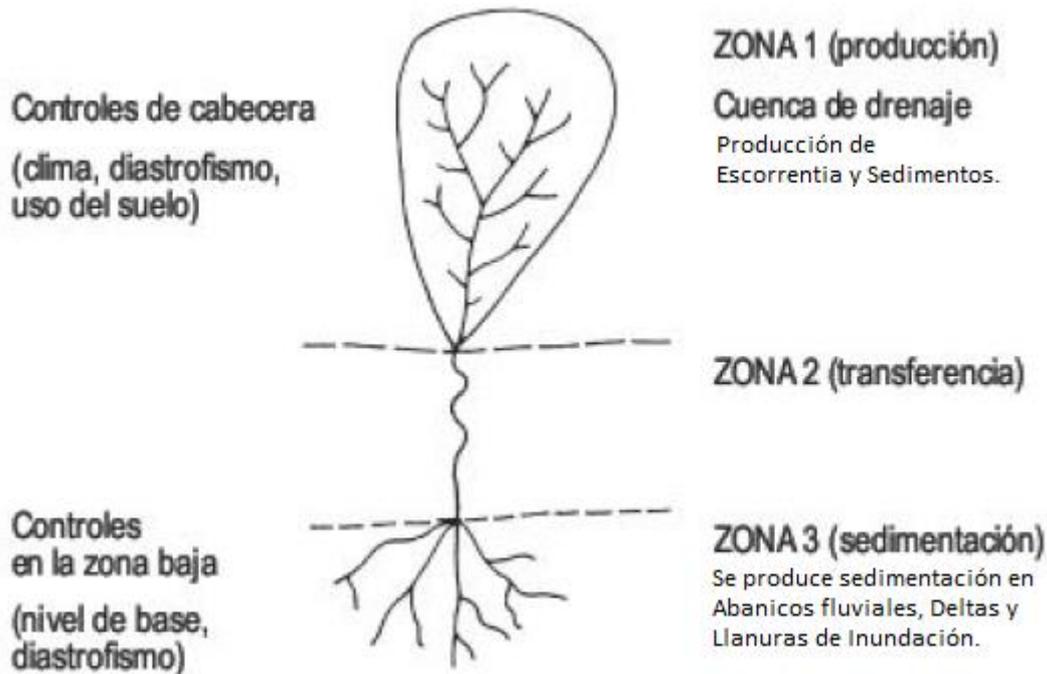


Figura 2. Zonas de un sistema fluvial  
Fuente: Schumm, 1977

### 2.2.1.6 Características morfométricas de la cuenca

Los parámetros morfométricos representan las características físicas de una cuenca hidrográfica; estos se obtienen por estimaciones que se realizan en estudios para determinar la información hidrométrica básica (Salas, Pinedo, Viramontes, Báez y Quintana, 2011).

Al estudiar variables lineales como superficie y relieve se obtiene un análisis morfométrico que permite realizar comparaciones entre cuencas e interpretar sus funciones hídricas para dar alternativas de manejo (Gaspari *et al.*, 2012).

#### 2.2.1.6.1 Parámetros de forma

- Área

Superficie de la cuenca medida en  $\text{km}^2$ , está definida por el perímetro, es considerado un parámetro importante ya que determina la clasificación de la cuenca, la misma que puede ser grande o pequeña (Cardona, 2013).

La cuenca pequeña normalmente tiene lluvias fuertes de poca duración, en ella se toman mucho en cuenta la vegetación y el suelo. Por otra parte en la cuenca grande se prioriza las características físicas como pendientes, elevación y cauce principal (Anaya, 2012).

- Perímetro

Es la longitud de la línea que delimita la cuenca hidrográfica, permite tener una percepción de la forma de la cuenca la misma que influye en los procesos de escurrimiento y precipitación. Si la forma es alargada el agua fluirá por un cauce principal, mientras que si es ovalada el agua fluirá por varios causes uno principal y otros secundarios. El perímetro se expresa en kilómetros (Cardona, 2013).

- Longitud axial

Distancia medida desde la desembocadura de la cuenca hasta el punto más lejano. Es decir es la mayor distancia medida en kilómetros que va desde la parte alta hasta el punto de salida de la cuenca (Fierro y Jiménez, 2011). Esta distancia se utiliza para índices morfométricos ya que influye en la escorrentía (Ibañez, Moreno y Gisbert, 2011a).

- Ancho promedio

Es la distancia perpendicular a la longitud axial medida de extremo izquierdo al derecho; es la relación entre el área y la longitud obtenida en kilómetros (Anaya, 2012).

- Factor de forma

Indicador que permite ver a la cuenca de una manera geométrica, con el fin de determinar la velocidad con la que transcurre el río principal (Fierro y Jiménez, 2011). Se debe conocer este parámetro para tener en cuenta las crecidas, ya que si una cuenca es redondeada tiene susceptibilidad a crecidas altas (Beltrán, 2010)

- Coeficiente de compacidad de Gravelius

Se define como la relación del perímetro de la cuenca con el perímetro circular del área, este define la forma de la cuenca a través de una comparación con una circunferencia (Ibañez *et al.*, 2011a).

El valor del parámetro va desde 1 hasta 1,75 e irá cambiando dependiendo a la forma, si el valor es cercano a 1 la cuenca es semejante a una circunferencia con un tiempo de

concentración menor lo que la hace propensa a crecidas fuertes (Gaspari, Senisterra, Delgado, Rodríguez y Besteiro, 2009).

#### 2.2.1.6.2 Parámetros de relieve

- Curva hipsométrica

Muestra el porcentaje de área de la cuenca sobre una cota determinada medida en  $\text{km}^2$ , representa la superficie drenada de acuerdo a la altura (Ordoñez, 2011). La curva hipsométrica permite apreciar las etapas de una cuenca y de acuerdo a ello determinar los procesos erosivos o sedimentarios a la que es susceptible (Aguirre, 2007). Las diferentes etapas de una cuenca se observan en la Figura 3:

Etapa de desequilibrio: cuenca joven con gran potencial erosivo.

Etapa de equilibrio: cuenca madura, los procesos erosivos y de sedimentación están en balance.

Etapa de erosión: cuenca en estado de vejez, sedimentada.

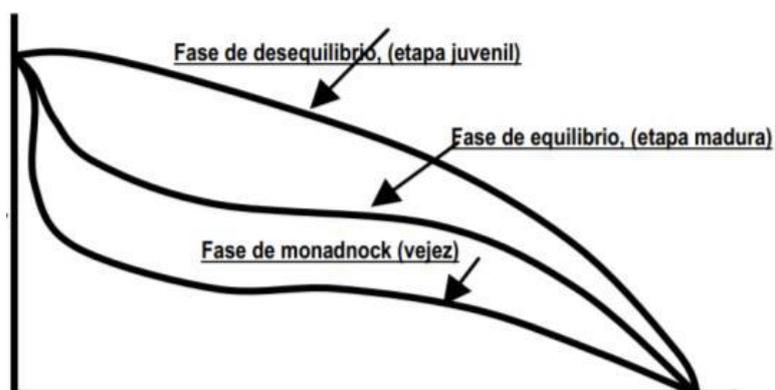


Figura 3. Etapas de una cuenca hidrográfica

Fuente: Ordoñez, 2011

- Altura media

Es la elevación promedio a nivel del punto de aforo de la cuenca; la variación de altitud da a conocer su distribución térmica y la aparición de microclimas que van de acuerdo a las condiciones climáticas del sitio donde se encuentra (Ibañez *et al.*, 2011a).

- Pendiente media de la cuenca

Es la relación existente entre extremos de la cuenca y la proyección horizontal de la longitud de la misma; la pendiente permite ver el tiempo de escurrimiento y concentración

de la escorrentía e indica el máximo proceso de crecidas y la degradación de la cuenca en terrenos sin cobertura vegetal (Anaya, 2012).

#### 2.2.1.6.3 Parámetros relativos a la red hidrográfica

- Número de orden de los cursos de agua

El orden de los ríos permite apreciar el grado de bifurcación de los mismos dentro de una cuenca (Cardona, 2013). Se considera corrientes de primer orden a las fuertes, con aguas de nacimientos y que no tienen afluentes. Las corrientes de segundo orden resultan de la unión de dos corrientes de orden uno y una corriente de orden superior, se obtiene cuando una corriente de orden menor se une con otra de orden mayor (Gaspari *et al.*, 2009).

- Densidad de drenaje

Es la relación entre la longitud total de las corrientes de la cuenca y el área total, éste índice refleja la complejidad y desarrollo del sistema de drenaje de la cuenca. A mayor densidad de escurrimientos existirá mayor estructuración de la red fluvial lo que provoca un mayor potencial de erosión (Ibañez *et al.*, 2011a).

- Pendiente media del cauce

Se calcula mediante el desnivel topográfico que se tiene sobre el cauce principal y su longitud (Beltrán, 2010). Cuando la pendiente aumenta, la velocidad del agua también aumenta, lo que hace a la cuenca susceptible a procesos erosivos y al arrastre de materiales (Yaguachi, 2013).

Así mismo si los valores son altos el sitio donde se ubica la cuenca tiene poca vegetación y suelos erosionables, mientras que si se obtienen valores bajos el sitio presenta abundante vegetación con suelos duros poco erosionables (Gaspari *et al.*, 2009).

- Tiempo de concentración

Es el tiempo que se demora en viajar una gota de lluvia desde la parte alta de la cuenca hasta el punto de salida el cual está relacionado con el volumen y el tiempo de recesión de la misma. Cuando se tiene tiempos de concentración largos la recesión es sostenida y en tiempos de concentración cortos la recesión es rápida. Se expresa en horas (Cardona, 2013).

### ***2.2.1.7 Características biofísicas de la cuenca***

Para la planificación y gestión de proyectos para el manejo de una cuenca hidrográfica es necesario conocer las características biofísicas; es decir las características naturales y sociales que se relacionan entre sí (Miranda y Pereira, 2002).

Los aspectos biofísicos que interactúan en una cuenca son: relieve, localización, geología, zonas de vida, suelos, hidrología, clima y vegetación (Cordón, Johnson, y Cordón, 2008).

### **2.2.2 Cobertura forestal**

Es la capa natural de vegetación existente en la superficie de la tierra que comprende a diferentes ecosistemas donde interactúan especies arbóreas, insectos, animales y plantas (Martínez Montoya, Calderón, y Camacho, 2003).

También se conoce como cobertura forestal a las áreas revestidas con especies arbóreas donde predominan las especies propias de la zona, formadas en estratos (Rosero, 2018). La cobertura forestal además de abarcar elementos de vegetación y bosque, puede incluir plantaciones forestales (Bermúdez, 2016).

#### ***2.2.2.1 Importancia de la cobertura forestal***

La cobertura forestal cumple importantes funciones que se relacionan directamente con las cuencas hidrográficas tales como: retención de precipitación en el dosel para luego almacenarla en los suelos y proveer de agua a los ríos en época seca aumento en la humedad por medio de la evapotranspiración de las hojas, mejoramiento de la calidad del suelo al prevenir la erosión y son un elemento necesario para el reciclaje de nutrientes (Salazar, 2017).

A continuación se mencionan otras funciones de los bosques que también son importantes para el ambiente y el ser humano (Asociación de Colaboración en materia de Bosques, 2012).

- Las raíces de los bosques evitan el arrastre de sedimentos por lo que protegen al suelo.
- Mantienen la biodiversidad al ser hogar y alimento de varias especies de animales silvestres.
- Contribuyen en la purificación del aire.
- En los bosques se encuentra gran cantidad de productos forestales maderables y no maderables.

- Producen gran cantidad de materia orgánica lo que contribuye con la fertilidad de los suelos.
- Regula la escorrentía superficial con la retención de agua en el suelo.
- Brindan un ambiente paisajístico hermoso.

### **2.2.3 Relación del bosque con los procesos hidrológicos**

Los bosques especialmente los tropicales cumplen una función muy importante en el ciclo hidrológico a pesar de ocupar un pequeño porcentaje de la superficie de la tierra, son un ecosistema que pueden captar el 50% de precipitación y proporcionar diversos servicios ambientales e hidrológicos tales como (Manson, 2004):

- Regular la cantidad y calidad de agua para consumo humano.
- Disminuir las inundaciones y las sequías.
- Proteger y mantener los suelos de manera que se evitan deslaves en los ríos.
- Regular el clima a través de la modificación de los patrones de precipitación.

La captación de agua por parte de bosques no intervenidos es mayor que la de los bosques perturbados. La deforestación aumenta el cauce de los ríos, esto a su vez produce que se desborden y pierdan el recurso hídrico que debería almacenarse en los acuíferos (Lawton, Nair, Pielke y Welch, 2001).

La disminución de la cobertura boscosa en las zonas altas de las cuencas hidrográficas produce una captación de agua menor y un aumento de retención en los mantos acuíferos lo que provoca en muchos casos inundaciones o sequías (Maas, 2003).

El ciclo hidrológico puede interrumpirse cuando se altera la cobertura boscosa, esto sucede debido a un proceso de retroalimentación positiva que produce cambios permanentes en la zona afectada. Estos cambios pueden estar relacionados con la temperatura y esta puede aumentar por falta de nubes que a su vez reducen la cantidad de precipitación (Manson, 2004).

### **2.2.4 Sistemas de Información Geográfica**

Los sistemas de información geográfica son herramientas con un alto grado de aplicación a través de la obtención de información verídica y real de la situación local como: coordenadas gráficas, catástrofes, localización de terrenos, entre otros (Rosero, 2018). Los

SIG pueden interpretar información a base de coordenadas que permiten ubicar los datos en el espacio. Un ejemplo puede ser la verificación de información a través de imágenes satelitales para luego crear mapas de uso de suelo, cobertura vegetal, delimitación de áreas, etc (Bermúdez, 2016).

#### ***2.2.4.1 ArcGIS***

Es un software que permite la visualización, manipulación y gestión de información geográfica mediante el análisis de parámetros de una base de datos, el software es fácil de manipular y cuenta con varias herramientas (Cure, 2012).

Mediante el uso del programa se pueden crear mapas donde se visualiza las características de un lugar en diferentes formatos acorde a las necesidades del lugar (Puerta, Rengifo y Bravo, 2011).

#### **2.2.5 Teledetección**

Es una técnica que consiste en la obtención de información de un objeto, superficie o fenómeno específico mediante el análisis de datos obtenidos por un sensor sin tener contacto físico con él. Cada objeto posee una firma espectral única que lo diferencia de otros objetos (Araya, 2009).

##### ***2.2.5.1 Imágenes satelitales***

Las imágenes satelitales se obtienen a través de la captación de energía emitida por los objetos, estas imágenes están formadas por pixeles que se guardan de forma digital. De manera que, cada pixel posee un valor numérico que proporciona la respuesta del objeto lo que permite la diferenciación en una imagen de acuerdo a sus características (Bermúdez, 2016).

##### ***2.2.5.2 Aplicación de la teledetección en cambios de uso de suelo***

Varios estudios de cambios de uso de suelo se realizan gracias a la aplicación de la teledetección. Por medio de sensores de resolución espectral media, alta y los sensores de radar, las imágenes satelitales se procesan para observar los efectos de los cambios tales como erosión, contaminación, disminución de materia orgánica y pérdida de calidad del suelo (Pérez y Rodríguez, 2013).

### ***2.2.5.3 Análisis multitemporal***

Es un análisis espacial que se realiza a través de una comparación de imágenes satelitales de un mismo lugar en diferentes periodos de tiempo para diagnosticar la cobertura y evaluar los cambios consecuentes a lo largo de un periodo de tiempo (Bermúdez, 2016).

#### ***2.2.5.3.1 Clasificación no supervisada***

Es una clasificación de imágenes por medio de clases que no están establecidas. Para clasificar es necesario establecer un número de clases con la utilización de algoritmos matemáticos, en este método no es necesario un conocimiento previo del sitio. Este método agrupa los algoritmos de comportamiento homogéneo definiendo las clases espectrales y obteniendo los datos de forma rápida (Arango, Branch, y Fernández, 2005).

#### ***2.2.5.3.2 Clasificación supervisada***

En la clasificación supervisada la disponibilidad de clases es importante ya que a través de ellas se genera una signatura espectral con características similares homogéneas del mismo día en que se genera la información.

La clasificación supervisada brinda mejor resultados en comparación con la no supervisada ya que en esta se debe supervisar los datos en base a muestras de campo. Es por ello que esta clasificación necesita identificar físicamente los píxeles con lo que trabajará para la generación de clases, luego evaluará las firmas de las muestras para evitar que no se mezclen entre sí y finalmente realizará las pruebas estadísticas para evaluar la clasificación (Speranza y Zerda, 2005).

### ***2.2.5.4 Validación de la clasificación de imágenes satelitales***

Validar la clasificación es indispensable para conocer si los resultados obtenidos concuerdan con la realidad del sitio de estudio. La validación puede ser realizada por medio de muestras de campo o a través de imágenes satelitales de alta resolución que sirven para comparar los resultados. Los puntos de referencia para la comparación pueden ser colocados de forma aleatoria simple o sistematizada, el tamaño de la muestra dependerá de la clase que se desea evaluar y mientras más grande sea será más precisa (Alzate y Sánchez, 2018).

#### 2.2.5.4.1 Matriz de confusión

Es un método para evaluar la clasificación mediante una comparación entre las clases creadas por el clasificador y las clases ubicadas correctamente. Los datos que concuerdan entre las dos clases analizadas se colocan en una diagonal y los datos marginales son los que no concuerdan entre sí que se ubican fuera de la diagonal (Guzmán, 2015).

Las medidas de precisión de la matriz son:

- Exactitud del usuario: datos clasificados correctamente es igual al número de coincidencias sobre el total.
- Error de comisión: datos que muestran la probabilidad de que el usuario encuentre información errónea, es igual a uno menos la exactitud del usuario.
- Exactitud del productor: datos que indican el porcentaje de la clase correctamente clasificada, es igual al número de coincidencias sobre el total.
- Error de omisión: datos que indican el porcentaje de los atributos del terreno incorrectamente clasificados, es igual a uno menos la exactitud del productor.

#### 2.2.5.4.2 Coeficiente de Kappa

Coeficiente estadístico que mide la similitud o concordancia entre dos clasificaciones de imágenes, la una creada mediante un programa y la otra mediante la visualización o muestras de campo (Alzate y Sánchez, 2018).

### 2.2.6 Balance hídrico

El agua tiene un proceso natural que cumple varias etapas, primero ocurre la evaporación del agua del mar hacia la atmosfera, luego esta se condensa se forman las nubes, se produce la lluvia y al caer el agua se infiltra o escurre en el suelo lo que provoca que el agua vuelva al mar y así se complete el ciclo (Valencia y Zarate, 2013).

Por tal motivo el ciclo hidrológico consiste en el movimiento del agua dentro de un ecosistema, compuesto por varios procesos como la precipitación, la evapotranspiración, la infiltración y la escorrentía (Sánchez, 2017). El ciclo hidrológico del agua se puede observar en la Figura 4.

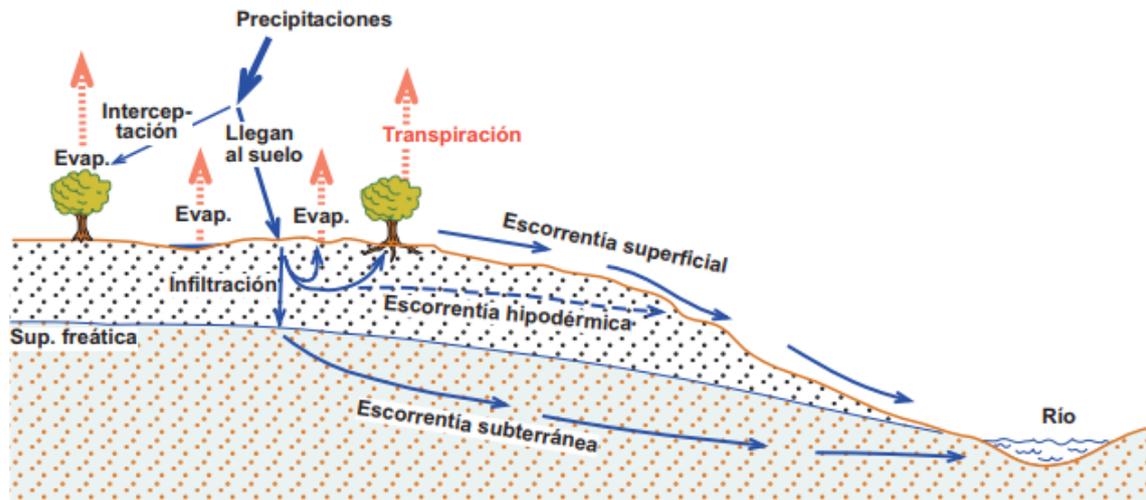


Figura 4. Ciclo hidrológico del agua

Fuente: Sánchez, 2017

### 2.2.6.1 Precipitación

La precipitación es el agua que recibe la superficie terrestre en forma líquida, sólida y vapor. Las nubes están formadas por gotitas de agua que miden 0,02 mm de diámetro (Sánchez, 2017).

La precipitación puede ser de tres tipos: frontal, convectiva y orográfica. Frontal cuando el aire caliente se eleva por encima del aire frío, convectiva cuando el aire caliente se eleva al encontrarse con una masa de aire fría y orográfica cuando el aire húmedo asciende a causa de barreras de montañas (Jácome, 2017).

### 2.2.6.2 Evapotranspiración

Es el proceso por el cual el agua en sus estados líquido y sólido llega hasta la superficie de la tierra para convertirse en vapor atmosférico, esta depende fundamentalmente de las condiciones climáticas y para que se produzca es necesario que exista la evaporación de los ríos y la transpiración de agua lluvia interceptada por las hojas de la cobertura forestal (Belmonte y Romero, 2006).

### 2.2.6.3 Infiltración

Es la cantidad de agua lluvia que ingresa en el suelo, depende de la disponibilidad de materia orgánica, vegetación y estructura del suelo, ya que si un suelo es poroso absorberá mayor cantidad de agua. En el caso de la vegetación esta sirve como un colchón que amortigua el choque de la lluvia contra el suelo, lo que previene que el suelo se descompacte.

Por otro lado para que el suelo tenga mayor capacidad de absorción debe permanecer en estado seco (Pérez, 2007).

#### **2.2.6.4 Escorrentía**

Existen tres clases de escorrentías: superficial, subsuperficial y subterránea, las mismas se generan como consecuencia de fuertes lluvias de larga duración (Aguirre, 2007).

La escorrentía superficial es la capa de agua que fluye sobre el suelo, si existe una mayor cobertura vegetal la escorrentía será menor y reducirá los procesos erosivos. La escorrentía subsuperficial es la que se produce entre la capa superficial del suelo y la freática y la escorrentía subterránea es la que se refiere al movimiento de las aguas en el centro de la tierra (Proaño, Gavilanes, Valenzuela, y Cisneros, 2006).

#### **2.2.7 Modelamiento Hidrológico con HEC-HMS**

HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System) es un software creado para el modelamiento de procesos de escurrimiento-lluvia para determinar la respuesta hídrica de una cuenca, este programa fue diseñado por el Centro de Ingeniería Hidrológica de Estados Unidos (Estrada y Pacheco, 2012).

HEC-HMS utiliza complementos básicos como: modelos de cuencas, modelos meteorológicos, especificaciones de control y datos de entrada (Bastidas, 2005).

- Modelos de la cuenca: se divide a la cuenca en varias subcuencas de forma manual, se especifica las características del modelo, el método que se quiere emplear, el número de curva y el tiempo (Triviño y Ortiz, 2004).
- Modelos meteorológicos: de acuerdo a cada subcuenca se calcula la precipitación; y se la puede modelar de acuerdo a lo que se requiera como: lluvia sólida, líquida o evapotranspiración (Estrada y Pacheco, 2012).
- Especificaciones de control: se introduce en el programa el periodo de tiempo en el que se requiere la simulación, la fecha y hora de inicio y finalización de la precipitación (Triviño y Ortiz, 2004).
- Datos de entrada: son necesarios para la modelación y se determinan de acuerdo al método de cálculo; estos pueden ser: precipitación histórica, información morfométrica de las subcuencas, datos hidrológicos de transformación de la lluvia, características hídricas de los tramos de agua y capacidad de embalse (Sánchez, 2008).

La base del modelo es la simulación del hidrograma de escorrentía que se produce en una red fluvial como consecuencia de una precipitación. El funcionamiento de los componentes del programa está basado en relaciones matemáticas que intentan representar los procesos de generación del hidrograma de escorrentía para lo cual utiliza 4 módulos: pérdidas, transformación, flujo base y tránsito de flujo, estos métodos se muestran en la Figura 5 (Arias, 2015).

<b>Pérdidas</b>	<b>Transformación lluvia neta en escurrimiento</b>	<b>Flujo base</b>	<b>Tránsito avenida por el cauce</b>
Déficit y tasa constante(DC) Inicial y tasa constante Exponencial Número de curva CN SCS Green y Ampt Consideración de la humedad del suelo (SMA) DC por celdas CN SCS por celdas SMA por celdas	Onda cinemática ModClark HU SCS HU Snyder HU especificado por el usuario Hidrograma en S del usuario Hidrograma Unitario (HU) de Clark	Recesión restringida Recesión Constante mensual Depósito lineal	Modelo Lag. Puls modificado. Muskingum Muskingum-Cunge Straddle Stagger. Onda Cinemática

Figura 5. Métodos hidrológicos utilizados en el HEC-HMS

Fuente: Arias, 2015

### **2.2.7.1 Método de pérdidas: SCS Number Curve**

El programa transforma una parte de la precipitación total en escorrentía directa y otra parte en pérdidas. Las pérdidas se calculan mediante diferentes métodos, pero el más utilizado es el de número de curva CN (SCS) por tener información de uso y tipo de suelo; este método fue desarrollado por SCS del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (López *et al.*, 2012).

Este método utiliza parámetros como la abstracción inicial, la impermeabilidad del suelo y el número de curva, el mismo que varía de 0-100 de acuerdo a los factores que influyen en la generación de escorrentía. El método interpreta el proceso hidrológico que se da a cabo durante un periodo de lluvias sin tomar en cuenta la pendiente; por lo que lo hace práctico fácil de aplicar y útil para todo tipo de cuencas (Arias, 2015).

### 2.2.7.2 Método de pérdidas: Soil Moisture Accounting

Este método es una herramienta principal del programa, el cual realiza un modelo continuo mediante 5 niveles de retención y almacenaje de agua, estos niveles se observan en la siguiente Figura 6.

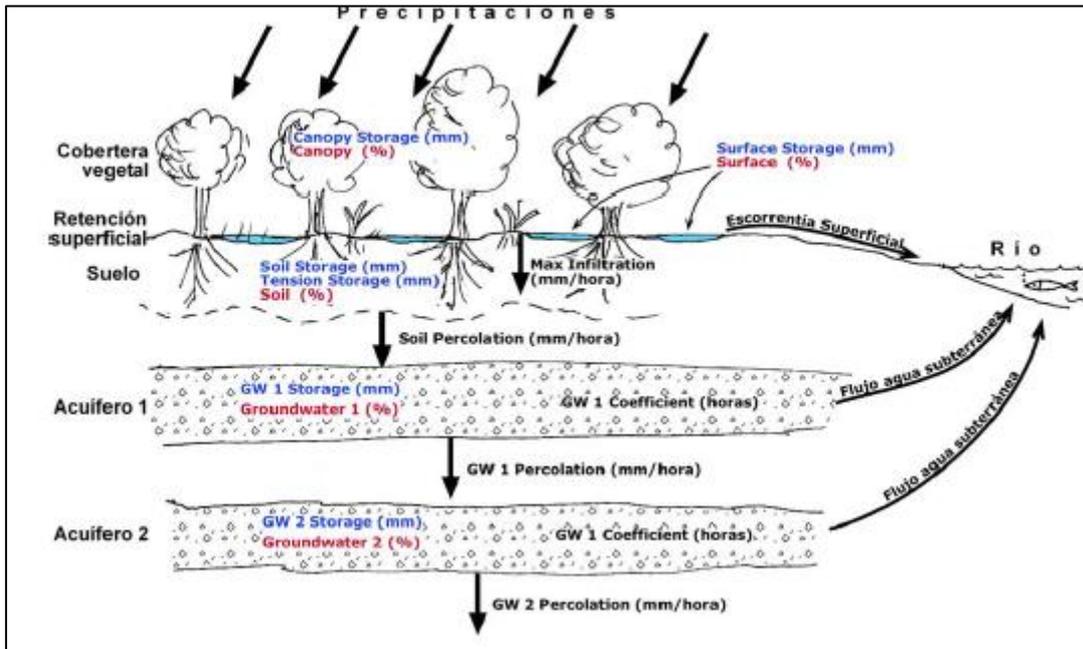


Figura 6. Niveles de especificación del método SMA

Fuente: Sánchez, 2008

Como se observa en la figura el modelo considera tres capas de suelo (capa de suelo, capa de agua subterránea 1 y capa de agua subterránea 2), las mismas que permiten representar el movimiento del agua entre ellas. Este método se considera una de los más complejos por la cantidad de parámetros que maneja (Sánchez, 2008):

- Soil, Groundwater 1 y Groundwater 2: condiciones iniciales de las capas de suelo, porcentaje de almacenamiento de agua.
- Max infiltration: límite de infiltración de la capa superficial del suelo.
- Impermeable: porcentaje de las zonas impermeables.
- Soil Storage: disponibilidad de almacenamiento de agua.
- Tension Storage: cantidad de agua almacenada y que no se drena
- Soil percolation: límite de percolación.
- GW 1 y GW 2 Storage: almacenamiento total en las capas superior e inferior de agua subterránea.

- GW 1 y GW 2 Percolation: percolación de la capa superior hasta inferior, y percolación de capa profunda hacia afuera.
- GW 1 y GW 2 Coefficient: condiciones de tiempo para transformar el agua en almacenamiento.

### ***2.2.7.3 Método de flujo de base: Recession***

Este método fue diseñado para dar una aproximación del comportamiento del caudal, se deben ingresar el flujo inicial para tener una simulación para lo cual se utilizan los siguientes parámetros (Sánchez, 2008):

- Descarga inicial: caudal inicial al empezar el periodo de cálculo.
- Constante de recesión: disminución del caudal base cada día.
- Radio: Caudal pico en porcentaje.

## **2.2.8 Crecidas de inundación**

### ***2.2.8.1 Crecida***

Es el aumento del nivel de agua de ríos o quebradas después de que ocurrió una fuerte precipitación, este hecho conlleva a un aumento del caudal que rebasa la capacidad de contención del cauce (Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales [MARN], 2011).

Para determinar una crecida se debe conocer los parámetros del río tales como: caudal máximo, volumen total escurrido y la duración de la crecida. Estos parámetros indicarán la magnitud de la crecida y los daños severos que puede ocasionar con una posible inundación (Lopardo y Seoane, 2000).

De igual manera para tener una mejor perspectiva de la crecida es importante saber los elementos que componen los ríos: cauce, lecho de avenida y llanura de inundación, estos elementos se pueden observar en la Figura 7 (Iturralde, 2013):



Figura 7. Elementos de un río

Fuente: Iturralde, 2013

### 2.2.8.2 Inundación

La inundación se produce a causa de una crecida que provoca el desbordamiento de agua en una zona terrestre que normalmente no está cubierta por ella. Cabe mencionar que no todas las crecidas provocan inundaciones ya que, la elevación del nivel del mar, la dificultad de drenaje y el represamiento de agua también son causantes de una inundación (Iturralde, 2013).

Existen varios tipos de inundaciones entre ellas se tienen: aluviales, torrenciales y encharcamientos (MARN, 2011).

- Aluviales: cuando la lluvia es constante y se produce un aumento de caudal lo cual supera la capacidad máxima de almacenamiento de agua en el cauce y la llanura de inundación.
- Torrenciales: cuando existen lluvias torrenciales en los ríos de montaña el agua baja fuertemente e inunda todo lo que este a su paso.
- Encharcamiento: cuando se presencia el agua en forma de charcos en avenidas o calles, es de poca duración.

### 2.2.8.3 Causas de crecidas e inundaciones

Las crecidas e inundaciones se producen de manera natural pero existen ciertas actividades que las agravan como (Ojeda, 2007):

- Deforestación en áreas cercanas a las llanuras de inundación.
- Construcción de infraestructura urbana que sustituyen las áreas cubiertas por vegetación natural.
- Deterioro de las cuencas hidrográficas debido a la contaminación y acumulación de escombros.
- Redes de drenaje o alcantarillados en mal estado y sin mantenimiento.

#### ***2.2.8.4 Consecuencias de crecidas e inundaciones***

Las crecidas ocasionan casi un tercio de desastres alrededor del mundo ya que, después de una catástrofe las pérdidas económicas y de vidas humanas son altas. Estos daños en los últimos años son más severos e intensos debido al poco interés y cuidado de las zonas propensas a inundaciones y las actividades antrópicas que se realizan cerca de ríos y arroyos (Lopardo y Seoane, 2000).

Las principales consecuencias son:

- Arrastre de sedimentos que dificulta la circulación del agua y provoca erosión del suelo.
- Variación en la geometría de cauces y apertura de riachuelos.
- Muerte de muchos animales y plantas.
- Daños en viviendas, vías, puentes, redes de agua potable, industrias, etc.
- Paralización de actividades humanas como cortes de energía y comunicación, pérdidas económicas por reparaciones, limpieza de las ciudades afectadas, ayuda a heridos, enfermedades, etc.
- Pérdida de vidas humanas.

Por otro lado cabe mencionar que las consecuencias también pueden ser positivas ya que una crecida renueva los hábitats naturales y el sistema fluvial. Además dan un equilibrio a ecosistemas alterados y permiten la supervivencia de algunas especies. Para los seres humanos existen beneficios como: el incremento en la fertilidad del suelo, renovación de acuíferos y limpieza de caudales (Ojeda, 2007).

### **2.2.9 Modelamiento con HEC-RAS**

El software HEC-RAS (Hydrological Engineering Center – River Analysis System) es un modelo desarrollado para estudios hidráulicos con flujo uniforme, debido a su fácil acceso, manejo y rapidez, es uno de los más utilizados para la creación de escenarios hidrológicos unidimensionales. El programa realiza 4 tipos de análisis (Mora y Ochoa, 2016):

- Modelización de flujo en régimen permanente
- Modelización de flujo en régimen no permanente
- Modelización del transporte de sedimentos
- Análisis de calidad de agua

Permite realizar simulaciones en flujos naturales o artificiales para conocer el nivel de agua ya que su objetivo principal es determinar zonas inundables; además es recomendado para cuencas de pendiente alta con tendencia a crecidas. El modelo utiliza tres pasos fundamentales (Torres y Gonzáles, 2009):

- Herramientas SIG como ArcGIS, con la extensión HECGeoRAS, para obtener el modelo digital de elevación de la cuenca que contenga la información geométrica del cauce.
- Modeliza el flujo con las características del cauce y la geometría con HEC-RAS.
- Genera los resultados que son exportados a ArcGIS para visualizar la inundación.

### **2.2.10 Pruebas estadísticas**

Las pruebas estadísticas se utilizan para conocer la significancia entre dos variables, estas pueden ser paramétricas y no paramétricas, para conocer a cuál corresponde cada variable se debe cumplir determinados supuestos (Rodríguez, Gutiérrez, y Pozo, 2007).

Las pruebas paramétricas deben cumplir ciertas condiciones como normalidad, homocedasticidad e independencia, por el contrario, las pruebas no paramétricas no deben cumplir estas condiciones (Flores, Miranda y Villasís, 2017).

La normalidad es el ajuste normal de los datos, de manera que estos mismos sean independientes entre sí; la homocedasticidad es la igualdad que tienen las medias de las distribuciones, es decir son homogéneas (Rodríguez *et al.*, 2007).

Si los datos demuestran ser paramétricos se pueden utilizar distintos tipos de pruebas de acuerdo a la cantidad de variables que se desea comparar, como por ejemplo si se desea comparar dos variables cuantitativas se puede utilizar la prueba de t student, la cual sirve para muestras relacionadas o independientes (Flores *et al.*, 2017).

## **CAPÍTULO III**

### **MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **3.1 Características del sitio**

##### **3.1.1 Ubicación Política**

El estudio se llevó a cabo en la microcuenca del río Chorlaví la misma que abarca las parroquias Natabuela, Imbaya, San Antonio y San Miguel de Ibarra, ubicadas en los cantones Antonio Ante e Ibarra respectivamente. La parroquia San Antonio conforma el 47.06% de la superficie total de la microcuenca (Espinosa, 2017).

##### **3.1.2 Datos climáticos**

La microcuenca del río Chorlaví posee una temperatura que va desde los 12°C hasta los 25°C (Espinosa, 2017).

#### **3.2 Materiales, equipos y softwares**

##### **3.2.1 Materiales**

- Libreta de campo
- Registros hidrológicos del INAMHI
- Imágenes satelitales

##### **3.2.2 Equipos**

- Cámara fotográfica
- Computadora

##### **3.2.3 Softwares**

- ArcGIS 10.3
- NUMCUR
- HEC-HMS
- HEC-RAS
- Microsoft Excel
- Infostat Versión 2017

### 3.3 Metodología

#### 3.3.1 Recolección de información

La recolección de información se realizó a través de la búsqueda, recopilación y análisis de bibliografía encontrada con respecto al estudio.

#### 3.3.2 Delimitación del área de estudio

La delimitación de la microcuenca se realizó mediante el software ArcGIS 10.3®, donde se tomó como base la información topográfica a escala 1:50000 obtenida del Instituto Geográfico Militar, con Datum WGS 1984 UTM Zona 17S, encontrado en el Sistema Nacional de Información del Ecuador (SNI, 2014).

#### 3.3.3 Determinación de la respuesta hidrológica de la microcuenca del río Chorlaví

##### 3.3.3.1 Caracterización morfométrica

###### 3.3.3.1.1 Parámetros de forma

Para calcular los parámetros de forma de la microcuenca del río Chorlaví se utilizó el software ArcGIS 10.3 a través del empleo de un archivo preliminar, el *shapefile* del límite de la microcuenca (Ramírez, 2015).

Área: este parámetro se calculó con la herramienta *Calculate Geometry* del software ArcGIS 10.3. Después de obtener los resultados se procedió a clasificar el tamaño de la microcuenca de acuerdo a la Tabla 1.

**Tabla 1**

*Ponderaciones para el área de la microcuenca*

Tamaño de la cuenca (ha <sup>2</sup> )	Descripción
> 300 000	Sistema hidrográfico
100 000 – 300 000	Cuenca
15 000 – 100 000	Subcuenca
4000 – 15 000	Microcuenca
< 4000	Minicuenca

**Fuente:** Aguirre, 2007

Perímetro: este parámetro se calculó con la herramienta *Calculate Geometry* de ArcGIS 10.3 de la misma manera que el área (Salazar, 2017).

Longitud axial: se midió a través de la herramienta *Measure* de ArcGIS 10.3 (Ibañez *et al.*, 2011a).

Ancho promedio: se calculó por medio de la ecuación 1 (Ec. 1) (Anaya, 2012):

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

Ec. 1

Donde:

W = Ancho promedio en km.

A = Área de la microcuenca en km<sup>2</sup>.

L = Longitud axial de la microcuenca en km.

Factor de forma: se calculó mediante la ecuación 2 (Ec. 2) (Ibañez *et al.*, 2011a).

$$IF = \frac{Ap}{L}$$

Ec. 2

Donde:

IF = Factor de forma.

Ap = Ancho promedio de la microcuenca en km.

L = Longitud axial de la microcuenca en km.

Luego se comparó la susceptibilidad a crecidas mediante la Tabla 2:

**Tabla 2**

*Ponderaciones para el factor de forma*

Rango	Susceptibilidad a crecidas
0,00 - 0,25	Baja
0,26 - 0,50	Media
0,51 - 0,75	Alta
>0,75	Muy alta

Fuente: Gaspari *et al.*, 2009

Coeficiente de Gravelius: también conocido como coeficiente de compacidad; se calculó aplicando la ecuación 3 (Ec. 3) (Ibañez *et al.*, 2011a):

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

Ec. 3

Donde:

Cg = Coeficiente de Gravelius.

P = Perímetro de la microcuenca en km.

A = Área de la microcuenca en km<sup>2</sup>.

Así mismo se definió la forma de la microcuenca a través de los criterios de la Tabla 3:

**Tabla 3**

*Ponderaciones para el Coeficiente de Gravelius*

Rango	Forma de la cuenca
1,00 - 1,24	Redonda
1,25 - 1,49	Oval redonda
1,50 - 1,74	Oblonga
>1,75	Rectangular oblonga

**Fuente:** Ibañez *et al.*, 2011a

### 3.3.3.1.2. Parámetros de relieve

Los parámetros de relieve se obtuvieron a través de la información topográfica de la microcuenca, con la que se realizó un análisis previo para utilizar el Modelo de Elevación Digital encontrado en el software ArcGIS 10.3.

Curva hipsométrica: representa el relieve de la microcuenca, este parámetro se calculó para tener una caracterización de la pendiente.

Para su cálculo se determinó las diferentes áreas de los polígonos formados por las cotas principales y el límite de la microcuenca, luego se formó la curva mediante el software Microsoft Excel (Ramírez, 2015).

Luego de formar la curva se las clasificó para conocer la etapa en la que se encuentra la cuenca y determinar sus características.

Altura media: este parámetro se calculó mediante la ecuación 4 (Ec. 4) (Cardona, 2013):

$$H = \frac{V}{A}$$

Ec. 4

Donde:

H = Altura media en m.

V = Volumen de la microcuenca en m<sup>3</sup>.

A = Área de la microcuenca en m<sup>2</sup>.

Pendiente media: este parámetro se calculó con la ecuación 5 (Ec. 5) (Cardona, 2013):

$$J = 100 * \left( \frac{\sum Li * E}{A} \right)$$

Ec. 5

Donde:

J = Pendiente media de la microcuenca en %.

$\sum Li$  = Suma de las longitudes de las curvas de nivel en km.

E = Equidistancia entre curvas de desnivel en km.

A = Área de la microcuenca en km<sup>2</sup>.

Después del cálculo se procedió a clasificar a la microcuenca de acuerdo al relieve expuesto en la Tabla 4:

**Tabla 4**

*Ponderaciones del tipo de relieve*

Pendientes medias (%)	Tipo de Relieve
0,0 - 0,5	Muy plano
0,5 - 1,0	Plano
1,0 - 3,0	Suave
3,0 - 12,0	Lomadas
12,0 - 20,0	Accidentado
20,0 - 35,0	Fuerte
35,0 - 50,0	Muy fuerte
50,0 - 75,0	Escarpado
>75,0	Muy escarpado

**Fuente:** Gaspari *et al.*, 2009

### 3.3.3.1.3 Parámetros con respecto a la red hidrográfica

Para calcular los parámetros se obtuvo la información base de la red hidrológica de la microcuenca (Ramírez, 2015).

Orden de drenaje: se determinó los órdenes de la microcuenca con los siguientes criterios: ríos de primer orden los que no tienen tributarios, ríos de segundo orden los que resultan de la unión de dos ríos del mismo orden y dos de diferente orden; ríos de tercer, cuarto y quinto orden de la misma manera anterior (Gaspari *et al.*, 2009).

Densidad de drenaje: este parámetro se obtuvo aplicando la ecuación 6 (Ec. 6) (Ibañez *et al.*, 2011a):

$$Dd = \frac{Ln}{A}$$

Ec. 6

Donde:

Dd = Densidad de drenaje en km.

Ln = Sumatoria de la longitud de los cursos de agua en km.

A = Área de la microcuenca en km<sup>2</sup>.

Después de su cálculo se interpretó la densidad de drenaje de acuerdo a la Tabla 5:

**Tabla 5**

*Ponderaciones de la densidad de drenaje*

Densidad de drenaje (km/km <sup>2</sup> )	Categoría
<1	Bajo
1 - 2	Moderado
2 - 3	Alto
>3	Muy alto

**Fuente:** Peña, 2015

Pendiente media del cauce: se calculó por medio de la ecuación 7 (Ec. 7) (Gaspari *et al.*, 2009).

$$J = \left( \frac{H_{max} - H_{min}}{L} \right) * 100$$

Ec. 7

Donde:

J = Pendiente media del cauce en %.

Hmax = Altura máxima sobre el curso de agua en m.

Hmin = Altura mínima sobre el curso de agua en m.

L = Longitud del río más largo en m.

Tiempo de concentración: Se calculó mediante la ecuación 8 (Ec. 8) (Ibañez *et al.*, 2011a):

$$Tc = 0,3 * \left( \frac{L}{J^{1/4}} \right)^{0,76}$$

Ec. 8

Donde:

Tc = Tiempo de concentración en horas.

L = Longitud del cauce principal en km.

J = Pendiente media del cauce en porcentaje.

### 3.3.3.2 Caracterización biofísica

#### 3.3.3.2.1 Precipitación

Para determinar la precipitación de la microcuenca se requirió obtener datos de las estaciones pluviométricas de los registros históricos obtenidos del INAMHI. Los mismos que se pueden apreciar en la Tabla 6.

**Tabla 6**

*Estaciones de precipitación cercanas a la microcuenca*

CÓDIGO	ESTACION	ALTURA (m.s.n.m)	X	Y	P ANUAL
M001	INGUINCHO	3140	789114	10028800	1341
M021	ATUNTAQUI	2200	809307	10036241	686
M053	IBARRA AEROPUERTO	2214	822594	10036524	624
M301	FF CC CARCHI	1280	818527	10066957	518
M310	MARIANO ACOSTA	2980	835780	10033023	1292
M312	PABLO ARENAS	2340	812250	10055211	754
M314	AMBUQUI	1880	832866	10046796	474
M317	COTACACHI - HDA.ESTH	2410	804796	10034540	1416
M321	TOPO- IMBABURA(ANGLA)	2860	815231	10023026	920
M328	HDA.LA MARIA-ANEXAS	2600	806118	10040575	1077
M316	ZULETA	2910	824454	10022352	1465
M319	SAN RAFAEL DEL LAGO	2790	806999	10021765	905

X: Longitud en el sistema de coordenadas WGS1984 Zona 17S; Y: Latitud en el sistema de coordenadas WGS1984 Zona 17S; P: Precipitación.

**Fuente:** INAMHI, 2018.

Existen varios métodos para determinar la precipitación media, para este caso se utilizó el método por isoyetas el cual consistió en elaborar un mapa mediante rangos de intensidad de precipitación con la ayuda del software ArcGIS 10.3 (Aguirre, 2007).

Para determinar la precipitación media se utilizó la ecuación 9 (Ec. 9) (Ramírez, 2015):

$$Pm = \frac{\Sigma(Pp * A)}{\Sigma A}$$

Ec. 9

Donde:

Pm = Precipitación media en mm.

Pp = Precipitación promedio [(Pmax+Pmin)/2].

A = Área entre dos isoyetas consecutivas.

ΣA = Sumatoria del área en ha.

### 3.3.3.2.2 Temperatura

Para determinar la temperatura de la microcuenca se realizó un mapa de isotermas, mediante una correlación entre la altitud y la temperatura, para la construcción del mapa se utilizó los datos obtenidos de las estaciones meteorológicas del INAMHI (Ramírez, 2015). Estos datos se indican en la Tabla 7.

**Tabla 7**

*Estaciones meteorológicas cercanas a la microcuenca*

CÓDIGO	ESTACION	ALTURA (m.s.n.m)	X	Y	T MEDIA °C
M001	IRUGUINCHO	3140	789114	10028800	16,74
M103	SAN GABRIEL	2790	852778	10066710	21,73
M317	COTACACHI HDA	2410	804796	10034540	22,20
M318	APUELA	1620	777070	10039680	24,19
M325	GARCIA MORENO	1950	764146	10025870	25,04
M326	SELVA ALEGRE	1800	769980	10027520	26,59

X: Longitud en el sistema de coordenadas WGS1984 Zona 17S; Y: Latitud en el sistema de coordenadas WGS1984 Zona 17S; T: Temperatura.

**Fuente:** INAHMI, 2018.

Para calcular la temperatura media anual se utilizó la ecuación 10 (Ec. 10) (Ramírez, 2015):

$$Tm = \frac{\Sigma(Tp * A)}{\Sigma A}$$

Ec. 10

Donde:

$T_m$  = Temperatura media en °C.

$T_p$  = Temperatura promedio  $[(T_{max}+T_{min})/2]$ .

A = Área entre dos isotermas consecutivas.

$\Sigma A$  = Sumatoria del área en ha.

#### *3.3.3.2.3 Determinación de las zonas climáticas*

Para la determinación de las zonas climáticas se utilizó la herramienta *Intersec* de ArcGIS 10.3 con la cual se cruzó los polígonos correspondientes a las isoyetas e isotermas. Una vez obtenido el polígono final se identificó las zonas climáticas de acuerdo al criterio de Pourrut (1983) y se creó un mapa con las diferentes zonas de la microcuenca.

### **3.3.4 Identificación de la variación de la cobertura forestal**

Se identificó la variación de la cobertura forestal a través de imágenes satelitales en el periodo de tiempo 2000-2015.

#### *3.3.4.1 Descarga de imágenes satelitales*

Las imágenes satelitales se descargaron de la página web Earth Explorer de United States Geological Survey (USGS), imágenes tipo LandSat 7 para los años 2000 y 2008 e imágenes tipo LandSat 8 para el año 2015 con una resolución espacial de 30 metros.

Para la selección de imágenes dentro de la microcuenca se tomó en cuenta un porcentaje máximo del 20% de nubosidad, luego se visualizó la cobertura forestal a través de bandas multiespectrales y se verificó los datos de cada imagen (Condori, Loza, Mamani, y Solíz, 2018).

#### *3.3.4.2 Corte y proyección en el área de estudio*

Después de tener las imágenes respectivas se procedió a proyectarlas y cortarlas en el área de estudio mediante el software ArcGIS 10.3, para dicho proceso se utilizaron las herramientas *Project raster* y *clip* respectivamente.

Para el análisis de la cobertura forestal se utilizó las bandas 543 en las imágenes LandSat 7 y las bandas 654 en la imagen LandSat 8, las mismas que fueron desplegadas en el programa y cortadas con el *shapefile* del límite de la microcuenca (Condori *et al.*, 2018).

Posteriormente se realizó la correcciones radiométricas para las respectivas imágenes mediante el número digital de cada banda con la herramienta *raster calculator* utilizando la ecuación 11 (Ec. 11) (Ariza, 2013).

$$L\lambda = ML * Qcal + AL$$

Ec. 11

Donde

$L\lambda$  = Radiancia espectral en watts/m<sup>2</sup>\*srad\* μm.

ML = RADIANCE MULT\_BAND\_x obtenido del metadato.

Qcal = Banda de la imagen en número digital (ND).

AL = RADIANCE ADD\_BAND\_x obtenido del metadato.

### 3.3.4.3 Corrección atmosférica

Una vez realizada la corrección de la radiancia; se procedió con el cálculo del efecto bruma a través de la aplicación de la ecuación 12 (Ec.12) (Sobrino, Jimenez, y Paolini, 2004).

$$L_p = L_{min} - L_{DO1\%}$$

$$L_p = ML * ND_{min} + AL - \left( \frac{0.01 * ESUN_{\lambda} * SEN_{\theta SE}}{\pi * d^2} \right)$$

Ec. 12

Donde:

$L_p$  = Efecto bruma

$L_{min}$  = Radiancia que corresponde a un valor digital.

$L_{DO1\%}$  = Radiancia del objeto oscuro, con un valor asumido de reflectancia de 0,01.

ML = RADIANCE MULT\_BAND\_x obtenido del metadato.

NDmin = Valor digital mínimo.

AL = RADIANCE ADD\_BAND\_x obtenido del metadato.

ESUN $\lambda$  = Irradiancia espectral solar exoatmosférica.

$\theta_{SE}$  = Ángulo de elevación obtenido del metadato, (SUN\_ELEVATION), convertido en radianes.

d = Distancia del sol a la tierra obtenido del metadato.

Luego se procedió con el cálculo final de la corrección atmosférica; la reflectancia de la superficie a través de la aplicación de la ecuación 13 (Ec. 13) (Moran, Jackson, Slater, y Teillet, 1992).

$$p_s = \frac{\pi * (L_\lambda - L_p)}{T_v * ((ESUN_\lambda * SEN_{\theta_{SE}} * d^{-2} T_z) + E_{down})}$$
$$p_s = \frac{\pi * (L_\lambda - L_p) * d^2}{T_v * T_z (ESUN_\lambda * SEN_{\theta_{SE}})}$$

Ec. 13

Donde:

$p_s$  = Reflectancia de la superficie.

$L_\lambda$  = Radiancia espectral.

$L_p$  = Efecto de la bruma.

d = Distancia del sol a la tierra.

$T_v$  = Transmitancia de la atmosfera en la dirección de visión

$T_z$  = Transmitancia atmosférica en la dirección de iluminación

ESUN $\lambda$  = Irradiancia espectral solar exoatmosférica.

$\theta_{SE}$  = Ángulo de elevación.

$E_{down}$  = Irradiancia difusa descendiente, se considera igual a cero.

#### **3.3.4.4 Clasificación supervisada de imágenes en el área de estudio**

Una vez obtenida las imágenes corregidas de los años 2000, 2008 y 2015, se procedió a realizar la clasificación supervisada con la herramienta *Classify* de ArcGIS 10.3; esto a través de la toma de muestras de polígonos en cada imagen respectiva.

Todo el proceso se realizó con el fin de determinar los diferentes tipos de coberturas forestales y finalmente obtener los mapas de cambio de cobertura forestal de la microcuenca del río Chorlaví.

#### **3.3.4.5 Validación de la clasificación supervisada**

Antes de realizar los mapas de cobertura fue necesario validar la clasificación supervisada, esto debido a que ninguna clasificación es completamente verídica. Es así que se evaluó el grado de exactitud de las clases asignadas por el software ArcGIS 10.3 con las clases observadas en una imagen satelital de plataforma Google Earth para los diferentes años de estudio.

En las imágenes satelitales se tomó 140 puntos de referencia, 20 por cada cobertura forestal, esto con el fin de determinar si existía concordancia entre las coberturas. La validación se realizó a través de la matriz de confusión y el coeficiente de Kappa, el mismo que se calculó mediante la ecuación 14 (Ec. 14) (Cohen, 1968).

$$K = \frac{N \sum n_{ii} - \sum n_{i+} n_{+i}}{N^2 - \sum n_{i+} n_{+i}}$$

Ec. 14

Donde:

K = Coeficiente Kappa.

N = Tamaño de la muestra.

$n_{ii}$  = Valores de los pixeles que concuerdan en la matriz.

$n_{i+}$  = Totales marginales de una fila i.

$n_{+i}$  = Totales marginales de una columna i.

Este coeficiente se interpreta de acuerdo a la Tabla 8 propuesta por (Landis y Koch, 1977).

**Tabla 8**

*Rangos de valoración del coeficiente Kappa*

<b>RANGO</b>	<b>Concordancia</b>
0,00	Pobre
0,01 - 0,02	Leve
0,21 - 0,40	Aceptable
0,41 - 0,60	Moderada
0,61 - 0,80	Considerable
0,81 - 1,00	Casi perfecta

**Fuente:** Landis y Koch, 1977

### **3.3.4.6 Mapas de cobertura forestal**

En los respectivos mapas generados se analizó el cambio de superficie de la vegetación expresado en hectáreas y porcentaje donde se comparó las áreas de las diferentes coberturas obtenidas mediante la clasificación supervisada (Bermúdez, 2016). Además se hizo un análisis de cambio de uso de suelo para cada cobertura mediante una matriz de transición, aplicada para cada periodo respectivamente.

Para determinar el cambio de la cobertura forestal anual se utilizó la ecuación 15 (Ec. 15) (Ministerio del Ambiente del Ecuador [MAE], 2012)

$$R = \frac{A1 - A2}{T2 - T1}$$

Ec. 15

Donde:

R = Pérdida de la cobertura anual para un tiempo determinado.

A1 = Área inicial de la cobertura.

A2 = Área final de la cobertura.

T1 = Tiempo inicial.

T2 = Tiempo final.

Y para determinar la tasa de deforestación anual se aplicó la ecuación 16 (Ec. 16) (Puyravaud, 2003):

$$t = \left[ \left( 1 - \frac{A1}{A2} \right) * \frac{1}{n} \right] * 100$$

Ec. 16

Donde:

t = Tasa de deforestación en porcentaje.

A1 = Área inicial en ha.

A2 = Área final en ha.

n = Años totales.

### **3.3.5 Determinación de la influencia de los cambios multitemporales con relación a los caudales**

Se realizó el modelamiento hidrológico para determinar la influencia de los cambios multitemporales en el periodo 2000-2015, debido a que no se contaba con datos de precipitación y caudal base para el año 2017.

#### ***3.3.5.1 Modelamiento hidrológico en base a la subcuenca del río Ambi***

El modelamiento del río Chorlaví se realizó en base a la subcuenca a la que pertenece, debido a que no se contaba con datos de precipitación y caudal para todos los años de estudio en la estación meteorológica cercana a la microcuenca. Por el contrario, para la subcuenca del río Ambi se tiene datos para los años de estudio mencionados.

La metodología utilizada para la modelación está basada en la propuesta por Tapia (2012), en el estudio “Modelización hidrológica de un área experimental en la cuenca del río Guayas en la producción de caudales y sedimentos”, la misma que calibra y valida los caudales de la microcuenca del río Toachi que forma parte de la cuenca del río Guayas y así logra obtener la validación y calibración de toda la cuenca de estudio.

Para este caso se toma en cuenta la unidad hidrológica mayor para calibrar y validar los caudales de la microcuenca.

### 3.3.5.1.1 Delimitación de la subcuenca del río Ambi

La delimitación de la cuenca se realizó con la información topográfica del Instituto Geográfico Militar a escala 1:50000 con Datum WGS 1984 UTM Zona 17S por medio de la utilización del software ArcGIS 10.3 ® (SNI, 2014).

### 3.3.5.1.2 Número de curva

El número de curva es un factor que se utilizó para realizar la simulación del caudal de la subcuenca, este dependió de la precipitación, tipo de suelo, pendiente del terreno y la cobertura vegetal (Gaspari *et al.*, 2009).

Para su cálculo se determinó el tipo de suelo de acuerdo a la Tabla 9 expuesta por Gaspari *et al.*, (2009) el uso actual del suelo o tipo de cobertura vegetal, y la velocidad de infiltración.

Luego se entrecruzó las capas en el software ArcGIS 10.3, donde se obtuvo un nuevo *shapefile* con el que se determinó el número de curva mediante la utilización de programa NUMCUR.

## Tabla 9

### *Tipos de suelo y textura de suelo*

<b>Tipos de Suelo</b>	<b>Textura del suelo</b>
A	Arena con poco limo y arcilla, suelos muy permeables
B	Arenas finas y arcillas
C	Arenas muy finas, limos suelos con alto contenido de arcilla
D	Arcillas en grandes cantidades, suelos muy impermeables

**Fuente:** Gaspari *et al.*, 2009

Para determinar los diferentes números de curva de acuerdo al tipo de cobertura vegetal, el programa NUMCUR tomó en cuenta la Tabla 10 que se expresa a continuación (Ibañez, Moreno y Gisbert, 2011b):

**Tabla 10***Clases de uso de suelo para la determinación del número de curva*

Clases	Laboreo	Infiltración	Número de Curva			
			A	B	C	D
Barbecho	-	-	77	86	91	94
	R	Pobres	72	81	88	91
	R	Buenas	67	78	85	89
Cultivos alineados	C	Pobres	70	79	84	88
	C	Buenas	65	75	82	86
	C – T	Pobres	66	74	80	82
	C – T	Buenas	62	71	78	81
	R	Pobres	65	76	84	88
Cultivos no alineados con surcos pequeños o mal definidos	R	Buenas	63	75	83	87
	C	Pobres	63	74	82	85
	C	Buenas	61	73	81	84
	C – T	Pobres	61	72	79	82
	C – T	Buenas	59	70	78	81
	R	Pobres	66	77	84	88
Cultivos densos de leguminosas o prados en alternativa	R	Buenas	58	72	81	85
	C	Pobre	64	75	83	85
	C	Buenas	55	69	78	83
	C – T	Pobres	63	73	80	83
	C – T	Buenas	51	67	76	80
	-	Pobres	68	79	86	89
Pastizales (pastos naturales)	-	Regulares	49	69	79	84
	-	Buenas	39	61	74	80
	C	Pobres	47	67	81	88
	C	Regulares	25	59	75	83
	C	Buenas	6	35	70	79
Prados permanentes Montes con pastos (ganadero-forestal)	-	-	30	58	71	78
	-	Pobres	45	66	77	83
	-	Regulares	36	60	73	79
	-	Buenas	25	55	70	77
	-	Muy pobres	56	75	86	91
	-	Pobres	46	68	78	84
Bosques (forestales)	-	Regulares	36	60	70	76
	-	Buenas	26	52	63	69
	-	Muy buenas	15	44	54	61

Continúa

Clases	Laboreo	Infiltración	Número de Curva			
			A	B	C	D
Caseríos	-	-	59	74	82	86
Caminos de tierra	-	-	72	82	87	89
Caminos de tierra firme	-	-	74	84	90	92

**Fuente:** Ibañez *et al.*, 2011b

#### 3.3.5.1.3 División en subcuencas

Se delimitó cuatro subcuencas dentro de la subcuenca del río Ambi para tener datos de simulación del caudal más precisos y exactos, así mismo para conocer cuál de ellas aporta mayor cantidad de agua al punto de aforo. Estas se ubicaron en la parte alta, baja, derecha e izquierda de la subcuenca. Para cada una se determinó el número de curva y el área en kilómetros cuadrados.

#### 3.3.5.2 Modelamiento del caudal superficial con HEC-HMS

Para realizar el modelamiento hidrológico de la subcuenca del río Ambi se utilizó datos de precipitación de dos estaciones meteorológicas, las que fueron más influyentes en las subcuencas divididas de acuerdo al método de polígonos Thiessen. Es así que para las subcuencas 1, 2 y 4 se utilizó la estación Atuntaqui (M021) y para la subcuenca 3 la estación Ibarra-INAMHI (M1240). Para obtener la simulación hidrológica de las subcuencas; se utilizaron los siguientes métodos:

- Pérdida: *SCS Curve Number*, para separar la precipitación efectiva de la total.
- Transformación: *SCS Unit Hydrograph*, para convertir la precipitación efectiva en escorrentía.
- Caudal base: *Recession*, para añadir el caudal base.

##### 3.3.5.2.1 Datos de entrada para el método de pérdida y caudal base.

- Número de curva ponderada

Se calculó el número de curva ponderada por medio de la ecuación 17 (Ec. 17) (Gaspari *et al.*, 2009).

$$NCp = \frac{\Sigma A}{\Sigma NC}$$

Ec. 17

Donde:

NCp = Número de curva ponderada.

$\Sigma A$  = Sumatoria del área en ha.

$\Sigma NC$  = Sumatoria del número de curva.

- Impermeabilidad

La capacidad que tiene el suelo para retener el agua es lo que se conoce como impermeabilidad la misma que se calculó con la ecuación 18 (Ec. 18) (Ramírez, 2015).

$$I = \frac{\Sigma A}{A1}$$

Ec. 18

Donde:

I = Impermeabilidad.

$\Sigma A$  = Sumatoria del área.

A1 = Área del número de curva.

- Pérdida inicial

La pérdida del agua lluvia como escorrentía superficial se calculó mediante la ecuación 19 (Ec. 19) (Ramírez, 2015).

$$Po = 0,2 * \left\{ 254 * \left[ \left( \frac{100}{NCp} \right) - 1 \right] \right\}$$

Ec. 19

Donde:

Po = Pérdida inicial.

NCp = Número de curva ponderada.

- Tiempo de concentración y de retardo

Finalmente se calculó el tiempo de concentración de cada subcuenca en minutos y para calcular el tiempo de retardo se lo multiplico por 0,6 ya que este tiempo es el que transcurre desde el centro de gravedad (60% del Tc).

#### *3.3.5.2.2 Datos de precipitación*

El balance hídrico de una cuenca está determinado por las entradas y salidas de agua que esta posee; la entrada de agua se da principalmente por medio de la precipitación. Para determinar la precipitación diaria se recopiló información de las estaciones pluviométricas cercanas a la subcuenca del río Ambi a través de datos históricos obtenidos del INAMHI.

Para determinar la influencia de las estaciones meteorológicas en cada subcuenca se aplicó el método de Polígonos Thiessen utilizando en software ArcGIS 10.3. Y estos datos de precipitación se obtuvieron de las estaciones Atuntaqui (M021), e Ibarra-INAMHI (M1240).

#### ***3.3.5.3 Calibración y validación del modelo hidrológico***

##### *3.3.5.3.1 Calibración de los datos*

La calibración consistió en optimizar los parámetros del modelo para lograr un ajuste satisfactorio entre los caudales simulados y los observados, esto mediante el cambio de sus valores preliminares.

Debido a que no se contaba con datos completos de caudal observado para los años de estudio la calibración se realizó en el año 2014 desde enero hasta junio. Los datos de caudal se obtuvieron de la estación hidrológica Ambi DJ Cariyacu (H023), los mismos que fueron corregidos mediante consultas de descargas hídricas y toma de datos en salidas de campo ya que se presentaban valores atípicos.

Es así que para ajustar los caudales observados a los simulados, se efectuó primeramente corridas y calibraciones con el método de pérdida *Gridded soil moisture accounting*, en el HEC-HMS; con este se determinaron la cantidad de aportes subterráneos y descargas al caudal (Cabrera, 2017). Posteriormente para poder realizar la simulación con el número de

curva se ajustaron los caudales observados excluyendo los valores de aporte subterráneo que no toma en cuenta este modelo.

Luego con la simulación del número de curva se realizó la optimización de los parámetros del método de recesión, con la función *Optimization Trial Manager* del software, el mismo que ajusta el valor inicial a uno con mayor exactitud para obtener un caudal simulado acorde al caudal observado.

La verificación de los datos obtenidos mediante la optimización y el ajuste de los caudales observados se realizó a través de un análisis de correlación entre el hidrograma simulado y el observado, para el cual se aplicó el coeficiente de determinación  $R^2$ , el mismo que es equivalente al cuadrado de la correlación (Tapia, 2012).

El coeficiente de correlación representa la variación entre dos variables y sus valores van de 0 a 1 y mientras más cercano a 1 sea la asociación lineal es perfecta. Se calculó mediante la ecuación 20 (Ec. 20) (Aguirre y Vizcaíno, 2010):

$$R = \frac{Cxy}{\sqrt{Sx^2 \times Sy^2}}$$

Ec. 20

Donde:

R = Coeficiente de correlación.

Cxy = Covarianza de los valores observados y simulados.

$Sx^2$  = Varianza de los valores observados.

$Sy^2$  = Varianza de los valores simulados.

De la misma manera para comprobar que los caudales calibrados tengan un rango de ajuste alto, se determinó el coeficiente de Nash-Sutcliffe el cual mide la variabilidad de las observaciones de una simulación con respecto a una real (Cabrera, 2011). Cuando la simulación es igual a 1 la calibración se define como perfecta y si es menor a 0 es mala;

### 3.3.5.3.2 Validación de los caudales

La validación se realizó para asegurar que los datos calibrados son válidos para cualquier periodo de tiempo que se requiera. Es así que se comparó los datos de caudal simulado y el observado, con los parámetros ya calibrados en año 2014 desde julio hasta diciembre.

De igual manera que en la calibración se realizó la verificación de los datos obtenidos mediante un análisis de correlación entre caudales simulados y observados; y se aplicó el criterio Nash-Sutcliffe para observar el ajuste entre ellos. Este criterio se calculó mediante la ecuación 21 (Ec. 21) y se midió el ajuste de acuerdo a la Tabla 11 (Molnar, 2011).

$$E = 1 - \frac{\Sigma(Q_{sim} - Q_o)^2}{\Sigma(Q_o - Q_p)^2}$$

Ec. 21

Donde:

E = Criterio Nash-Sutcliffe.

Q<sub>o</sub> = Caudal observado.

Q<sub>sim</sub> = Caudal simulado.

Q<sub>p</sub> = Promedio de los caudales observados

**Tabla 11**

*Valores de referencia del criterio Nash-Sutcliffe*

<b>RANGO NSE</b>	<b>Ajuste</b>
<0,2	Insuficiente
0,2 - 0,4	Satisfactorio
0,4 - 0,6	Bueno
0,6 - 0,8	Muy bueno
>0,8	Excelente

**Fuente:** Molnar, 2011

### 3.3.5.3.3 Simulación hídrica de la subcuenca del río Ambi

Para realizar la simulación en el software HEC-HMS, se introdujo para cada subcuenca los componentes del modelo en la opción *Components*, se utilizó los métodos *SCS Curve Number* y *Recession*, se añadió los datos de entrada, se generó el modelo hidrológico con la

herramienta *Meteorologic model manager*, se registraron los valores de precipitación de las estaciones meteorológicas, finalmente se creó el control y se ejecutó la corrida que generó los resultados de la simulación del caudal (Salazar, 2017).

Los resultados de la simulación que generó el programa son: el volumen de precipitación, la pérdida de precipitación, el volumen de precipitación captada, el caudal base y el volumen total de descarga.

#### **3.3.5.4 Determinación de la relación caudal-vegetación boscosa**

Una vez validado el modelo de la cuenca del río Ambi, se realizaron tres simulaciones para la microcuenca del río Chorlaví. Al formar parte de la unidad hidrográfica mayor ya validada, los datos de la simulación se encuentran validados.

Las simulaciones se realizaron usando los datos de precipitación del año 2015 y los datos de número de curva de los años 2000, 2008 y 2015. Con los valores de caudales mensuales obtenidos se realizó el análisis de normalidad y homocedasticidad. Una vez comprobados los supuestos mencionados aplicó una prueba de t de student con la finalidad de comprobar si los datos de la simulación tienen relación con la generación de caudales.

#### **3.3.5.5 Simulación de posibles crecidas mediante HEC-RAS**

Para realizar la simulación de las posibles inundaciones en la microcuenca del río Chorlaví se utilizó los datos de caudal máximo de los años 2000 y 2015 con el fin de realizar una comparación de inundaciones entre un año con vegetación y otro con pérdida de vegetación. Además, se obtuvo datos de caudal para periodos de retorno de 5, 25, 50 y 100 años. El cálculo de los caudales máximos en estos periodos se realizó a través de la distribución de Gumbel mediante la ecuación 22 (Ec. 22) (García, 2013).

$$C = \mu - \frac{1}{\alpha} \left[ \ln - \left( -\ln \frac{T-1}{1} \right) \right]$$

$$\alpha = \frac{Sn}{Sx}; \quad \mu = x - \frac{yn}{\alpha}$$

Ec. 22

Donde:

C = Caudal máximo en un periodo de retorno.

T = Periodo de retorno.

$S_n$  = Desviación típica de la variable  $y_i$ , que depende del tamaño de la muestra N.

$S_x$  = Desviación típica de la muestra de los datos de valores máximos diarios.

$\bar{x}$  = Media de la muestra de los datos de valores máximos diarios.

$\bar{y}_n$  = Media de la variable  $y_i$ .

Después de obtener los caudales se procedió a calcular la geometría del río principal en el software ArcGIS 10.3 con la extensión HEC-GeoRAS, mediante el uso de una imagen satelital RapidEye y el DEM de la microcuenca.

Una vez obtenida la geometría se la exportó a formato ras para proceder a trabajar con el software HEC-RAS. En el programa se introdujo el valor de los caudales máximos para los años 2000, 2015 y los de cada periodo de retorno, además de la pendiente media del río principal para realizar la corrida de la simulación.

La simulación final se exportó a formato gis donde se observó la posible inundación del río Chorlaví en un año con vegetación, un año con disminución de vegetación y en los distintos periodos de retorno. Además se calculó el área de afectación de las crecidas en las diferentes parroquias cercanas al río mediante el software ArcGIS 10.3.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1 Delimitación de la microcuenca del río Chorlaví

En el presente estudio se delimitó la microcuenca del río Chorlaví, la misma que está conformada por varias quebradas tales como: San Antonio, Cacho, Chuchuda, Tanguarín, El Laurel, De los Flores, Santo Domingo, Guanguacha, De la Compañía, Del Molino, Farinango, Licho, De Tiangas, y Peña Blanca.

Las quebradas de San Antonio y Tanguarín son las más importantes de la microcuenca, ya que éstas abastecen el caudal del río principal. Al estar conformadas de una red hidrológica estacional presentan vertientes arreicas que solo poseen caudal en época lluviosa (Espinosa, 2017). La distribución de los ríos de puede apreciar en la Figura 8.

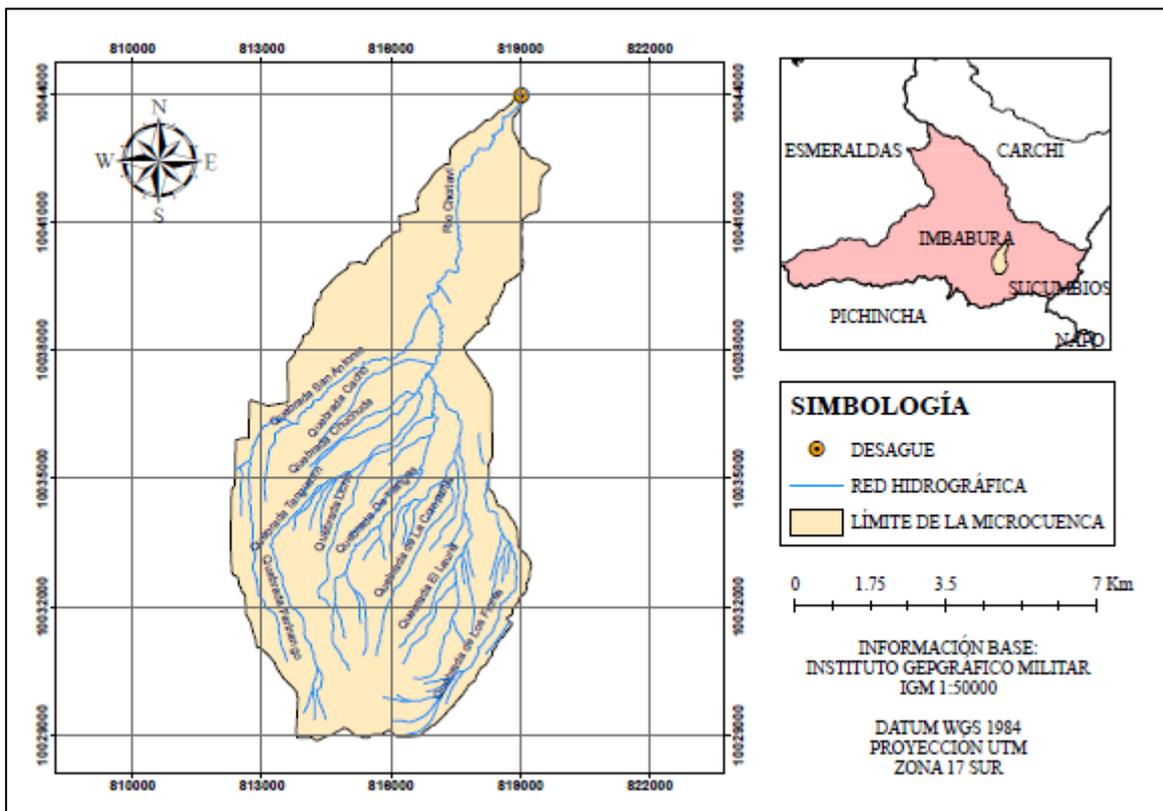


Figura 8. Delimitación de la microcuenca del río Chorlaví

## 4.2 Determinación de la respuesta hidrológica de la microcuenca del río Chorlaví

### 4.2.1 Caracterización Morfométrica

#### 4.2.1.1 Parámetros de forma

Según Esper y Perucca (2014), la precipitación y la escorrentía están influenciadas directamente por las características morfométricas de la microcuenca por ello fue necesario calcular y obtener los valores para determinar su comportamiento frente a fenómenos pluviales que se puedan presentar. Los parámetros de forma se presentan a continuación en la Tabla 12.

**Tabla 12**

*Parámetros de forma*

Parámetros	Resultados
Área (ha)	6597,52
Perímetro (km)	41,21
Longitud axial (km)	15,76
Ancho promedio (km)	4,18
Factor de forma	0,26
Coefficiente de Gravelius	1,42

El área del río Chorlaví se encuentra en el rango 4000 a 10000 ha de superficie de acuerdo al sistema de clasificación del Ecuador (Aguirre, 2007). Esto la clasifica como una microcuenca. De acuerdo al factor de forma la microcuenca es alargada, propensa a crecidas de mediana magnitud en época de lluvia y poca erosión de los suelos (Gaspari *et al.*, 2009). Por otra parte el coeficiente de Gravelius muestra que la microcuenca tiene pocos problemas de estancamiento de agua; posee un buen drenaje y tiene una forma oval redonda (Ramírez, 2015).

#### 4.2.1.2 Parámetros de relieve

La microcuenca del río Chorlaví se encuentra en un rango altitudinal que va desde los 1800 hasta los 4560 m.s.n.m. teniendo una altura media de 2608,94 m.s.n.m., lo que indica que pertenece al piso altitudinal Arbustal siempreverde montano del norte de los Andes (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2013). Esto se puede apreciar en la Figura 9 donde se detallan los polígonos de la altitud.

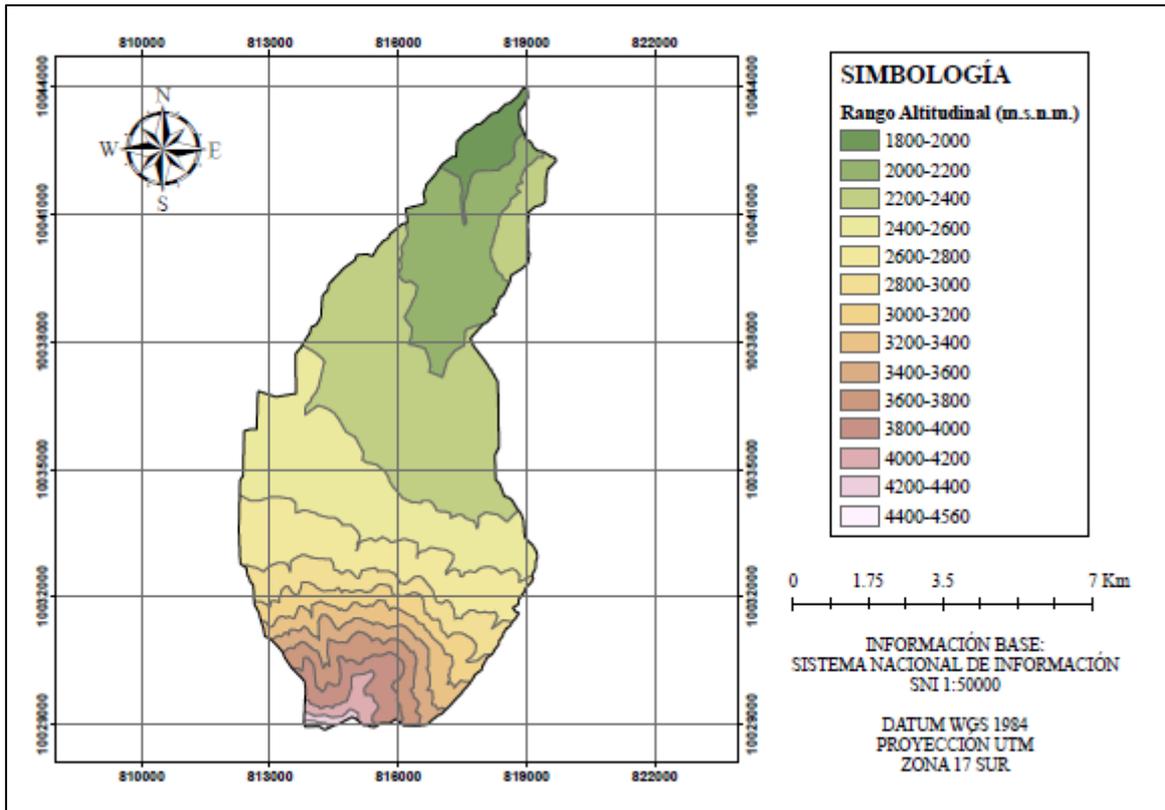


Figura 9. Polígonos altitudinales en intervalos de 200 m.

La curva hipsométrica representada en la Figura 10, muestra que la microcuenca se encuentra en un estado de vejez, es sedimentaria con procesos de erosión bajos pero con tendencia a crecidas (Meza, Rodríguez, Corvacho, y Tapia, 2014).

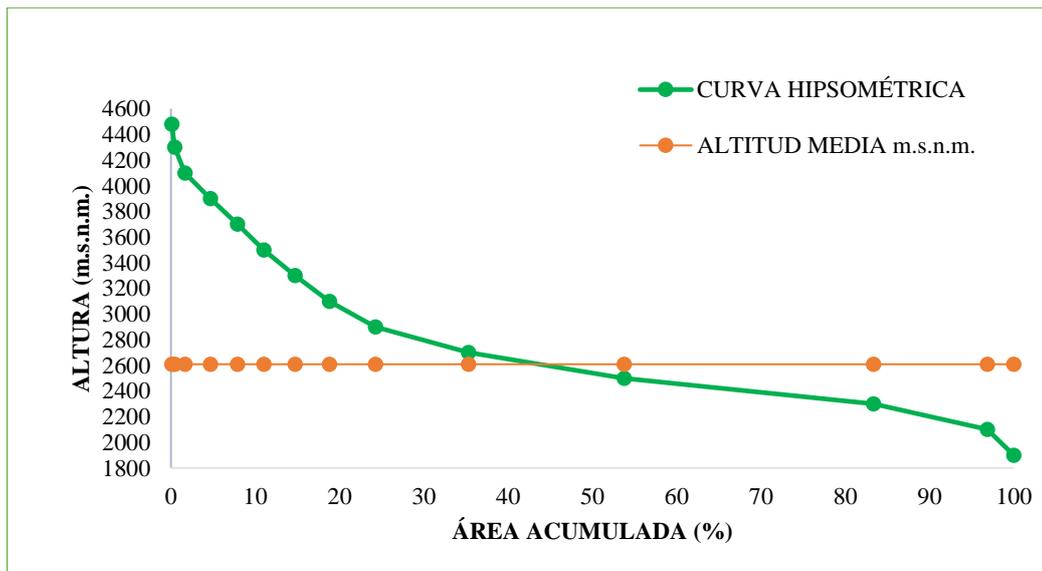


Figura 10. Curva hipsométrica de la microcuenca del río Chorlaví.

Mediante la distribución altitudinal de la microcuenca se obtuvo la pendiente media con un valor de 25,08 %, lo que indica que es un relieve fuerte. En este tipo de terreno el agua de lluvia se drena en un tiempo moderado a rápido lo que provoca en algunos casos que la escorrentía este concentrada en la red de drenaje y presente alta rugosidad (Gaspari *et al.*, 2012). La distribución de las pendientes en la zona de estudio se observa en la Figura 11.

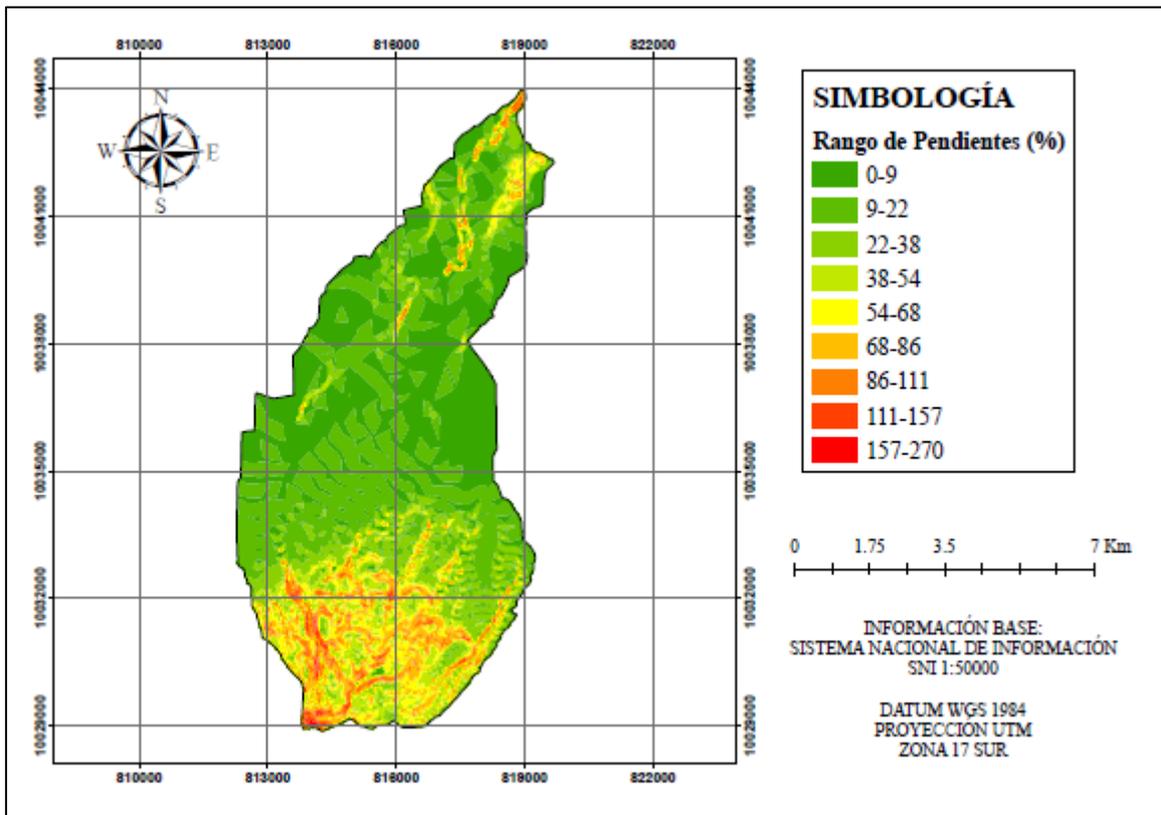


Figura 11. Mapa de pendientes de la zona de estudio

#### 4.2.1.3 Parámetros relativos a la red hidrográfica

Los parámetros relativos a la red hidrográfica se detallan en la Tabla 13.

**Tabla 13***Parámetros relativos a la red hidrográfica*

<b>Parámetros</b>	<b>Resultados</b>
Orden de ríos	4,00
Densidad de drenaje (km/km <sup>2</sup> )	1,96
Longitud del cauce principal (km)	35,63
Pendiente media del cauce (%)	11,83
Tiempo de concentración (horas)	1,70

La topografía fuerte de la microcuenca forma cursos de agua que van desde las partes altas hacia el río principal haciendo que esta tenga un orden de ríos alto. La densidad de drenaje de la microcuenca es moderada, lo que indica que el agua de la precipitación se drena de forma media a rápida y no se pueda percollar a las reversas subterráneas (Peña, 2015).

La pendiente media del cauce indica que en la microcuenca existe poca vegetación, debido a esto la velocidad de drenaje es media y el tiempo de concentración es bajo (Méndez, Pacheco, Cartaya, Marcano y León, 2015). La distribución de orden de ríos se puede apreciar en la Figura 12.

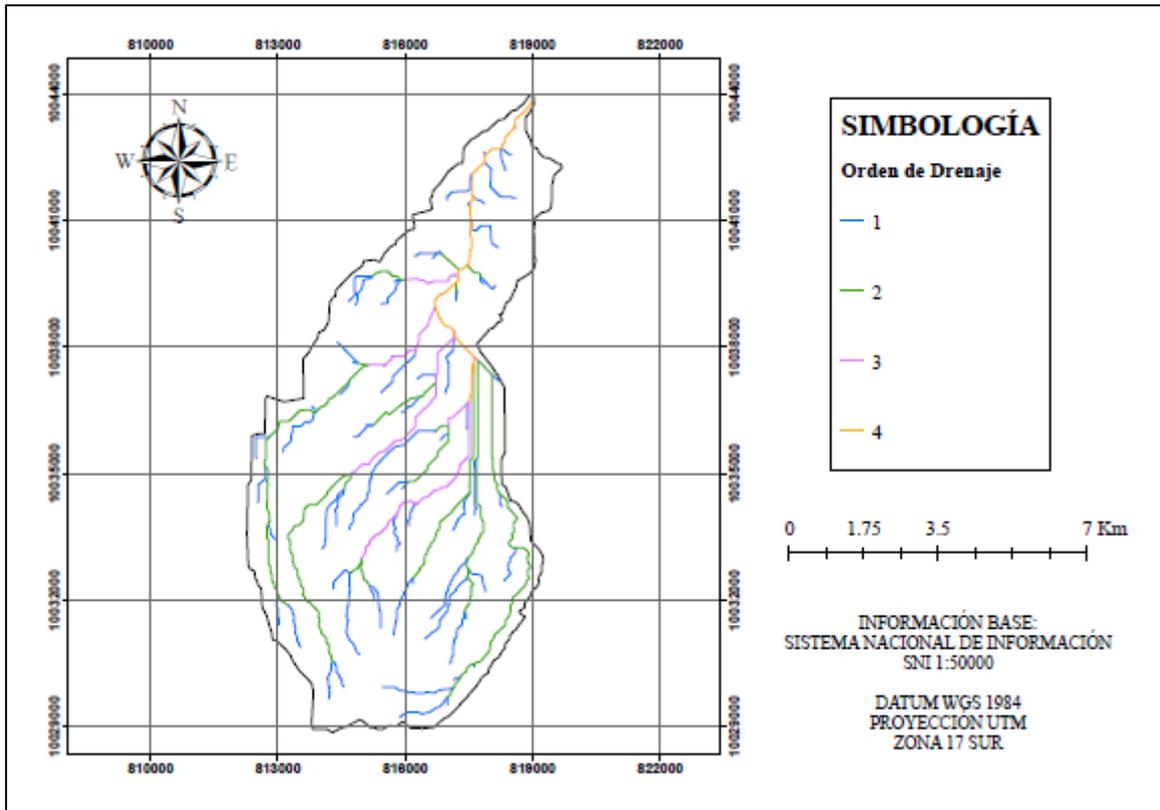


Figura 12. Orden de drenaje de los ríos

Los resultados obtenidos se asemejan a los del estudio realizado por Espinosa (2017), donde indica que la microcuenca del río Chorlaví tiene una tendencia a crecidas altas solo en época de lluvia, esto debido a su topografía y forma. Además su pendiente media indica que el relieve es accidentado a fuerte, lo que concuerda con el relieve de la parroquia San Antonio de Ibarra que es en la que se acentúa gran parte de la microcuenca. Por otro lado la densidad de drenaje es media lo que muestra que el transcurso del agua es rápido cuando existe mucha precipitación.

Por sus características morfométricas, el transporte de sedimentos se da como consecuencia del aumento de la esorrentía, es así que en el estudio de Blanco *et al.*, (2013) menciona que la producción de sedimentos aumenta a medida que disminuye la vegetación.

La investigación de Oyarzún, Frêne, Lacrampe, Huber y Hervé (2011) menciona que una cuenca transporta sedimentos y tiene tendencia a crecidas de alta magnitud de acuerdo a sus características de cobertura forestal y de precipitación. Es así que en una microcuenca con bosque nativo la producción de sedimentos fue menor que en otra microcuenca con plantación forestal de *Eucalipto globulus*.

En el estudio de Huber, Iroumé, Mohr y Frêne (2010) similar al mencionado, la cantidad total de sedimentos que transporta una cuenca fue mayor en plantaciones de *Pinus radiata* que en las de *Eucalipto globulus*. Esto debido a las distintas características de las coberturas forestales y de las franjas de protección de los ríos, la intensidad de perturbación de los suelos, y las distintas escorrentías superficiales.

## 4.2.2 Caracterización Biofísica

### 4.2.2.1 Precipitación

La microcuenca del río Chorlaví presenta precipitaciones anuales mayores a 100 mm; esto debido al rango altitudinal en la que se acentúa. La mayor parte de la microcuenca se encuentra en la parroquia San Antonio de Ibarra la cual posee varios tipos de ecosistemas, en los cuales las precipitaciones van desde los 500 mm/año hasta los 1200 mm/año (Espinosa, 2017).

La precipitación cae a lo largo del año favoreciendo la humedad en la parte alta de la microcuenca; con excepción de los meses secos (GAD San Antonio de Ibarra, 2015). En la Figura 13 se puede apreciar la distribución de la precipitación anual.

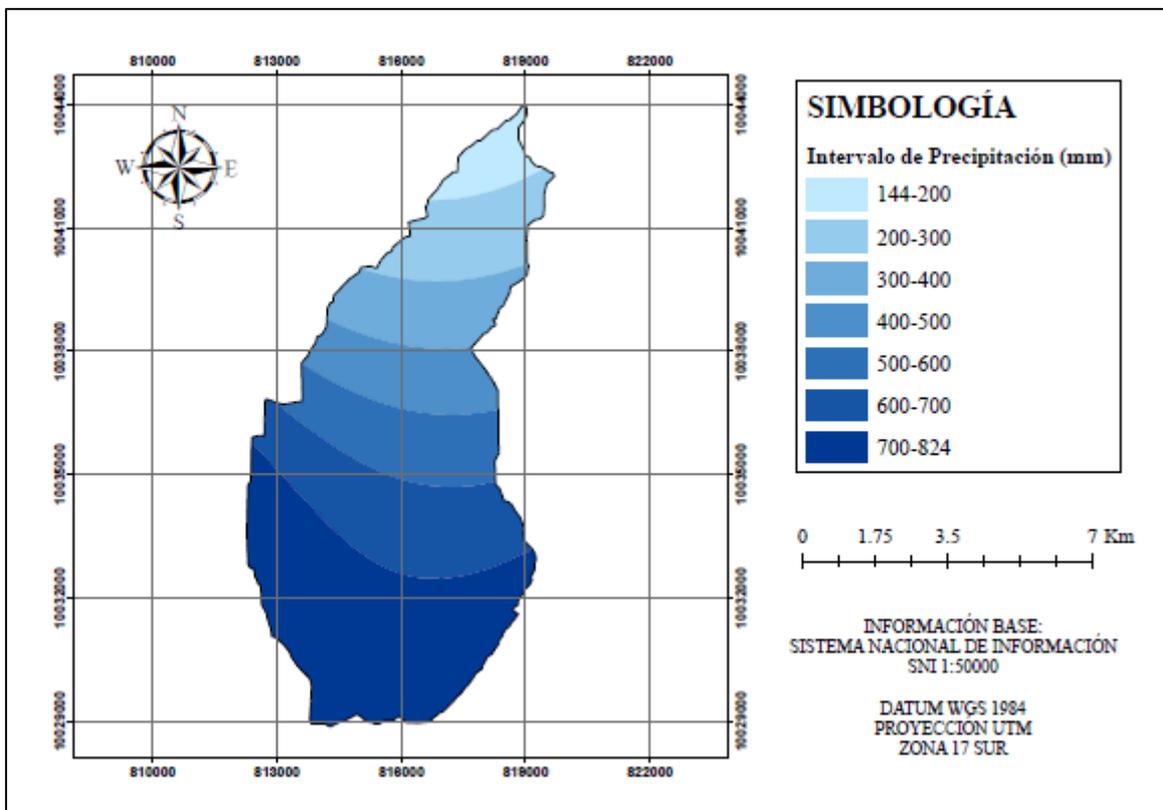


Figura 13. Mapa de Isoyetas de la precipitación media anual de la microcuenca

Los rangos de precipitación y la superficie de influencia sobre la microcuenca se muestran en la Tabla 14.

**Tabla 14**

*Cálculo de la precipitación media anual*

<b>Rangos Pp (mm)</b>	<b>Pp media (mm)</b>	<b>Área (ha)</b>	<b>Pp media de la microcuenca (mm)</b>
144-200	172,00	266,37	
200-300	250,00	663,32	
300-400	350,00	638,07	
400-500	450,00	644,92	569,08
500-600	550,00	804,87	
600-700	650,00	1260,32	
700-824	762,00	2319,00	

Pp: Precipitación

#### **4.2.2.2 Temperatura**

La temperatura de la microcuenca permanece constante durante todo el año debido a que en la región andina la temperatura no presenta mayores variaciones (Buytaert, Celleri, Willems, De Bievre y Wyseure, 2006). Es así que en las zonas bajas de la microcuenca se observan temperaturas altas, mientras que en las zonas altas se observan temperaturas bajas. En la Figura 14 se presenta la variación de la temperatura de la microcuenca.

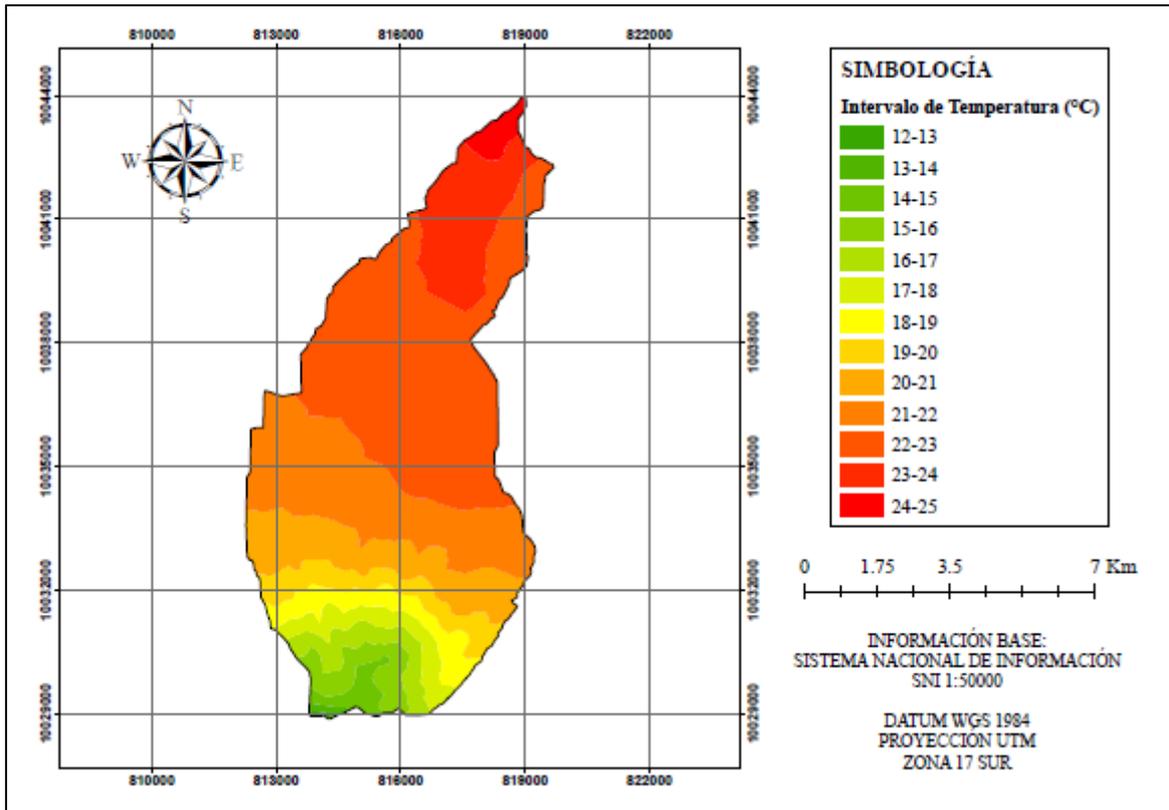


Figura 14. Mapa de Isotermas de la temperatura media anual de la microcuenca

Los valores de temperatura media anual son representados en la Tabla 15.

**Tabla 15**

*Cálculo de la temperatura media anual*

Rangos T (°C)	T media (°C)	Área (ha)	T media de la microcuenca (°C)
12-13	12,50	5,44	
13-14	13,50	17,08	
14-15	14,50	108,85	
15-16	15,50	228,16	
16-17	16,50	230,24	
17-18	17,50	248,58	
18-19	18,50	302,44	21,08
19-20	19,50	348,15	
20-21	20,50	699,60	
21-22	21,50	1284,98	
22-23	22,50	2364,93	
23-24	23,50	659,23	
24-25	24,50	99,19	

T: Temperatura

En la investigación análisis multitemporal del uso del suelo y cobertura vegetal de la cuenca del río Tahuando realizada por Rosero (2018), se calcularon valores de precipitación que van de 0 a 2000 mm anuales y valores de temperatura entre 6 y 20 °C; estos valores son parecidos a los del presente estudio ya que la microcuenca del río Chorlaví es parte de la subcuenca del río Tahuando. Los valores difieren debido a la altitud en la que se encuentran los ríos y el área geográfica a la que pertenecen.

#### ***4.2.2.3 Zonas climáticas***

La zona climática que predomina en la microcuenca de acuerdo a la clasificación de Pourrut (1983), es Semi-húmedo mesotérmico. Este clima es muy característico de la zona andina a excepción de los valles y rangos altitudinales mayores a los 3000 m.s.n.m.

Este clima presenta lluvias que varían de los 500 a 2000 mm anuales con dos etapas lluviosas muy marcadas en los meses de febrero-mayo y octubre-noviembre. Con temperaturas medias que fluctúan entre 12 y 20 °C; donde rara vez baja o sube dependiendo de la altitud (Pourrut, Róvere, Romo y Villacrés, 1995).

La vegetación natural esta reemplazada por pastizales y cultivos agrícolas. Se puede apreciar las zonas climáticas de la microcuenca en la Figura 15.

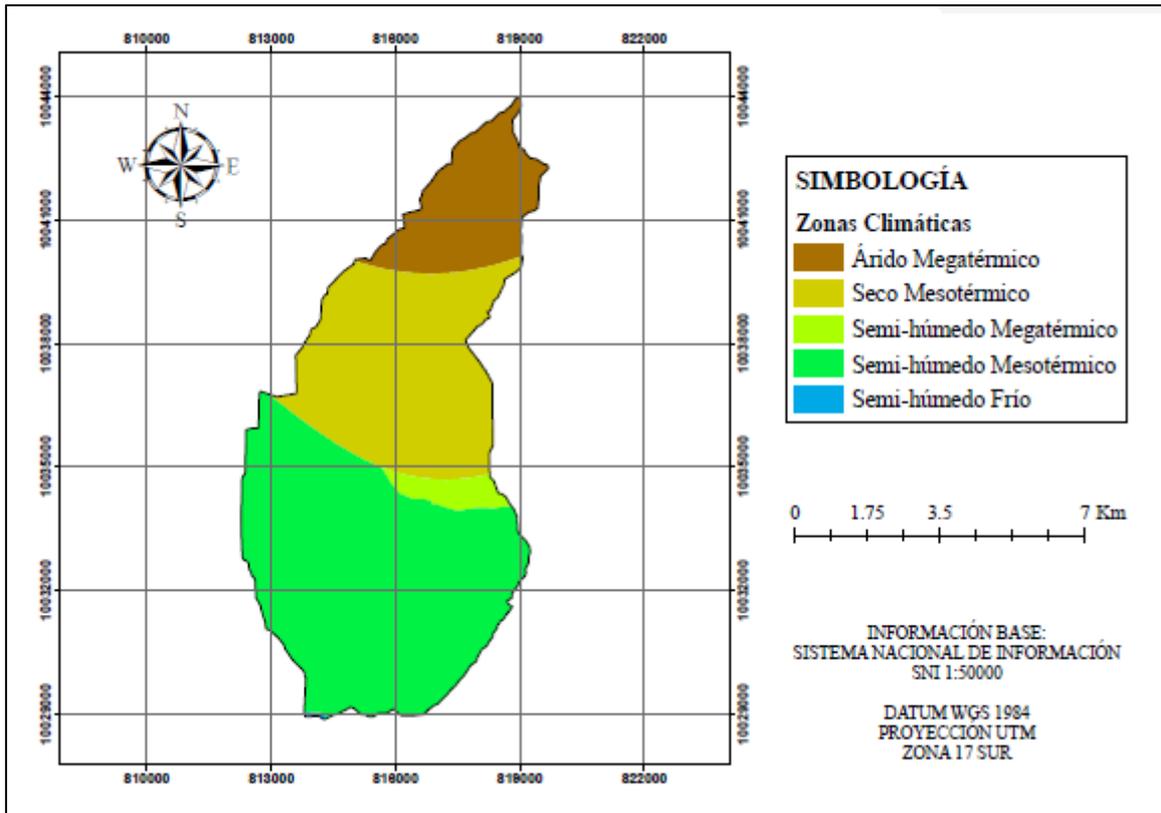


Figura 15. Mapa de zonas climáticas de la microcuenca

Los rangos de precipitación y de temperatura media anual de cada zona climática son representados en la Tabla 16.

**Tabla 16**

*Zonas climáticas de la microcuenca*

<b>Tipo de Clima</b>	<b>Rango Pp (mm)</b>	<b>Rango T (°C)</b>	<b>Área (ha)</b>
Árido megatérmico	> 250	< 22	929,35
Seco mesotérmico	250-500	12-22	2087,21
Semi-húmedo megatérmico	500-1000	< 22	175,42
Semi-húmedo mesotérmico	500-1000	12-22	3396,80
Semi-húmedo frío	500-1000	8-12	5,35

Pp: Precipitación; T: Temperatura

Las zonas climáticas de la microcuenca son similares a las calculadas en la investigación “Establecer zonas de afectación por amenazas de deslizamiento en el cantón Antonio Ante” realizada por Vilca (2017), esto debido a que una parte de la microcuenca está ubicada en

este cantón, es así que el clima que predomina en los dos estudios es semi-húmedo mesotérmico propio de las zonas altas.

### 4.3 Identificación de la variación de la cobertura forestal

#### 4.3.1 Validación de la clasificación supervisada

Al tratar las imágenes satelitales en el software ArcGIS 10.3 se obtuvieron los siguientes tipos de cobertura forestal: agua, bosques, cultivos, infraestructura, suelos desnudos, vegetación arbustiva y vegetación herbácea.

La similitud entre estas coberturas de la clasificación supervisada y de las imágenes satelitales se muestran en las Tablas 17, 18 y 19.

**Tabla 17**

*Matriz de confusión para el año 2000*

Cobertura Clasificada	Imagen satelital							Total	Ex. Usuario	E. comisión
	A	B	C	I	SD	VA	VH			
A	14	0	0	0	0	0	0	14	1,00	0,00
B	3	20	0	0	1	0	1	25	0,80	0,20
C	2	0	18	0	0	0	0	20	0,90	0,10
I	1	0	1	18	1	0	0	21	0,86	0,14
S	0	0	0	0	17	0	0	17	1,00	0,00
VA	0	0	1	0	1	19	0	21	0,90	0,10
VH	0	0	0	2	0	1	19	22	0,86	0,14
<b>Total</b>	20	20	20	20	20	20	20	140		
<b>Ex. productor</b>	0,70	1,00	0,90	0,90	0,85	0,95	0,95		<b>Precisión</b>	<b>0,89</b>
<b>E. comisión</b>	0,30	0,00	0,10	0,10	0,15	0,05	0,05		<b>Coef. de Kappa</b>	<b>0,67</b>

A: Agua; B: Bosques; C: Cultivos; I: Infraestructura; SD: Suelos desnudos; VA: Vegetación arbustiva; VH: Vegetación herbácea; Ex: Exactitud; E: Error; Coef: Coeficiente

**Tabla 18**

*Matriz de confusión para el año 2008*

Cobertura		Imagen satelital						Total	Ex. Usuario	E. comisión
Clasificada	A	B	C	I	SD	VA	VH			
<b>A</b>	16	1	1	0	0	1	1	20	0,80	0,15
<b>B</b>	2	17	1	3	0	0	0	23	0,74	0,26
<b>C</b>	0	1	16	0	0	0	0	17	0,94	0,06
<b>I</b>	0	0	0	17	0	0	0	17	1,00	0,00
<b>S</b>	1	1	0	0	20	0	0	22	0,91	0,09
<b>VA</b>	1	0	0	0	0	18	1	20	0,90	0,10
<b>VH</b>	0	0	2	0	0	1	18	21	0,86	0,14
<b>Total</b>	20	20	20	20	20	20	20	140		
<b>Ex. Productor</b>	0,80	0,85	0,80	0,85	1,00	0,90	0,90		<b>Precisión</b>	<b>0,87</b>
<b>E. omisión</b>	0,20	0,15	0,20	0,15	0,00	0,10	0,10		<b>Coef. de Kappa</b>	<b>0,66</b>

A: Agua; B: Bosques; C: Cultivos; I: Infraestructura; SD: Suelos desnudos; VA: Vegetación arbustiva; VH: Vegetación herbácea; Ex: Exactitud; E: Error; Coef: Coeficiente

**Tabla 19**

*Matriz de confusión para el año 2015*

Cobertura		Imagen satelital						Total	Ex. Usuario	E. comisión
Clasificada	A	B	C	I	SD	VA	VH			
<b>A</b>	16	0	0	0	1	0	0	17	0,94	0,06
<b>B</b>	2	18	0	0	0	0	1	21	0,86	0,14
<b>C</b>	1	2	19	0	1	1	0	24	0,79	0,21
<b>I</b>	0	0	0	18	0	1	0	19	0,95	0,05
<b>S</b>	1	0	1	2	18	0	0	22	0,82	0,18
<b>VA</b>	0	0	0	0	0	17	2	19	0,89	0,11
<b>VH</b>	0	0	0	0	0	1	17	18	0,94	0,06
<b>Total</b>	20	20	20	20	20	20	20	140		
<b>Ex. Productor</b>	0,80	0,90	0,95	0,90	0,90	0,85	0,85		<b>Precisión</b>	<b>0,88</b>
<b>E. omisión</b>	0,20	0,10	0,05	0,10	0,10	0,15	0,15		<b>Coef. de Kappa</b>	<b>0,66</b>

A: Agua; B: Bosques; C: Cultivos; I: Infraestructura; SD: Suelos desnudos; VA: Vegetación arbustiva; VH: Vegetación herbácea; Ex: Exactitud; E: Error; Coef: Coeficiente

Los resultados de la matriz de confusión para los años 2000, 2008 y 2015 indican que la precisión entre las coberturas clasificadas y observadas es alta. El coeficiente Kappa muestra

que la concordancia entre coberturas es muy buena o considerable de acuerdo a los rangos expuestos en la Tabla 8, por lo tanto, la clasificación supervisada es aceptable y se puede proceder a realizar el análisis de los mapas de coberturas.

### 4.3.2 Mapas de cobertura

Para apreciar la variación de la cobertura forestal en los años 2000, 2008 y 2015 se obtuvo 3 mapas, los mismos que se pueden apreciar en la Figura 16.

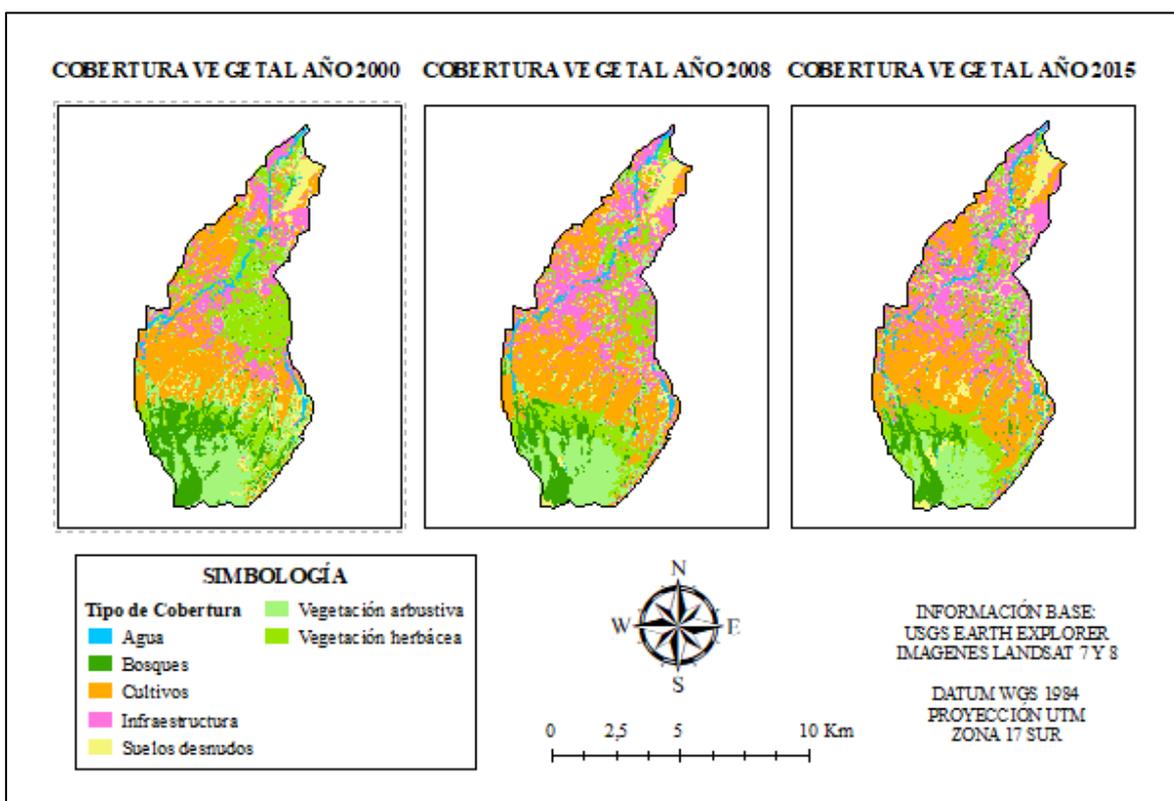


Figura 16. Análisis multitemporal para los años 2000, 2008 y 2015

El tipo de cobertura que predomina en la microcuenca del río Chorlaví es la zona de cultivos, con el paso de los años el bosque disminuyó dando paso al establecimiento de actividades agrícolas e infraestructura, por tal motivo se observa en la Figura 16 en el año 2000 los cuerpos de agua, la cobertura boscosa, vegetación arbustiva y herbácea, tienen un mayor porcentaje de área con respecto a los años 2008 y 2015.

En el año 2008 la infraestructura urbana aumenta un 8 % con respecto al año 2000 y se mantiene casi constante para el año 2015; con respecto a los cultivos, estos incrementan su área en cada periodo, debido a las actividades agrícolas.

En el estudio de Jácome (2017), se puede apreciar que los resultados del análisis multitemporal para la microcuenca del río Bobo son muy similares a los del presente estudio, esto debido a que las coberturas bosques, páramo y vegetación arbustiva de igual manera disminuyeron en el periodo 2002-2015 por actividades antrópicas que son realizadas por los pobladores de la zona.

Con respecto a los cultivos al igual que en la microcuenca del río Chorlaví, estos aumentan a medida que pasa el tiempo, ya que las actividades que más se realizan en el área de estudio son la ganadería y la agricultura.

La diferencia que se observa entre los dos estudios está en que la infraestructura en la microcuenca del río Bobo no influencia la pérdida de cobertura forestal; mientras que en la microcuenca del río Chorlaví al ser una cuenca urbana, esta varía por lo que es una causante de la disminución de la cobertura forestal por aumento poblacional.

En la Figura 17 se puede apreciar el cambio de las diferentes coberturas en los respectivos años analizados.

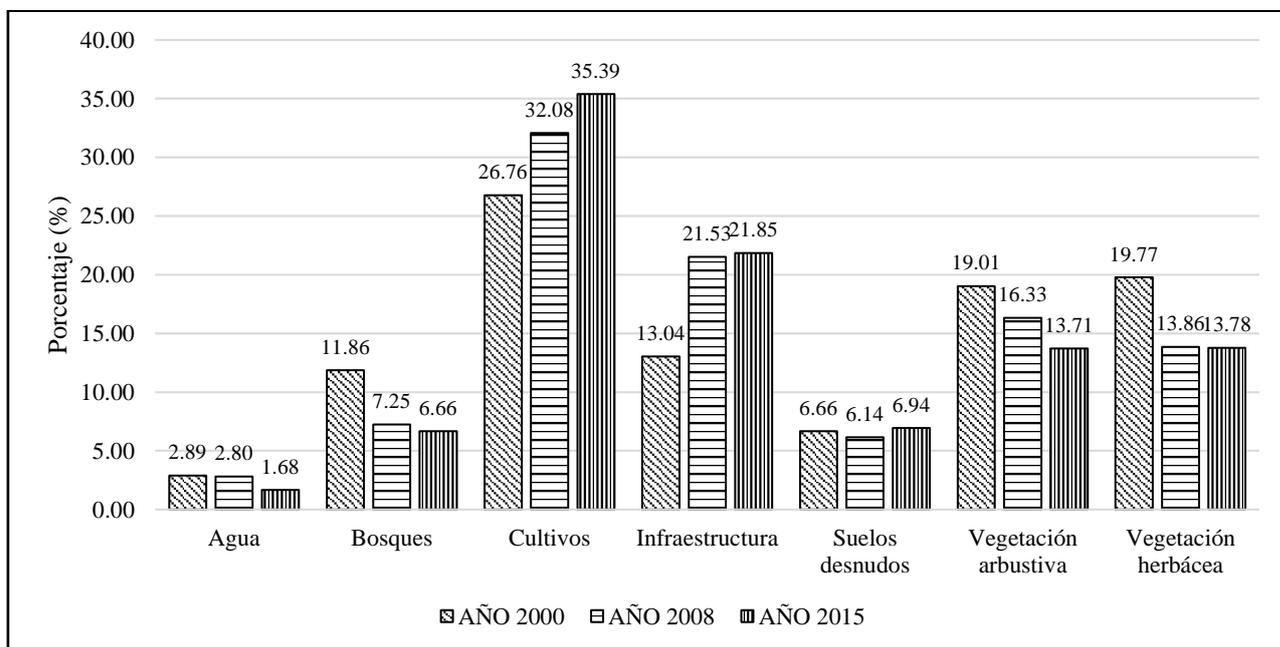


Figura 17. Cambio de la cobertura forestal en los años 2000, 2008 y 2015

### 4.3.3 Cambio de uso de suelo

La microcuenca en sus años de estudio sufrió una variación en el área de ocupa cada cobertura, es decir que una cobertura inicial fue reemplazada por otra debido a cambios por actividades que realiza el ser humano o en muy pocas ocasiones a cambios naturales.

Para determinar las hectáreas que se convirtieron en otras coberturas se realizó dos matrices de transición, las mismas que se muestran en la Tabla 20 y Tabla 21.

**Tabla 20**

*Matriz de transición para el periodo 2000-2008*

		Año 2008 (ha)							Ganancias
		A	B	C	I	SD	VA	VH	
Año 2000 (ha)	A	88,74	7,91	13,10	44,84	10,70	17,12	8,48	190,88
	B	2,97	396,95	16,98	9,91	19,92	133,58	202,42	782,73
	C	16,37	1,92	1275,28	301,27	87,68	51,18	32,01	1765,72
	I	15,28	1,70	169,76	522,50	51,10	54,56	45,14	860,04
	SD	7,55	1,90	162,23	58,47	150,50	42,47	16,35	439,47
	VA	19,60	44,29	231,48	154,53	51,55	625,08	127,80	1254,33
	VH	34,02	23,73	247,66	329,08	33,92	153,61	482,34	1304,36
	Pérdidas	184,54	478,40	2116,49	1420,60	405,36	1077,59	914,55	

A: Agua; B: Bosques; C: Cultivos; I: Infraestructura; SD: Suelos desnudos; VA: Vegetación arbustiva; VH: Vegetación herbácea.

**Tabla 21**

*Matriz de transición para el periodo 2008-20015*

		Año 2015 (ha)							Ganancias
		A	B	C	I	SD	VA	VH	
Año 2008 (ha)	A	38,10	8,95	41,84	35,02	29,72	15,90	15,01	184,54
	B	6,04	278,49	31,27	2,23	9,79	47,75	102,84	478,40
	C	1,32	9,24	1678,27	323,55	61,21	26,57	16,33	2116,49
	I	17,97	20,61	261,70	803,10	93,49	103,77	119,96	1420,60
	SD	12,15	5,58	108,63	90,35	163,22	16,03	9,40	405,36
	VA	23,80	56,44	97,26	82,91	62,04	577,39	177,74	1077,58
	VH	11,27	60,18	115,59	104,18	38,65	116,89	467,79	914,55
	Pérdidas	110,65	439,50	2334,56	1441,33	458,12	904,30	909,07	

A: Agua; B: Bosques; C: Cultivos; I: Infraestructura; SD: Suelos desnudos; VA: Vegetación arbustiva; VH: Vegetación herbácea.

Las matrices muestran que la microcuenca sufrió cambios en todas sus coberturas donde disminuyeron notablemente las coberturas forestales. La superficie de cada categoría que se

mantuvo para cada año se indica sobresaltada en las Tablas 20 y 21 y se puede apreciar que el área de los cultivos e infraestructura son las que más se mantienen en los 3 años de estudio.

En otro aspecto la microcuenca en el periodo 2000-2008 varió 3056,14 ha y se mantuvieron 3541,39 ha, esto quiere decir que cambió el 46,32% de la superficie total. Para el siguiente periodo 2008-2015 se mantuvieron 4006,35 ha y variaron 2591,18 ha, esto indica que el 39,27% de ha sufrieron cambios en su cobertura.

#### ***4.3.3.1 Cálculo de la variación de la cobertura forestal***

La cobertura boscosa tuvo un gran impacto en la microcuenca del río Chorlaví, ya que como se puede observar en la Figura 18 existe un gran cambio en el periodo 2000-2008. En dicho periodo existe un alto índice de pérdida de cobertura boscosa con 38 % del área total que existía de bosques en el año 2000. Al comparar con el periodo 2000-2015 se tiene un 43% del área deforestada; lo que indica que la mayor pérdida de bosques ocurrió en los primeros 8 años.

Para la vegetación arbustiva la disminución de hectáreas es casi similar en los periodos 2000-2008 y 2008-2015. La vegetación herbácea al igual que los bosques sufre la mayor pérdida en el periodo 2000-2008.

En el periodo 2008-2015 se observa que existe una mayor pérdida de vegetación arbustiva; las hectáreas superan a los bosques y vegetación herbácea con 134,39 ha y 167,81 ha respectivamente. Finalmente, desde el año 2000 hasta el año 2015 la cobertura que sufrió mayores cambios en su superficie es la vegetación herbácea, ya que perdió 52,06 ha más que los bosques y 45,26 ha más que la vegetación arbustiva.

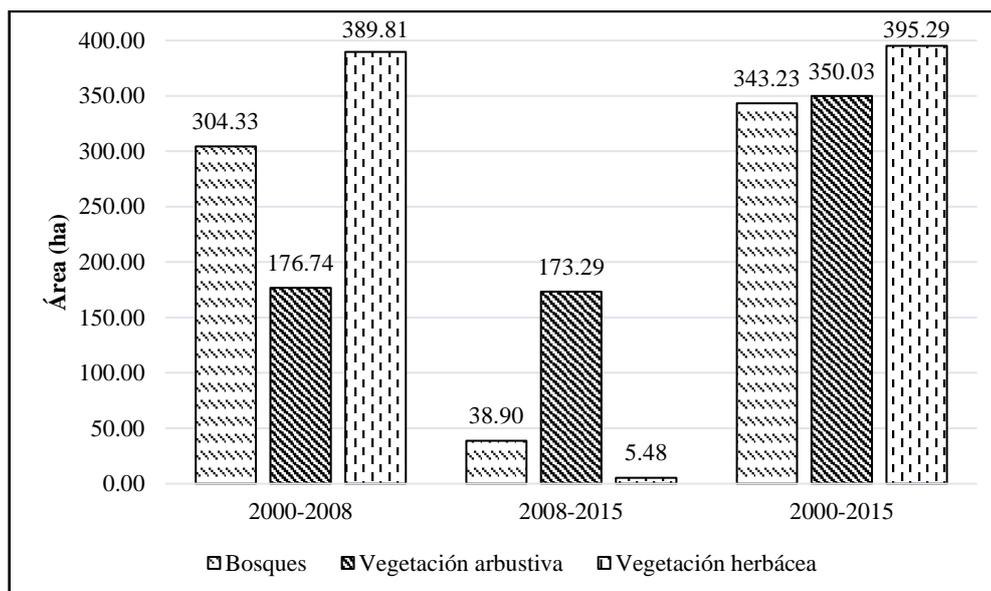


Figura 18. Variación de la cobertura forestal

#### 4.3.3.2 Cálculo de la tasa de deforestación anual

La tasa de deforestación anual indica que existió pérdida de vegetación forestal, en todos los periodos de tiempo, con un mayor impacto en el periodo 2000-2008 como se muestra en la figura 18.

En 15 años se observa que la tasa de deforestación anual varió notablemente; esto provocó que las coberturas forestales sufrieran un gran impacto y por lo tanto tengan valores de deforestación anuales altos.

La tasa de deforestación anual de las diferentes coberturas forestales en hectáreas y porcentaje se indican en la Tabla 22.

**Tabla 22**

*Tasa de deforestación anual*

Cobertura	2000-2008		2008-2015	
	Área (ha)	Porcentaje (%)	Área (ha)	Porcentaje (%)
Bosques	-38,04	-7,95	-5,56	-1,26
Vegetación arbustiva	-22,09	-2,05	-24,76	-2,74
Vegetación herbácea	-48,73	-5,33	-0,78	-0,09
<b>TOTAL</b>	<b>-108,86</b>	<b>-4,41</b>	<b>-31,10</b>	<b>-1,38</b>

En la investigación “Patrones y factores de deforestación en el Ecuador continental, 1990-2010” Sierra (2013), se aprecia que para la provincia de Imbabura en el periodo 2000-2008 las hectáreas deforestadas anualmente fueron 1310, esto indica que ocurrió un cambio de uso de suelo en toda la provincia, es así que debido a que la microcuenca se encuentra dentro de ella, también sufre los cambios como se puede apreciar en esta investigación.

De igual manera en el estudio de Rosero (2018), el mismo que realiza un análisis multitemporal para la subcuenca del río Tahuando se observa un valor de deforestación anual para el periodo 1991-2017 de -0,12%, es decir 14,5 ha; para la presente investigación en un periodo 2000-2015 la deforestación anual de la microcuenca es de -3,22%, es decir 72,57 ha. Un valor alto en menos años de estudio.

Los resultados de la investigación son diferentes a pesar de que las cuencas son cercanas, debido a que la microcuenca es considerada una cuenca urbana y sufrió una pérdida de vegetación por cambios de uso de suelo principalmente para infraestructura.

Según el estudio de Poveda y Mesa (2010) la deforestación provoca que el agua de la precipitación no se infiltre en el suelo y seque las reservas subterráneas. Los bosques gracias a su amplia estructura de raíces permiten que los poros del suelo se abran, su aporte de materia orgánica evita la compactación del suelo y mediante sus hojas disminuye la velocidad de escorrentía, lo que favorece la infiltración del agua y reduce el poder erosivo. Cabe mencionar que un bosque natural brinda mejores beneficios a una cuenca hidrográfica que uno que está erosionado.

En la investigación de Kaimowitz (2011) la disminución de la cobertura boscosa ocasionó que la evapotranspiración disminuya, por tal motivo el agua disponible causó inundaciones por el aumento de escorrentía superficial. Al asociar los cultivos agrícolas en sistemas agroforestales la escorrentía fue controlada y se produjo menos procesos inundables en las zonas bajas.

En el estudio de Kutschker, Brand y Miserendino (2009) la calidad ecológica de las riberas disminuye a medida que ocurre un cambio de uso de suelo, la transformación de los bosques en cultivos ocasiona un fuerte daño al drenaje de las cuencas y altera las características de los ríos. La protección de riberas es fundamental ya que mediante ellas se puede conocer el estado ecológico de los ríos y se puede proponer un manejo sustentable de las áreas boscosas.

## 4.4 Determinación de la influencia de los cambios multitemporales con relación a los caudales

### 4.4.1 Delimitación de la subcuenca del río Ambi

Con el fin de realizar el modelamiento hidrológico del río Chorlaví, se delimitó la subcuenca del río Ambi ya que la microcuenca forma parte de ella. La subcuenca se encuentra ubicada en los cantones Otavalo, Cotacachi, San Antonio, Ibarra y Urcuqui (GAD Imbabura y Prefectura de Imbabura, 2015).

Está conformada por varias quebradas y varios ríos tales como: Huarmiyacu, Itambi, Yanayacu, Cariyacu, Cunguilamo, Jatunyacu, Gualaví, Chorlaví, Tahuando, Alambí, Blanco, Tangalí y Pichaví. También por la cuenca endorreica del lago San Pablo la misma que no se tomó en cuenta para la simulación debido a que es una cuenca que no tiene salida de agua.

La distribución de los ríos de puede apreciar en la Figura 19.

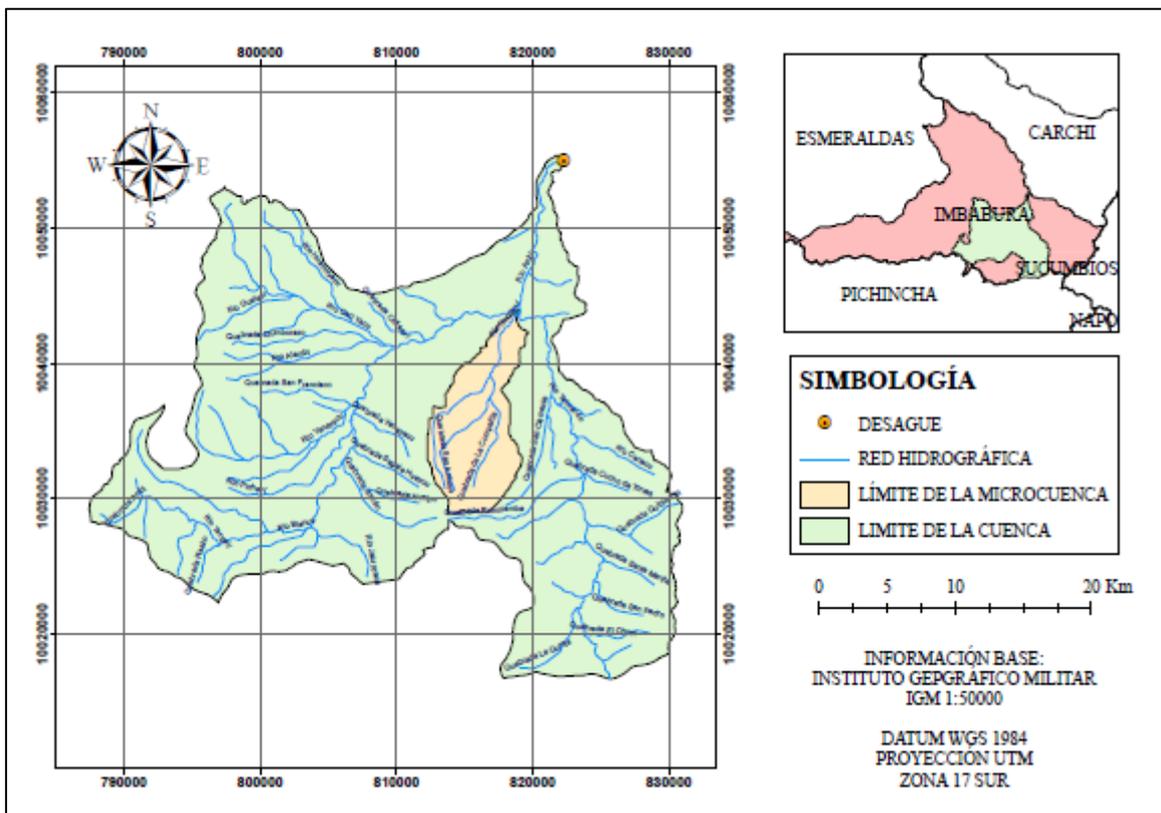


Figura 19. Delimitación de la subcuenca del río Ambi

#### 4.4.2 Determinación del número de curva de la subcuenca del río Ambi

El número de curva se determinó a través del mapa de tipo de suelos de la zona de estudio, la misma que se muestra en la Figura 20.

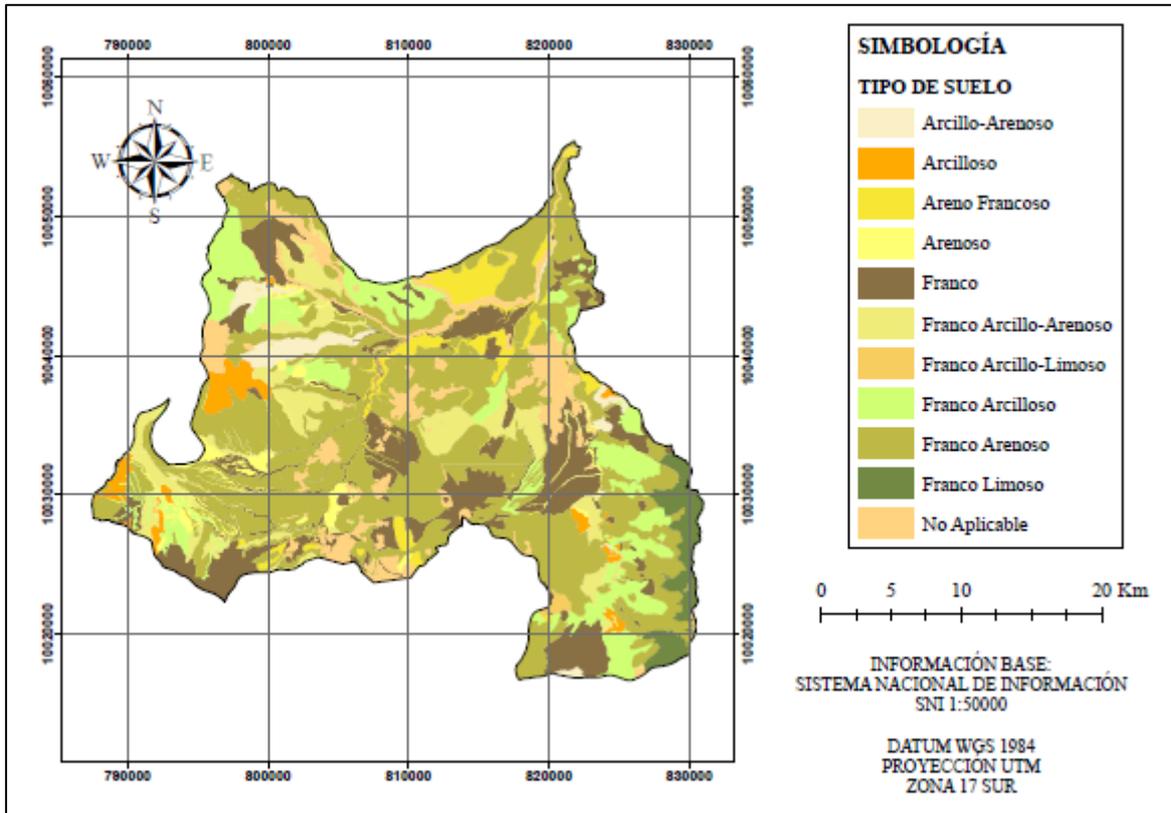


Figura 20. Mapa de tipos de suelos de la subcuenca del río Ambi

El área de estudio presenta tipos de suelos que proceden de rocas sedimentarias ígneas, las mismas que son de origen volcánico, estos suelos poseen una textura arenosa y franco arenosa y se encuentran localizados en la parte alta y baja de la subcuenca. Suelos francos, arcillosos y limosos se encuentran en la parte alta de la subcuenca gracias a la gran cantidad de humedad proporcionada por la cobertura forestal natural que existe (Garzón, 2017).

Los tipos de suelos encontrados en este estudio concuerdan con la textura de suelo obtenida en el estudio de Andrade y Benavides (2010), los que realizan una propuesta de manejo en dos quebradas ubicadas en el cantón Antonio Ante las mismas que ese encuentran dentro de la subcuenca.

En la Tabla 23 se indica el área y el porcentaje de los diferentes tipos de suelo de la subcuenca del río Ambi.

**Tabla 23**

*Área y porcentaje de cada tipo de suelo*

	<b>Tipo de Suelo</b>	<b>Área (ha)</b>	<b>Porcentaje (%)</b>
A	Arenoso	2866,57	3,29
B	Areno Francoso	4223,21	4,85
	Arcillo-Arenoso	2152,17	2,47
	Franco	14743,85	16,93
C	Franco Arcillo-Arenoso	6889,81	7,91
	Franco Arenoso	35231,41	40,46
	Franco Limoso	2338,85	2,69
	Arcilloso	2314,01	2,66
D	Franco Arcillo-Limoso	206,97	0,24
	Franco Arcilloso	10053,54	11,55
	No Aplicable	6054,33	6,95

A través de los tipos de suelo obtenidos en la subcuenca, se obtienen los distintos números de curva para el área de estudio los mismos que se muestran en la Figura 21.

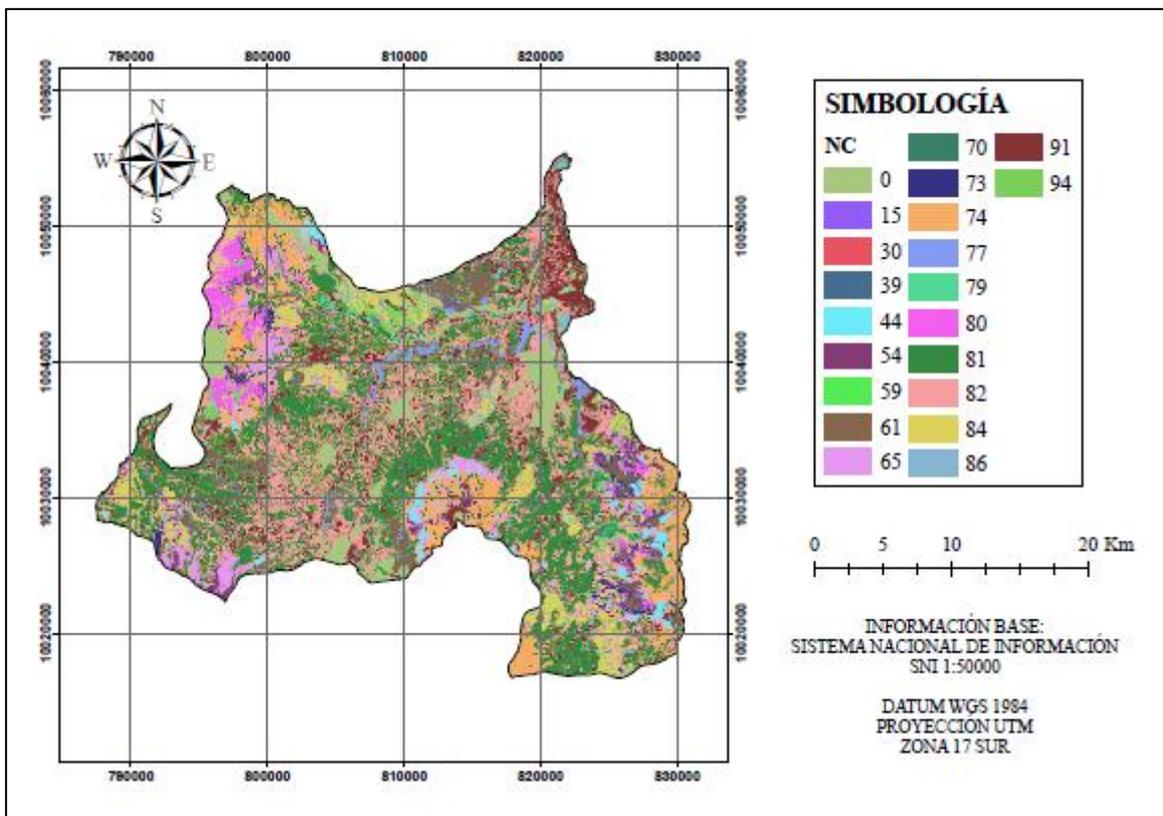


Figura 21. Mapa de número de curva de la subcuenca del río Ambi

El área y el porcentaje que representa cada número de curva en la subcuenca y su número de curva ponderado para cada periodo de tiempo se indican en la Tabla 24.

**Tabla 24***Números de curva parciales y número de curva ponderado todos los años de estudio*

NC	Área (ha)		
	2000	2008	2015
0	6306,92	6057,34	6055,64
15	228,23	358,34	286,85
30	240,16	312,08	505,85
39	3069,82	1240,52	1401,92
44	1958,95	2950,04	3016,35
54	2019,41	2875,47	2811,71
59	201,03	338,51	849,98
61	4295,32	5889,93	4962,38
65	4312,60	4531,24	6029,29
70	294,66	168,46	438,28
73	1326,53	1594,49	2034,37
74	23 731,41	14 402,12	14 584,68
77	249,01	496,82	865,29
79	635,73	546,50	532,29
80	5627,82	4144,41	3539,51
81	23 980,54	31 879,81	25 712,86
82	1533,58	2200,84	4941,14
84	3834,51	4957,43	4152,99
86	153,78	203,08	422,68
91	2677,51	1792,13	3282,59
94	390,21	127,69	640,61
<b>NCP</b>	<b>68,42</b>	<b>68,92</b>	<b>68,75</b>

NC: Número de curva; NCP: Número de curva ponderada

Los números de curva correspondientes a la subcuenca varían de un valor bajo a un valor alto dependiendo del tipo de suelo; es decir que los valores más bajos se presentan en suelos de tipo C y los valores más altos en suelos de tipo D. Los suelos de tipo C se caracterizan por estar cubiertos de cobertura vegetal o bosques, mientras que los del tipo D son suelos desnudos o sin vegetación (Díaz y Mercado, 2017).

La capacidad de escorrentía de la subcuenca depende mucho del tipo de suelo y la vegetación, ya que si existe una densidad alta, la infiltración será mayor y disminuirá la escorrentía (Lavao, 2014).

En el estudio realizado por Carrera, Sandoval, Andrade, Piedra y Sánchez (2017), al determinar el número de curva para la subcuenca del río Ambi, se observan valores altos en

la parte central de la subcuenca debido a que en ella se encuentran ubicados los cultivos agrícolas; por el contrario, se observan en la parte alta valores bajos porque existen bosques, cobertura herbácea y arbustiva. Estos resultados son similares a la de la presente investigación, aunque es importante mencionar que se obtuvo diferentes tipos de número de curvas de acuerdo al tipo de suelo encontrado en la subcuenca.

El número de curva ponderado muestra un valor bajo el cual favorece la infiltración de agua, lo que evita la pérdida de sedimentos, nutrientes, humedad y erosión del suelo.

#### 4.4.3 División de la subcuenca del río Ambi

La subcuenca del río Ambi se subdividió para facilitar el proceso de modelación del caudal en el programa HEC-HMS, la delimitación de las subcuenas se muestra en la Figura 22.

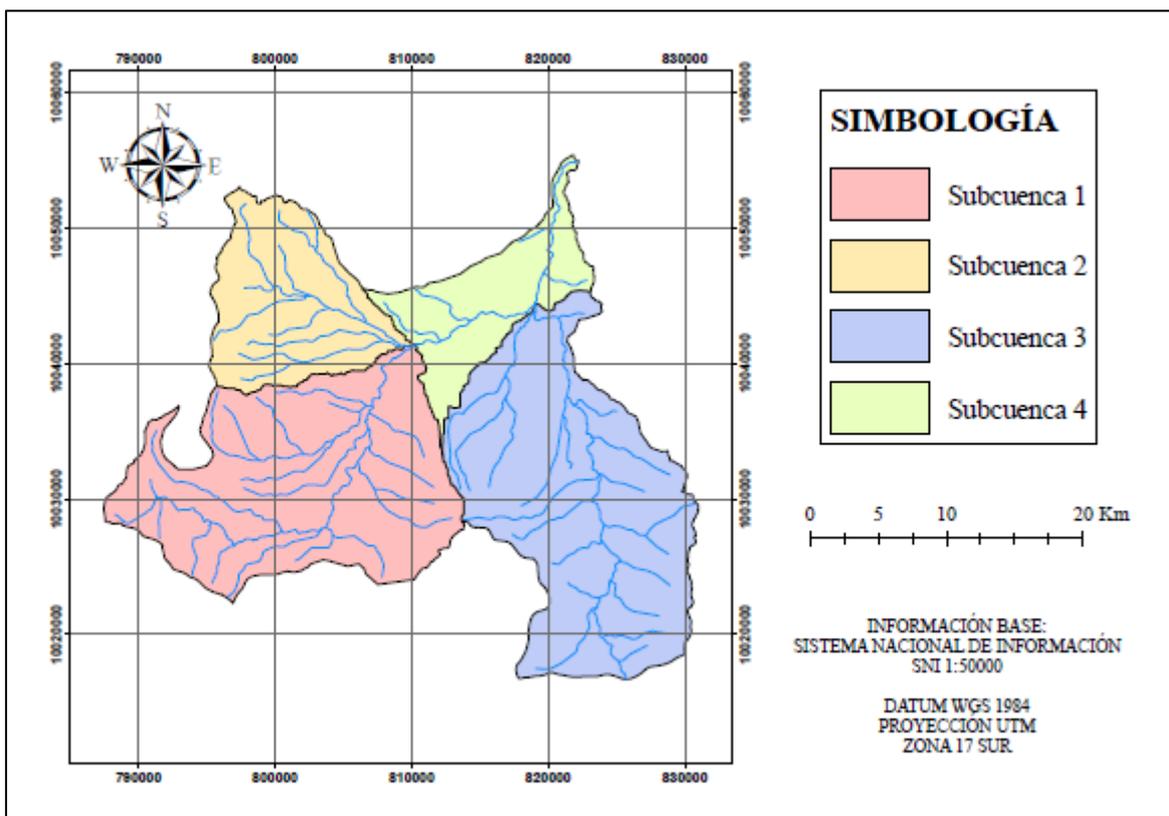


Figura 22. Mapa de subdivisiones de la subcuenca del río Ambi

El área y porcentaje de cada una de las subdivisiones se muestran en la Tabla 25.

**Tabla 25**

*Área y porcentaje de las subdivisiones*

Subcuencas	Área (ha)	Porcentaje (%)
Subcuenca 1	30593,80	35,15
Subcuenca 2	13804,85	15,86
Subcuenca 3	32341,00	37,16
Subcuenca 4	10292,54	11,83

#### 4.4.4 Modelamiento del caudal superficial con HEC-HMS

Para la simulación de la subcuenca del río Ambi se ingresó en el programa las subcuencas 1, 2, 3 y 4, los ríos y el punto de aforo. Estas especificaciones se indican en la Figura 23.

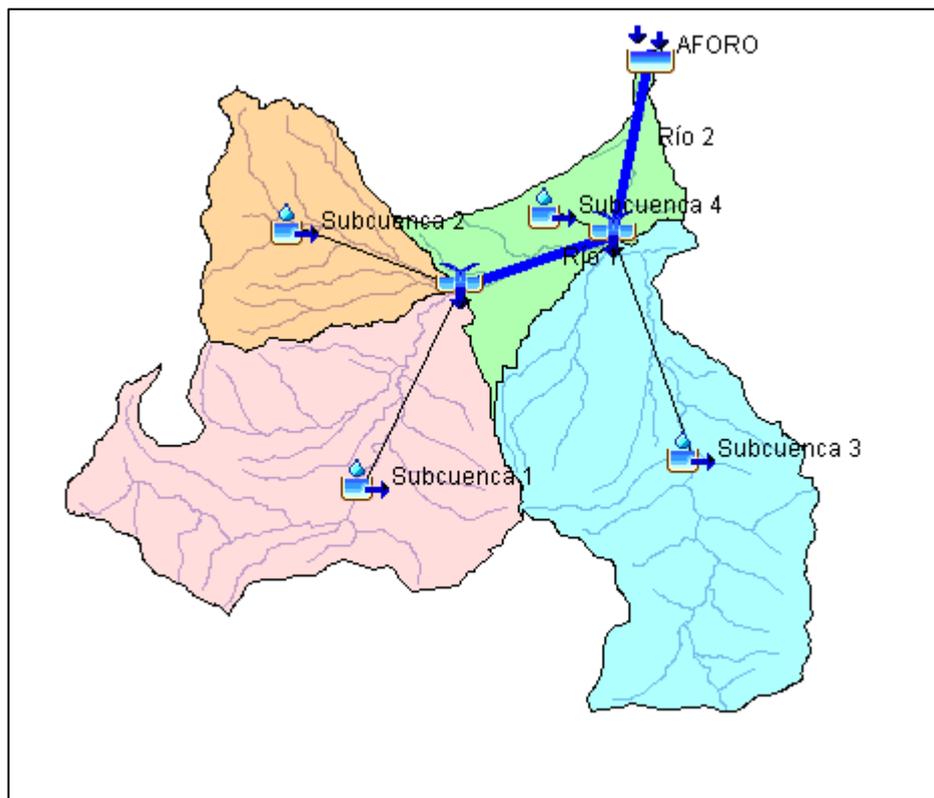


Figura 23. Modelo básico de la subcuenca del río Ambi

Fuente: HEC-HMS

Los datos de precipitación de las dos estaciones estuvieron registrados en intervalos de tiempo de 24 horas y los datos de entrada que se requirió para la simulación hídrica se presentan en la Tabla 26.

**Tabla 26***Datos del modelamiento hidrológico para cada subcuenca*

<b>Datos de entrada</b>	<b>Área (km<sup>2</sup>)</b>	<b>NC Ponderada</b>	<b>AI (mm)</b>	<b>IP (%)</b>	<b>TC (min)</b>	<b>TR (min)</b>
SB 1	305,94	68,42	23,45	6,39	2,81	168,40
SB 2	138,05	64,83	27,56	11,44	1,76	105,30
SB 3	323,41	70,28	21,48	5,29	3,33	199,70
SB 4	102,93	70,21	21,55	7,84	2,78	166,80

NC: Número de curva; AI: Abstracción inicial; IP: Impermeabilidad TC: Tiempo de concentración; TR: Tiempo de retardo.

Además de los datos mencionados se utilizó el método de recesión para el cual se requirió variables físicas, que están dentro del rango del modelo y que se optimizaron por el proceso de calibración.

#### **4.4.4.1 Calibración de los datos del modelo hidrológico**

Los parámetros número de curva, pérdida inicial e impermeabilidad no tuvieron cambios mediante la optimización, mientras que los parámetros de recesión si fueron optimizados por el programa; a continuación, se muestran en la Tabla 27 los nuevos valores de los parámetros. Así mismo, el método para el tiempo de retardo fue cambiado de *Standard (PRF 484)* a *Peak Rate Factor 100* lo que permitió un mejor ajuste en la simulación.

**Tabla 27***Valores optimizados de los parámetros del método de recesión*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor inicial</b>	<b>Valor Optimizado</b>
Descarga inicial (m <sup>3</sup> /s)	2,00	2,14
Constante de recesión	0,20	0,26
Radio	1,00	0,99

**Fuente:** HEC-HMS, 2019

Con los nuevos valores se realizó una nueva corrida para la simulación, donde se obtuvo el hidrograma de la prueba de calibración que se presenta en la Figura 24.

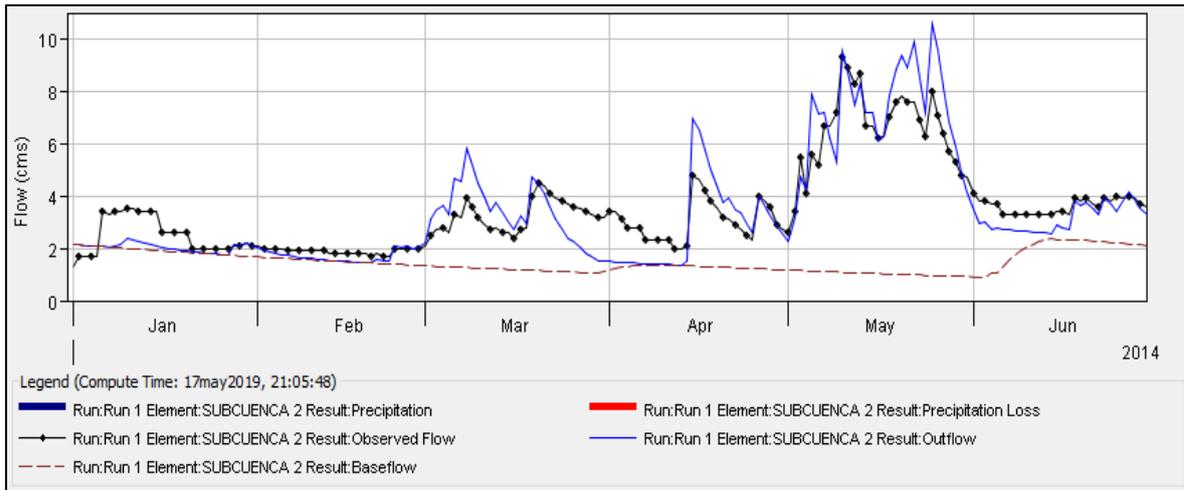


Figura 24. Hidrograma de la prueba de calibración  
Fuente: HEC-HMS, 2019

En el hidrograma se puede observar que el caudal simulado es similar al caudal observado, pero para su verificación se procedió a realizar un análisis de correlación, en el cual se aplicó el coeficiente de determinación  $R^2$  el mismo que muestra en la Figura 25.

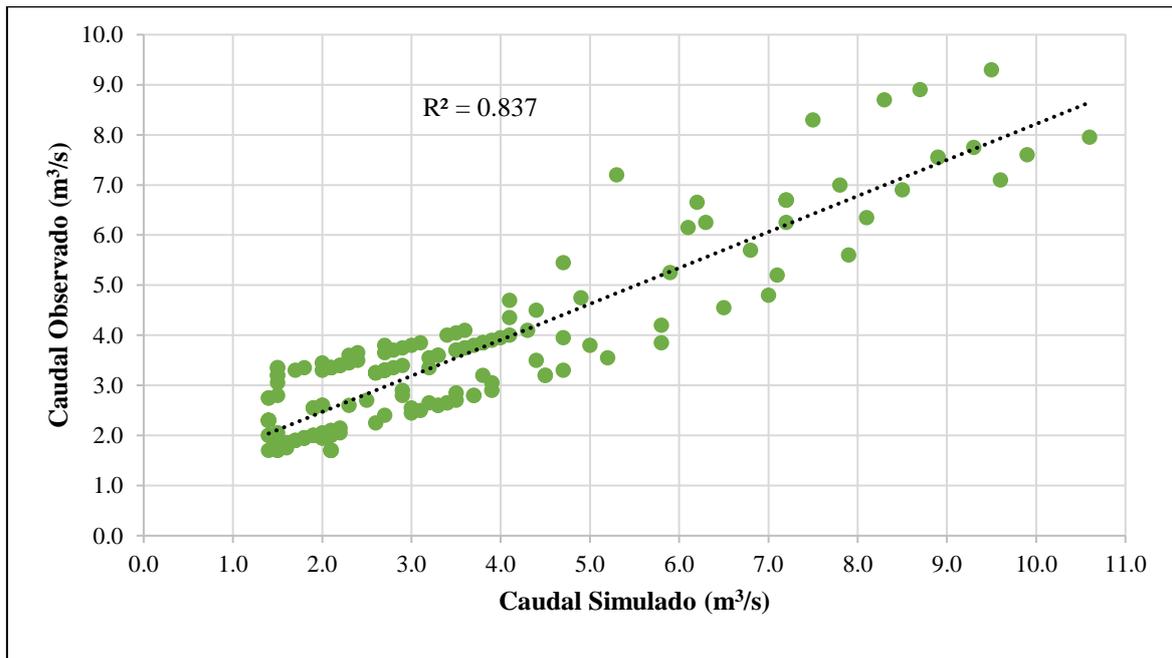


Figura 25. Diagrama de dispersión entre caudales simulados y observados calibrados

De acuerdo con los resultados del diagrama de dispersión se tuvo un valor de 0,91 para el coeficiente de correlación, el mismo que indica que existe una alta relación entre los valores calculados y los observados ya que su valor es altamente significativo comparado con sus tabulares al 95 y 99 % de probabilidad estadística.

A continuación se muestra en la Figura 26 un cuadro de resumen de la prueba de calibración efectuada en el HEC-HMS.

Computed Results			
Peak Discharge:	10,6 (M3/S)	Date/Time of Peak Discharge:	25may2014, 00:00
Precipitation Volume:	352,90 (MM)	Direct Runoff Volume:	216,00 (MM)
Loss Volume:	133,72 (MM)	Baseflow Volume:	165,93 (MM)
Excess Volume:	219,18 (MM)	Discharge Volume:	381,93 (MM)
Observed Hydrograph at Gage CAUDAL			
Peak Discharge:	9,3 (M3/S)	Date/Time of Peak Discharge:	10may2014, 00:00
Mean Abs Error:	0,7 (M3/S)	RMS Error:	0,9 (M3/S)
Volume:	393,13 (MM)	Volume Residual:	-11,20 (MM)
Nash-Sutcliffe:	0,704		

Figura 26. Resumen de la calibración

Fuente: HEC-HMS, 2019

En el estudio de Cabrera (2017), que evalúa el modelo HEC-HMS para una simulación de una cuenca de páramo, se puede observar que todos los parámetros del programa fueron calibrados ya que se utilizaron los que vienen por defecto. En este estudio se utilizó el método de recesión, para lo cual se ingresó datos de descarga obtenidos del registro EMAPA y se calibro solo dos variables.

Los valores calibrados del estudio mencionado dan un valor de 0,65 al coeficiente Nash-Sufcliffe, lo que indica que el ajuste entre sus caudales es muy bueno. Para la presente investigación el coeficiente tiene un valor de 0,70, lo que indica que el ajuste también es muy bueno. Lo mencionado muestra que los valores de caudal simulado y observado tienen una relación aceptable, lo que permite realizar pruebas de validación y simulaciones para periodos de tiempo diferentes.

#### 4.4.4.2 Validación de los datos

Con los valores de caudal observado se realizó una nueva simulación, donde se obtuvo el hidrograma de la prueba de validación que se presenta en la Figura 27.

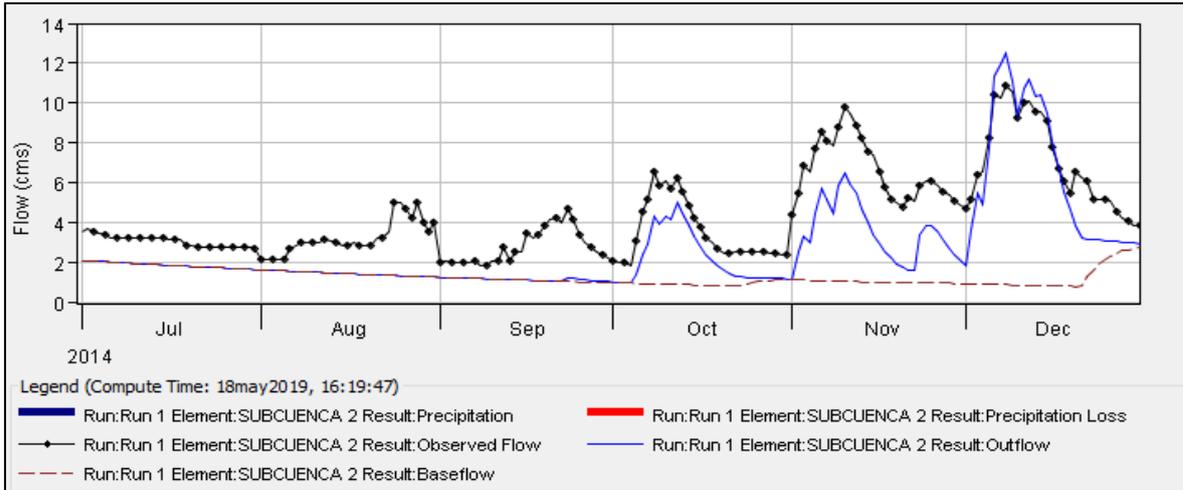


Figura 27. Hidrograma de la prueba de validación

Fuente: HEC-HMS, 2019

Una vez obtenido el hidrograma se aplicó el criterio Nash-Sutcliffe, el cual dio un valor de 0,54, el mismo que indica que el ajuste de los datos es bueno de acuerdo a los valores propuestos por Molnar (2011). Para indicar la eficiencia de la validación se realizó un diagrama de dispersión, el mismo que se muestra en la Figura 28.

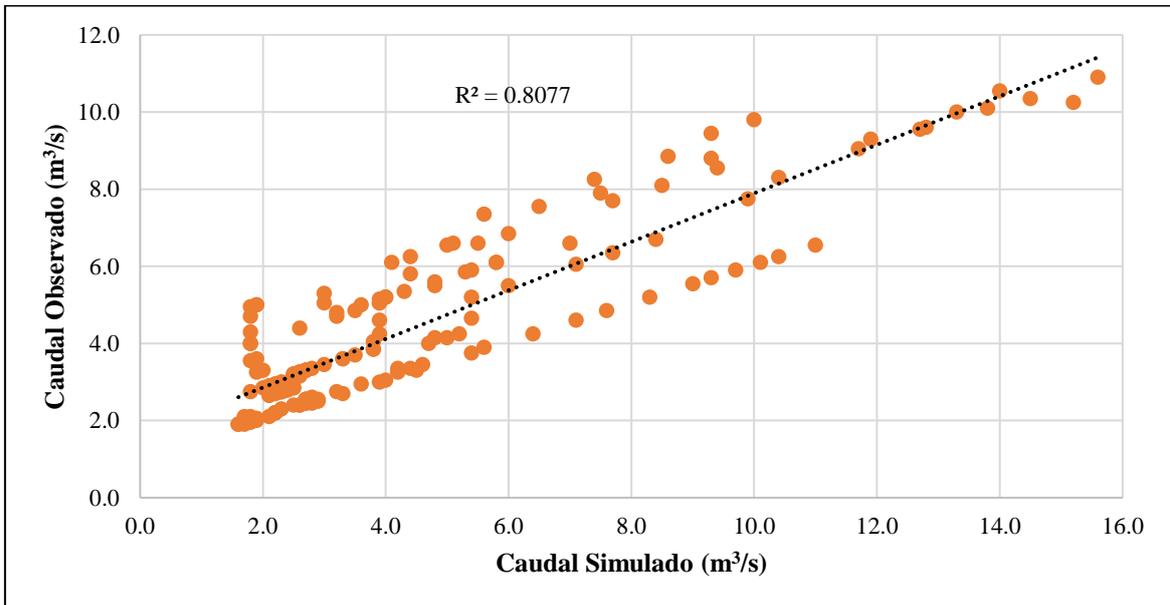


Figura 28. Diagrama de dispersión entre caudales simulados y observados validados

La correlación entre los datos es de 0,89, lo que indica que los datos simulados tienen un ajuste significativo al caudal observado.

En la Figura 29 se muestra un cuadro de resumen de la prueba de validación efectuada en el HEC-HMS.

Computed Results			
Peak Discharge:	15,1 (M3/S)	Date/Time of Peak Discharge:	08dic2014, 00:00
Precipitation Volume:	507,40 (MM)	Direct Runoff Volume:	360,71 (MM)
Loss Volume:	146,30 (MM)	Baseflow Volume:	299,88 (MM)
Excess Volume:	361,10 (MM)	Discharge Volume:	660,59 (MM)
Observed Hydrograph at Gage CAUDAL			
Peak Discharge:	10,9 (M3/S)	Date/Time of Peak Discharge:	08dic2014, 00:00
Mean Abs Error:	1,1 (M3/S)	RMS Error:	1,4 (M3/S)
Volume:	754,01 (MM)	Volume Residual:	-93,41 (MM)
Nash-Sutcliffe:	0,542		

Figura 29: Resumen de la validación

Fuente: HEC-HMS, 2019

En la investigación de Tapia (2012), la cual modeliza un área experimental de la cuenca del río Guayas, los valores de validación son aceptables debido a que su calibración estuvo correcta; es así que se tiene un valor del coeficiente de Nash-Sutcliffe de 0,64. Esto indica que el ajuste entre sus caudales es muy bueno; para el caso de la presente investigación el coeficiente es menor con un valor de 0,54 por lo que el ajuste es bueno.

Los valores del coeficiente son diferentes en las dos investigaciones debido a la precisión de las estaciones de las que se obtuvo los caudales observados. En el caso de la subcuenca del Ambi, los datos observados mostraron algunas inconsistencias, mismas que fueron solventadas con el ingreso de datos de descargas y con la optimización del aporte de agua subterráneas por el método *gridded soil moisture accounting*. Pese a esto los datos observados siguieron mostrando inconsistencias como la falta de respuesta a precipitaciones de gran magnitud y crecidas atípicas en periodos sin precipitación.

Por otro lado, el ajuste es aceptable por lo que los valores de calibración son correctos y estos mismos pueden ser aplicados para cualquier periodo de tiempo en el modelo. Por lo tanto se puede proceder a realizar la simulación de toda la subcuenca del río Ambi y las microcuencas que la forman, como es el caso de la del río Chorlaví.

#### 4.4.4.2.1 Simulación total de la Subcuenca del río Ambi

Finalmente se realizó una simulación completa de la subcuenca del río Ambi en el año 2015 para la cual se requirieron los datos de entrada mencionados en la Tabla 19. El hidrograma obtenido se muestra en la Figura 30.

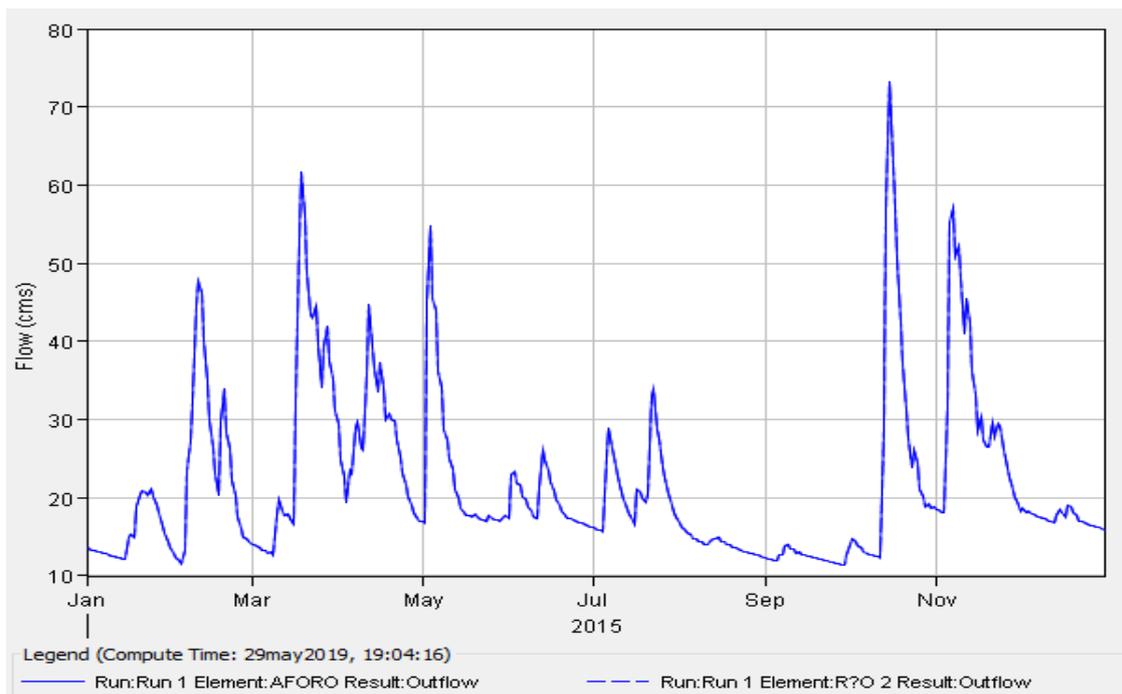


Figura 30. Hidrograma de la subcuenca del río Ambi.

Fuente: HEC-HMS, 2019

El hidrograma muestra que la crecida más alta sucedió el 15 de octubre del 2015. Como la simulación se realizó a través cuatro subcuencas, se obtuvo datos de caudal pico diferentes para cada una de ellas, dichos valores se indican en la Tabla 28.

**Tabla 28**

*Resultado de la simulación para la subcuenca del río Ambi*

Subcuencas	Área de descarga (km <sup>2</sup> )	Pico de descarga (m <sup>3</sup> /s)	Día del pico de descarga	Volumen (mm)
SB 1	305,94	22,70	10 de febrero	714,17
SB 2	138,05	9,70	10 de febrero	689,97
SB 3	323,41	35,10	15 de octubre	929,07
SB 4	102,93	8,10	10 de febrero	738,86
Aforo	870,33	63,10	15 de octubre	793,10

Fuente: HEC-HMS, 2019

De acuerdo a los resultados obtenidos en la simulación, la subcuenca 3 es la que posee la descarga máxima en el caudal y de igual manera aporta con el mayor volumen que va al punto de aforo. Esto se debe a que el área total de la subcuenca 3 es mayor, por lo tanto, posee más afluentes que captan un mayor volumen de agua.

En el estudio de Carrera *et al.*, (2017), al realizar el cálculo de caudales de la subcuenca del río Ambi con el programa HEC-HMS presenta valores de caudal total similares al presente estudio, los mismos que van desde los 389,7 mm hasta los 950 mm.

#### 4.4.5 Determinación de la relación caudal-vegetación boscosa

##### 4.4.5.1 Simulación de la microcuenca del río Chorlaví

La simulación de la microcuenca del río Chorlaví se realizó con los datos de entrada de los años 2000, 2008 y 2015 expuestos en la Tabla 29, y los datos de precipitación de la estación meteorológica M1240 para el año 2015.

**Tabla 29**

*Datos del modelamiento hidrológico para la microcuenca*

<b>Datos</b>	<b>NC</b> <b>Ponderada</b>	<b>AI</b> <b>(mm)</b>	<b>IP</b> <b>(%)</b>	<b>Área</b> <b>(km<sup>2</sup>)</b>	<b>TC</b> <b>(min)</b>	<b>TR</b> <b>(min)</b>	<b>DI</b> <b>(m<sup>3</sup>/s)</b>
2000	72,46	19,30	1,63				
2008	75,04	16,90	1,61	65,98	102,00	61,20	1,02
2015	74,27	17,60	1,61				

NC: Número de curva; AI: Abstracción inicial; IP: Impermeabilidad TC: Tiempo de concentración; TR: Tiempo de retardo; DI: Descarga inicial

Se realizaron las simulaciones con los datos mencionados y se obtuvo el gráfico del modelamiento del cual, el mismo que se muestra en la Figura 31.

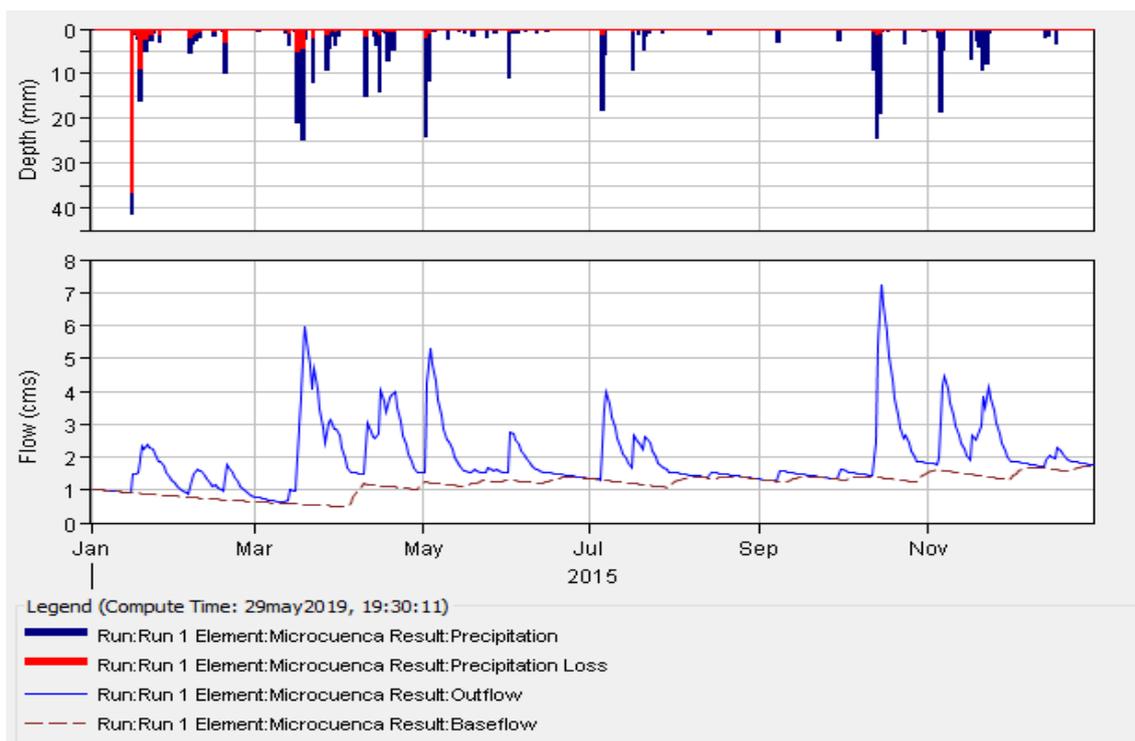


Figura 31. Resumen de la simulación de la microcuenca del río Chorlaví para el año 2015.

Fuente: HEC-HMS, 2019

En la figura se puede observar la precipitación captada, la precipitación perdida, el hidrograma del comportamiento del caudal y el caudal base. Los valores máximos de la simulación se presentan en la Tabla 30.

**Tabla 30**

*Valores máximos de las simulaciones de la microcuenca*

Año	Máxima Pp (mm)	Máxima Pp perdida (mm)	Máxima Pp captada (mm)	Caudal total (m <sup>3</sup> /s)
2000		36,61	23,45	7,20
2008	41,3	35,81	23,58	7,30
2015		35,48	23,67	7,40

Pp: Precipitación.

Fuente: HEC-HMS, 2019

La máxima precipitación fue registrada el 16 de enero en todas las simulaciones ya que los datos de precipitación utilizados correspondían a un solo año. De la misma manera la mayor pérdida de lluvia se presentó en este mismo día, pero fue mayor en el año 2000.

La máxima captación de precipitación se registró el 14 de octubre, con un valor mayor en el año 2015. El máximo flujo directo del caudal fue de 5,9 m<sup>3</sup>/s para todas las simulaciones, y al tomar en cuenta un caudal base, el pico de descarga se registró el 15 de octubre con un valor mayor en el año 2015.

En el estudio de Vera (2019), el mismo que realiza el modelamiento hidrológico de la microcuenca del río Yanayacu, para los años 1991, 2008 y 2015. Al realizar las simulaciones, la pérdida de agua lluvia, la captación de precipitación y el caudal pico tuvieron mayores valores en el año 2015 al igual que en la presente investigación.

Los valores de las simulaciones son diferentes en los dos estudios a pesar de que tienen cierta relación, debido que las precipitaciones son mayores en la microcuenca del río Yanayacu y aún existen áreas cubiertas por vegetación arbustiva, herbácea y bosques.

Mediante las simulaciones se obtuvo los valores totales para los diferentes años, estos se muestran en la Tabla 31.

**Tabla 31**

*Valores totales de las simulaciones de la microcuenca*

<b>Año</b>	<b>V de precipitación (mm)</b>	<b>Pp pérdida (mm)</b>	<b>V de Pp captada (mm)</b>	<b>Caudal base (mm)</b>	<b>V de descarga total (mm)</b>
2000		97,62	386,58	557,84	944,20
2008	484,20	91,10	393,10	568,93	961,81
2015		86,97	397,23	576,2	973,22

V: Volumen; Pp: Precipitación.

**Fuente:** HEC-HMS, 2019

La pérdida de precipitación ocurre mayormente en el año 2000, esto debido a que existen áreas cubiertas por vegetación natural. La disminución de la cobertura forestal hizo que el agua de lluvia no sea interceptada, por lo tanto, para los años 2008 y 2015 se evidencian menores pérdidas de precipitación que favorecen al volumen total de descarga.

El volumen total de descarga aumenta 17,61 mm en los primeros ocho años y 11,41 mm en los siguientes siete años. La variación de la cobertura forestal al influenciar directamente la pérdida de precipitación permite que el caudal de la microcuenca aumente.

En la investigación de Vera (2019) el volumen de precipitación total aumenta por la disminución de la cobertura forestal y el aumento de las precipitaciones anuales. En el presente estudio el volumen de precipitación no presentó variaciones debido a que se tomó en cuenta solo un año de precipitación. Pero se observan diferencias en la producción de agua total, por tal motivo se deduce que la disminución de cobertura boscosa influyó en las descargas de agua de las microcuencas.

#### 4.4.5.3 Comparación de caudales simulados

Después de terminar con las simulaciones se realizó una comparación de los caudales mensuales mediante una prueba de t de student. Estos valores se muestran en la Tabla 32.

**Tabla 32**

*Caudales promedios de la microcuenca del río Chorlaví*

Mes/Año	Caudal (m <sup>3</sup> /s)		
	2000	2008	2015
Enero	1,40	1,45	1,47
Febrero	1,22	1,24	1,26
Marzo	2,21	2,26	2,29
Abril	2,49	2,54	2,57
Mayo	2,23	2,29	2,31
Junio	1,70	1,75	1,77
Julio	2,18	2,22	2,25
agosto	1,44	1,47	1,50
septiembre	1,42	1,45	1,47
octubre	2,71	2,75	2,79
noviembre	2,81	2,83	2,86
diciembre	1,87	1,89	1,89

**Fuente:** INAMHI, 2018

Como se puede observar existe cierta similitud entre caudales mensuales en todos los años; a excepción del mes de julio que presenta un valor de caudal alto a pesar de ser un mes seco. Esto se debe a la precipitación del año 2015, que presentó lluvias en este mes.

Previamente a la comprobación, se realizó la prueba de normalidad para conocer si los datos se encuentran en una distribución normal y la prueba de homocedasticidad para determinar la igualdad entre medias. Los resultados de las pruebas se indican en la Tabla 33 y Tabla 34.

**Tabla 33***Resultados de la prueba de normalidad*

Caudales	Shapiro-Wilks	
	W* calculado	P valor
2000	0,90	0,2643
2008	0,90	0,2467
2015	0,89	0,2330

**Fuente:** Infostad, 2019

De acuerdo a los resultados, la prueba de Shapiro-Wilks indica que la distribución de los datos es normal para cada año de estudio ya que su valor p es mayor a 0,05.

**Tabla 34***Resultados de la prueba de igualdad de medias*

Caudales	F calculado	Fisher	P valor
2000-2008	0,99		0,9864
2008-2015	0,98		0,9797
2000-2015	0,97		0,9661

**Fuente:** Infostad, 2019

Los resultados de la prueba de Fisher muestran que las medias correspondientes a los años de estudio son homogéneas ya que su valor p es mayor a su correspondiente tabular del 0,05.

Comprobado que los datos tienen una distribución normal y sus medias son homogéneas se procedió a realizar la comparación mediante la prueba de t student para los diferentes caudales. Estos resultados se muestran en la Tabla 35.

**Tabla 35***Resultados de la prueba T student*

Caudales	T student	
	T calculada	P valor
2000-2008	9,46	0,0001
2008-2015	8,40	0,0001
2000-2015	11,32	0,0001

**Fuente:** Infostad, 2019

Al realizar la prueba de t de student pareada se obtuvo valores menores a 0,05, por tal razón existen diferencias significativas entre los caudales simulados.

Se deduce que los valores de número de curva influyen en la producción de caudal en la microcuenca del río Chorlaví. Como se puede apreciar en la Tabla 31 el volumen de descarga disminuyó en el año con mayor cobertura forestal y aumentó en el año con menor cobertura forestal. Cabe mencionar que si bien el caudal aumento, esta agua no es útil para la microcuenca al salir de esta.

Esto se debe al proceso de escorrentía superficial, el mismo que hace que el agua fluya sobre el suelo, sin dar paso a la infiltración. En el estudio realizado por Henríquez, Azócar, y Aguayo (2006), al desarrollar un modelo de simulación espacial del cambio de uso del suelo se observa que, al eliminar la cobertura vegetal por la aceleración del crecimiento demográfico, la escorrentía superficial aumentó y produjo inundaciones en la ciudad.

De igual manera en la investigación de Cano, Andreoli, Arumi, y Rivera (2014), se evidencia que el cambio de uso de suelo tiene un gran impacto en la generación de escorrentía superficial, ya que en zonas cubiertas por bosques o plantaciones forestales la escorrentía disminuye. Esto debido a la capacidad de intercepción de la vegetación lo que provoca una mejor capacidad de infiltración de los suelos.

En el estudio de Pérez, Cataldo, Zema, de Vente y Boix (2018), se observa que la disminución de caudal genera una disminución de la escorrentía superficial, lo que produce que el agua que llega a la cuenca sea aprovechada. Por otro lado en el presente estudio al tener un aumento en los caudales por la disminución de la cobertura boscosa, el proceso de escorrentía aumenta, lo que provoca que el agua de las precipitaciones se escurra y no pueda ser utilizada por la microcuenca.

#### **4.4.6 Simulación de posibles crecidas mediante HEC-RAS**

Se realizó las simulaciones de crecidas para comparar el área de afectación entre un año donde existía cobertura forestal y otro en la que disminuyó. Para ello se tomó en cuenta el caudal máximo de los años 2000 y 2015 que se expresan en la Tabla 30.

También se calculó los caudales máximos para diferentes periodos de retorno, los mismos que se muestran en la Tabla 36.

**Tabla 36**

*Caudales máximos para los distintos tiempos de retorno*

Periodo de retorno (años)	Caudal (m <sup>3</sup> /s)
5	13,65
25	23,06
50	26,97
100	30,84

Con estos valores y la geometría del río principal se procedió a realizar las simulaciones, donde se obtuvo la Figura 32 que muestra la comparación de las posibles crecidas entre años.

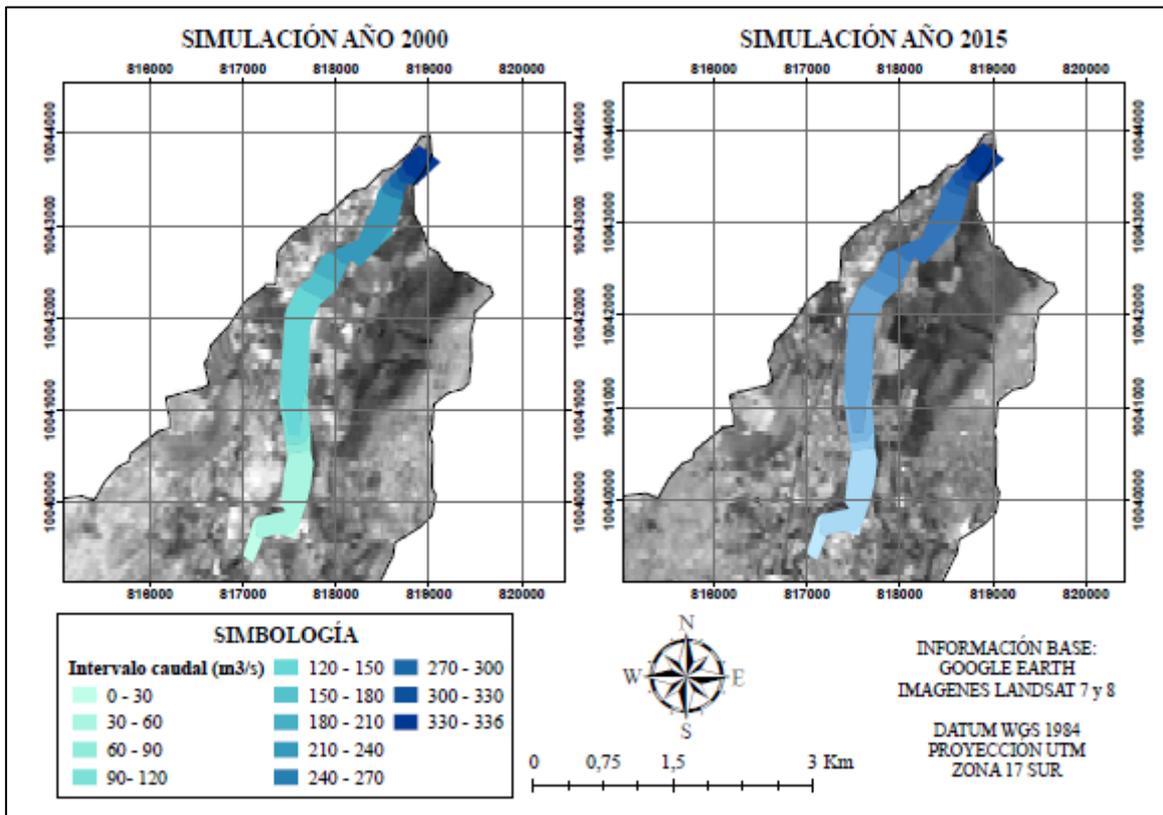


Figura 32. Mapa de comparación de inundaciones en la microcuenca del río Chorlaví.

El área afectada en cada año se muestra en la Tabla 37.

**Tabla 37***Afectación por inundación en la microcuenca*

<b>Año</b>	<b>Área (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Área de afectación (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Porcentaje de afectación (%)</b>
2000	288,40	1,35	9,55
2015		1,37	9,65

Los resultados muestran que la superficie cubierta por agua en la microcuenca es casi similar en los años comparados a pesar de que existió una disminución de la cobertura forestal. Esto se debe a que la topografía y la geometría del río no variaron en estos años lo que incidió en que el agua no inunde gran cantidad de espacio. Por otro lado, al aumentar el caudal como se observa en las simulaciones de la Tabla 31 la microcuenca es propensa a inundaciones en periodos de precipitaciones altas.

A continuación, en la Tabla 38 se muestra la afectación que tienen las parroquias en la que se encuentra ubicada la microcuenca.

**Tabla 38***Afectación en las parroquias por inundación*

<b>Parroquia</b>	<b>Área (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Área de afectación (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Porcentaje de afectación (%)</b>
Imbaya	12,294	1,059	8,618
San Antonio	29,468	0,302	1,026
Ibarra	246,641	0,008	0,003

La parroquia Imbaya sufriría graves daños en caso de una inundación ya que como se puede observar su porcentaje de afectación es alto con respecto a las otras parroquias. El área de afectación corresponde a una zona de infraestructura urbana que se encuentra muy cercana al cauce del río Chorlaví como se puede observar en la Figura 32, esto podría ocasionar grandes dificultades para los pobladores del lugar.

De igual manera se realizó el cálculo de los posibles caudales simulados en los diferentes periodos de retorno los mismos que se presentan en la Tabla 39.

**Tabla 39***Caudales simulados para los periodos de retorno*

<b>Periodo de retorno (años)</b>	<b>Caudal en la parte alta (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Caudal en la parte baja (m<sup>3</sup>/s)</b>
5	0,10	336,62
25	0,09	336,91
50	0,08	337,00
100	0,02	337,09

La diferencia de crecidas para cada periodo no es muy significativa, sin embargo, se puede apreciar que en 100 años la microcuenca puede reducir su caudal en la parte alta y aumentar su caudal en la parte baja. Este caudal sería mayor a 300 m<sup>3</sup>/s y podría ocasionar inundaciones donde se acentúa la población urbana. Esto se puede observar en la Figura 31, donde la parte baja de la microcuenca es la que tiende a sufrir más daños, debido a que las zonas urbanas y los cultivos agrícolas se encuentran cercanos al río Chorlaví.

De acuerdo al estudio de Vidal y Romero (2010), las alteraciones antrópicas ocasionaron una disminución en la longitud, densidad y sinuosidad de los cauces naturales de los ríos Bío Bío y Andalién, además de una obstrucción en la red de drenaje debido al arrastre de sedimentos, que a su vez provocó desbordes con grandes riesgos de inundación.

En la investigación de Romero y Vásquez (2005), la expansión de la urbanización en una cuenca de montaña incidió en la degradación de los servicios ambientales, lo que provocó que la ciudad quede gravemente afectada por contaminación atmosférica e hídrica. Las fuertes inundaciones afectaron principalmente a los cultivos agrícolas y asentamientos humanos debido a que se encontraban en zonas inundables.

En el estudio de Rojas, Mardones, Arumí y Aguayo (2014), los impactos que traen consigo las inundaciones son fundamentalmente la erosión de los suelos y el transporte de sedimentos. Cuando ocurre una fuerte precipitación acompañada de una escorrentía superficial alta, los suelos se degradan y pierden nutrientes por el arrastre de sólidos, estos a su vez se acumulan en el fondo de los cauces y provocan crecidas de gran magnitud. Después de una inundación las principales consecuencias para una población son las pérdidas de vidas humanas, los daños en las viviendas y la pérdida de cultivos, que generan un impacto negativo en su economía.

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 Conclusiones

Las características morfométricas de la microcuenca especialmente los parámetros de relieve la enmarcan en un estado de vejez geológica, por lo que presenta susceptibilidad a crecidas de mediana magnitud y procesos de sedimentación. Esta respuesta hidrológica se debe también a la forma alargada de la microcuenca y a su moderada densidad de drenaje.

Existió un cambio representativo en las coberturas forestales de la microcuenca en cada periodo analizado. Bosques, vegetación arbustiva y herbácea fueron las coberturas de mayor afectación en función del crecimiento del área urbana y los cultivos. La tendencia de crecimiento de las superficies cubiertas por actividades antrópicas fue mayor en el periodo 2000 – 2008, lo que concuerda con varios estudios realizados en la provincia.

La disminución de la cobertura forestal incidió en la respuesta hidrológica de la microcuenca, lo que se manifestó con incrementos de la escorrentía superficial. Pese a su superficie, el incremento del caudal directo ratifica la importancia de la cobertura forestal en el balance hidrológico de la microcuenca.

## **5.2 Recomendaciones**

Se recomienda realizar un nuevo estudio completo de los impactos que ocasiona la escorrentía superficial en la microcuenca y su tendencia a inundaciones.

De igual manera se sugiere realizar una propuesta de manejo para la microcuenca del río Chorlaví con la finalidad de proteger el agua para futuras generaciones.

Se pide fomentar la agroforestería en zonas afectadas por el cambio de uso de suelo, con el fin de mejorar las condiciones de las riberas de los ríos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguirre, C., y Vizcaíno, M. (2010). Aplicación de estimadores estadísticos y diseños experimentales en investigaciones forestales. *Editorial universitaria-Ibarra*.
- Aguirre, N. (2007). Manual para el manejo sustentable de cuencas hidrográficas. *Universidad Nacional de Loja*.
- Alzate, G., y Sánchez, D. (2018). Análisis multitemporal por teledetección del cambio de coberturas en las veredas Pantanillo y Las Palmas del municipio de Envigado en el periodo comprendido entre los años 1997 y 2016.
- Anaya, O. (2012). Caracterización morfométrica de la cuenca hidrográfica Chinchao, distrito de Chinchao, provincia Huánuco, región Huánuco. *Tingo María: Universidad Nacional Agraria de la Selva*.
- Andrade, A., y Benavides, E. (2010). Propuesta de plan de manejo de los Manantiales ubicados en las quebradas Tumbibitze y Seca (Cantón Antonio Ante).
- Arango, M., Branch, J., y Fernández, V. (2005). Clasificación no supervisada de coberturas Vegetales sobre imágenes digitales de sensores Remotos:“landsat-etm+”. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 58(1), 2611-2634.
- Araya, E. (2009). Manual de procesos en fotografías aéreas e Imágenes de satélite. *San José, Costa Rica: Proyecto Microcuenca Plantón-Pacayas*.
- Arias, P. (2015). Guía de Aplicaciones del HEC-HMS en cuencas cubanas. Ejemplos prácticos. *Trabajo de Diploma presentado en opción al título de Ingeniero Hidráulico, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría*.
- Ariza, A. (2013). Descripción y Corrección de Productos Landsat 8 LDCM (Landsat Data Continuity Mission). *Bogotá: Instituto Geográfico Agustín Codazzi*.
- Asamblea Nacional del Ecuador. (2008). Constitución de la República del Ecuador.
- Asamblea Nacional del Ecuador. (2014). Ley Orgánica de recursos hídricos, usos y aprovechamiento del agua. In: Ecuador-Quito.
- Asociación de Colaboración en materia de Bosques. (2012). El MFS y las múltiples funciones de los bosques. In.
- Bastidas, C. (2005). Manual para el uso del modelo hidrológico HEC-HMS. *Universidad Central de Venezuela, Caracas (Venezuela)*.

- Belmonte, F., y Romero, A. (2006). Medida de la evaporación real en coberturas vegetales semiáridas (Cuenca de Mula, Murcia), según las variaciones de humedad del suelo medidas mediante el procedimiento (TDR). *Papeles de geografía*(43), 5-17.
- Beltrán, G. (2010). Apuntes Cuencas Hidrográficas SIG. *Universidad Técnica del Norte. Ibarra Ecuador.*
- Bermúdez, E. (2016). Análisis multitemporal en la cobertura boscosa de la zona norte del departamento del Chocó 1990-2014.
- Bernal, S., y Prado, C. (2015). Análisis de la influencia de la cobertura vegetal en la generación de caudales de la cuenca de la quebrada Granadillo en los años 1993 y 2009 a partir de aerofotografías y cartografía del Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
- Blanco, J., Taborda, A., Amortegui, V., Arroyave, A., Sandoval, A., Estrada, E., . . . Vivas, A. (2013). Deforestación y sedimentación en los manglares del Golfo de Urabá. Síntesis de los impactos sobre la fauna macrobéntica e íctica en el delta del río Turbo.
- Buytaert, W., Celleri, R., Willems, P., De Bievre, B., y Wyseure, G. (2006). Spatial and temporal rainfall variability in mountainous areas: A case study from the south Ecuadorian Andes. *Journal of hydrology*, 329(3-4), 413-421.
- Cabrera, J. (2011). Modelos hidrológicos. In: Lima: UNI.
- Cabrera, J. (2017). Evaluación del modelo HEC-HMS para la simulación hidrológica de una cuenca de páramo.
- Cano, C., Andreoli, A., Arumi, J., y Rivera, D. (2014). Uso de imágenes de satélite para evaluar los efectos de cambio de cobertura de suelo en la escorrentía directa de una cuenca andina. *Tecnología y ciencias del agua*, 5(4), 145-151.
- Cantú, I., y González, H. (2005). Pérdidas por intercepción de la lluvia en tres especies de matorral submontano. *Ciencia Uanl*, 8(1).
- Cardona, B. L. (2013). Conceptos Básicos de Morfometría de Cuencas Hidrográficas. *Recuperado de: <http://www.repositorio.usac.edu>.*
- Carrera, D., Sandoval, W., Andrade, V., Piedra, P., y Sánchez, V. (2017). Cálculo de caudales hidrológicos de la subcuenca de río Ambi utilizando el programa HEC-HMS para la comprobación de su aplicabilidad en el Ecuador.
- Ceballos, A., Schnabel, S., Gómez, D., y Cerdá, A. (1998). Relación entre la escala espacial y escorrentía superficial en una pequeña cuenca hidrográfica semiárida ante condiciones contrastadas de humedad del suelo (Extremadura, suroeste de España).

- Cohen, J. (1968). Weighted kappa: Nominal scale agreement provision for scaled disagreement or partial credit. *Psychological bulletin*, 70(4), 213.
- Condori, I., Loza, M., Mamani, F., y Solíz, H. (2018). Análisis multitemporal de la cobertura boscosa empleando la metodología de teledetección espacial y SIG en la sub-cuenca del río Coroico-provincia Caranavi en los años 1989-2014. *Journal of the Selva Andina Research Society*, 9(1), 25-44.
- Cordón , U., Johnson, W., y Cordón , E. (2008). Diagnóstico biofísico y socioeconómico de la cuenca Bilwi Tingni, Puerto Cabeza, RAAN. *Ciencia e interculturalidad*, 2(2), 28-43.
- Cuasapud, N. (2017). Manejo y protección de fuentes de agua para consumo humano en la microcuenca del Tahuando, en el cantón Ibarra, provincia de Imbabura.
- Cure, L. (2012). Determinación de la influencia del cambio de uso de suelo en la calidad ambiental de la cuenca de río Déleg.
- Díaz, Á., y Mercado, T. (2017). Determinación del número de curva en la subcuenca de Betancí (Córdoba, Colombia) mediante teledetección y SIG. *Ingeniería y Desarrollo*, 35(2), 452-470.
- Esper, M., y Perucca, L. (2014). Caracterización morfométrica de la Cuenca del río Seco a propósito de las fuertes precipitaciones de enero de 2013, Departamento Sarmiento, San Juan, Argentina. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 66(2), 235-245.
- Espinosa, Y. (2017). Análisis de vulnerabilidad social por amenaza de flujos de lodo en la parroquia de San Antonio de Ibarra año 2016.
- Estrada, V., y Pacheco, R. (2012). Modelación hidrológica con HEC-HMS en cuencas montañosas de la región oriental de Cuba. *Ingeniería Hidráulica y ambiental*, 33(1), 71-80.
- Faustino, J., y Jiménez, F. (2000). Manejo de cuencas hidrográficas. In: CATIE, Turrialba (Costa Rica). Area de Cuencas y Sistemas Agroforestales.
- Faustino, J., Jiménez, F., Velásquez, S., Alpízar, F., y Prins, C. (2006). Gestión integral de cuencas hidrográficas. *Turrialba, CR, CATIE*.
- 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. Sangolquí, Ecuador*.

- Flores, E., Miranda, M., y Villasís, M. (2017). El protocolo de investigación VI: cómo elegir la prueba estadística adecuada. *Estadística inferencial. Revista alergia México*, 64(3), 364-370.
- Franquet, J. (2005). *Cálculo hidráulico de las conducciones libres y forzadas: una aproximación de los métodos estadísticos* (Vol. 3): José María Franquet Bernis.
- Foley, J., DeFries, R., Asner, G., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S., . . . Gibbs, H. (2005). Global consequences of land use. *science*, 309(5734), 570-574.
- GAD Imbabura, y Prefectura de Imbabura. (2015). Actualización del Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de la Provincia de Imbabura 2015-2035. In: Ibarra.
- GAD San Antonio de Ibarra. (2015). Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de la Parroquia “San Antonio de Ibarra” 2015 – 2019. In.
- García, A. (2013). Análisis de distribuciones estadísticas alternativas a las tradicionales para la optimización de los caudales de cálculo empleados en los estudios hidrológicos.
- Garzón, O. (2017). Valoración de lugares de interés hidrológico en la cuenca del Río Ambi, provincia de Imbabura-Ecuador.
- Gaspari, F., Senisterra, G., Delgado, M., Rodríguez, A., y Besteiro, S. (2009). Manual de manejo integral de cuencas hidrográficas. *Gaspari. La Plata*, 321.
- Gaspari, F., Rodríguez, A., Senisterra, G., Denegri, G., Delgado, M., y Besteiro, S. (2012). Caracterización morfométrica de la cuenca alta del río Sauce Grande, Buenos Aires, Argentina. *AUGMDOMUS*, 4, 143-158.
- Gaspari, F., Rodríguez, A., Senisterra, G., Delgado, M., y Besteiro, S. (2013). Elementos metodológicos para el manejo de cuencas hidrográficas.
- Guzmán, J. (2014). Análisis multitemporal de las zonas forestales en la zona de Intag–Ecuador, Período 2010 Al 2013. *Quito, Ecuador: Universidad Salzburgo*.
- Henríquez, C., Azócar, G., y Aguayo, M. (2006). Cambio de uso del suelo y escorrentía superficial: aplicación de un modelo de simulación espacial en Los Ángeles, VIII Región del Biobío, Chile. *Revista de Geografía Norte Grande*(36), 61-74.
- Huber, A., y Trecaman, R. (2002). Efecto de la variabilidad interanual de las precipitaciones sobre el desarrollo de plantaciones de *Pinus radiata* (D. Don) en la zona de los arenales VIII Región, Chile. *Bosque (Valdivia)*, 23(2), 43-49.
- Huber, A., Iroumé, A., Mohr, C., y Frêne, C. (2010). Efecto de plantaciones de *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus* sobre el recurso agua en la Cordillera de la Costa de la región del Biobío, Chile. *Bosque (Valdivia)*, 31(3), 219-230.

- Ibañez, S., Moreno, H., y Gisbert, J. (2011a). Morfología de las cuencas hidrológicas.
- Ibañez, S., Moreno, H., y Gisbert, J. (2011b). Valores del nº de curva (cálculo de la escorrentía).
- Iturralde, M. (2013). *Los ríos crecidos, los torrentes de montaña y las inundaciones*. La Habana.
- Jácome, G. (2017). Aplicación del modelo Swat en la microcuenca del río bobo en tres escenarios para la estimación de caudales y sedimentos, provincia del Carchi.
- Kaimowitz, D. (2011). Cuatro medio verdades: la relación bosques y agua en Centroamérica. *Recursos Naturales y Ambiente*(33).
- Kutschker, A., Brand, C., y Miserendino, M. (2009). Evaluación de la calidad de los bosques de ribera en ríos del NO del Chubut sometidos a distintos usos de la tierra. *Ecología austral*, 19(1), 19-34.
- Landis, J., y Koch, G. (1977). The measurement of observer agreement for categorical data. *biometrics*, 159-174.
- Lavao, S. (2014). Aplicación de la teoría del número de curva (CN) a una cuenca de montaña. Caso de estudio: cuenca del río Murca, mediante la utilización de sistemas de información geográfica.
- Lawton, R. O., Nair, U. S., Pielke, R. A., y Welch, R. M. (2001). Climatic impact of tropical lowland deforestation on nearby montane cloud forests. *Science*, 294(5542), 584-587.
- Lopardo, R., y Seoane, R. (2000). Algunas reflexiones sobre crecidas e inundaciones. *Ingeniería del agua*, 7(1), 11-21.
- López, J., González, M., Scaini, A., Goñi, M., Valdenebro, J., y Gimena, F. (2012). Caracterización del modelo HEC-HMS en la cuenca de río Arga en Pamplona y su aplicación a cinco avenidas significativas. *Obras y proyectos*(12), 15-30.
- López, R., y Patrón, E. (2013). Cuencas hidrográficas. Fundamentos y perspectivas para su manejo y gestión.
- López, W. (2014). Análisis del manejo de cuencas como herramienta para el aprovechamiento sustentable de recursos naturales. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 13(2).
- Maas, J. (2003). Los ecosistemas: la complejidad gota por gota.¿ Cómo ves. *Revista de Divulgación de la Ciencia, UNAM*, 5(54), 13-16.

- Manson, R. (2004). Los servicios hidrológicos y la conservación de los bosques de México. *Madera y Bosques*, 10(1), 3-20.
- Martínez, R., Montoya, A., Calderón, M., y Camacho, N. (2003). La cobertura vegetal en la cuenca del canal de Panamá. In: Geoinstitutos.
- Méndez, W., Pacheco, H., Cartaya, S., Marcano, A., y León, C. (2015). Caracterización hidroclimatológica y morfométrica de la cuenca del río San Julián (estado Vargas, Venezuela): aportes para la evaluación de la amenaza hidrogeomorfológica. *Cuadernos de Geografía*, 24(2), 133-156.
- Meza, M., Rodríguez, A., Corvacho, O., y Tapia, A. (2014). Análisis morfométrico de microcuencas afectadas por flujos de detritos bajo precipitación intensa en la quebrada de Camiña, Norte Grande de Chile. *Diálogo andino*(44), 15-24.
- Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2011). *Las crecidas e inundaciones*. San Salvador.
- Ministerio del Ambiente del Ecuador. (2012). Estimación de la Tasa de Deforestación del Ecuador continental. *Ministerio del Ambiente del Ecuador, Quito*.
- Ministerio del Ambiente del Ecuador. (2013). Sistema de clasificación de los ecosistemas del Ecuador continental. In: Subsecretaría de patrimonio natural Quito.
- Miranda, M., y Pereira, N. (2002). Caracterización Biofísica y Socioeconómica de la Subcuenca de Brakira, Comunidad De Tuapi, RAAN. In: Puerto Cabezas.
- Molnar, P. (2011). Calibration. *Institute of Environmental Engineering*.
- Mora, W., y Ochoa, R. (2016). Modelamiento de zonas de inundación por medio de las herramientas HEC-RAS, GEO-RAS y ARCGIS, para el sector comprendido entre los municipios de Corrales-Paz del Río a lo largo del Río Chicamocha, en el departamento de Boyacá.
- Moran, M., Jackson, R., Slater, P., y Teillet, P. (1992). Evaluation of simplified procedures for retrieval of land surface reflectance factors from satellite sensor output. *Remote Sensing of Environment*, 41(2-3), 169-184.
- Mundial Visión. (2004). Manual de manejo de cuencas. *San Salvador, SV*, 1-107.
- Ojeda, A. (2007). Crecidas e inundaciones como riesgo hidrológico: un planeamiento didáctico. *Lurralde: Investigación y espacio*(20), 261-283.
- Ordoñez, J. (2011). ¿ Qué es cuenca hidrológica?. *Lima, Perú*.
- Oyarzún, C., Frêne, C., Lacrampe, G., Huber, A., y Hervé, P. (2011). Propiedades hidrológicas del suelo y exportación de sedimentos en dos microcuencas de la

- Cordillera de la Costa en el sur de Chile con diferente cobertura vegetal. *Bosque (Valdivia)*, 32(1), 10-19.
- Parra, O. (2009). Gestión integrada de cuencas hidrográficas. *Centro de Ciencias Ambientales, EULA-Chile. Universidad de Concepción, Concepción, Chile.*
- Peña, C. (2015). Estudio Morfométrico y Estimación de caudal de creciente de la quebrada La Caya hasta la desembocadura en río San Pablín del municipio de Guican-Boyacá utilizando el método racional.
- Pérez, K. (2007). Estimación de la Oferta Hídrica en la cuenca alta del río Pita mediante el uso de herramientas Geoinformáticas. *Escuela Politécnica del Ejército, Sangolquí, Ecuador.*
- Pérez, M., y Rodríguez, M. (2013). Aplicaciones de la Teledetección en degradación de suelos. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles(61)*, 285-308.
- Pérez, P., Cataldo, M., Zema, D., de Vente, J., y Boix, C. (2018). Efectos de la revegetación a escala de cuenca sobre el caudal y la evapotranspiración en ambiente mediterráneo. Cuenca del Taibilla (SE de España). *Bosque (Valdivia)*, 39(1), 119-129.
- Pizarro, R., Benitez, A., Farias, C., Jordan, C., Santibañez, F., Sangüesa, C., . . . Roman, L. (2005). Influencia de las masas boscosas en el régimen hídrico de una cuenca semiárida, Chile. *Bosque (Valdivia)*, 26(1), 77-91.
- Pourrut, P. (1983). Los climas del Ecuador: fundamentos explicativos. *ORSTOM y Programa Nacional de Regionalización Agraria del Ministerio de Agricultura y Ganadería. Quito, Ecuador.*
- Pourrut, P., Róvere, O., Romo, I., y Villacrés, H. (1995). Clima del Ecuador.
- Poveda, G., y Mesa, Ó. (2010). Efectos hidrológicos de la deforestación. *Energética(16)*, 91-102.
- Proaño, M., Gavilanes, C., Valenzuela, P., y Cisneros, C. (2006). Aplicación del modelo SWAT en la subcuenca del río Ambato.
- Puerta, R., Rengifo, J., y Bravo, N. (2011). ArcGIS básico 10. *Universidad Nacional Agraria de la Selva. Tingo María, Peru.*
- Puyravaud, J. (2003). Standardizing the calculation of the annual rate of deforestation. *Forest ecology and management*, 177(1-3), 593-596.
- Ramírez, J. (2015). Alternativas de manejo sustentable de la subcuenca del río Pitura, provincia de Imbabura, Ecuador.

- Rodríguez , C., Gutiérrez , J., y Pozo , T. (2007). Fundamentos conceptuales de las principales pruebas de significación estadística en el ámbito educativo. *LISLL, Ed.) Grupo Editorial Universitario*.
- Rojas, O., Mardones, M., Arumí, J. L., y Aguayo, M. (2014). Una revisión de inundaciones fluviales en Chile, período 1574-2012: causas, recurrencia y efectos geográficos. *Revista de Geografía Norte Grande*(57), 177-192.
- Romero, H., y Vásquez, A. (2005). Evaluación ambiental del proceso de urbanización de las cuencas del piedemonte andino de Santiago de Chile. *Eure (Santiago)*, 31(94), 97-117.
- Rosero, M. (2018). Análisis multitemporal del uso del suelo y cobertura vegetal de la cuenca del Río Tahuando y proyección de cambios al año 2031, en el cantón Ibarra, provincia de Imbabura.
- Salas, V., Pinedo, C., Viramontes, O., Báez, A., y Quintana, R. (2011). Morfometría de la cuenca del río Nazas Rodeo en Durango, México, aplicando tecnología geoespacial. *Tecnociencia Chihuahua*, 5, 34-42.
- Salazar, J. (2017). Análisis multitemporal de la cobertura vegetal de la Microcuenca del río Pisque y su incidencia en la producción de agua, en la Provincia de Imbabura.
- Sánchez, F. (2008). HEC-HMS, Manual elemental. *España: Universidad de Salamanca*.
- Sánchez, F. (2017). *Hidrología Superficial y Subterránea*. España: Createspace Independent.
- Schumm, S. A. (1977). *The fluvial system* (Vol. 338): Wiley New York.
- Sierra, R. (2013). Patrones y factores de deforestación en el Ecuador continental, 1990-2010. *Y un acercamiento a los próximos*, 10, 57.
- Sistema Nacional de Información. (2014). SNI. <http://sni.gob.ec/coberturas>
- Sobrino, J. A., Jimenez, J. C., y Paolini, L. (2004). Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. *Remote Sensing of environment*, 90(4), 434-440.
- Speranza, F., y Zerda, H. (2005). Clasificación digital de coberturas vegetales a partir de datos satelitales multiespectrales.
- Tapia, J. (2012). Modelización hidrológica de un área experimental en la cuenca del Río Guayas en la producción de caudales y sedimentos.
- Tituaña, W. (2011). Propuesta de manejo de la microcuenca de la Quebrada San Antonio de Ibarra.

- Torres, E., y González, E. (2009). Aplicación del modelo de simulación hidráulica HEC-RAS para la emisión de pronósticos hidrológicos de inundaciones en tiempo real, en la cuenca media del río Bogotá - Sector Alicachin. *Universidad Libre*.
- Triviño, A., y Ortiz, S. (2004). Metodología para la modelación distribuida de la escorrentía superficial y la delimitación de zonas inundables en ramblas y ríos-rambla mediterráneos.
- Valencia, J., y Zarate, H. (2013). Secuencia de actividades para la construcción de una concepción cíclica y compleja del proceso: " ciclo del agua".
- Vera, M. (2019). Análisis multitemporal de cobertura vegetal y la implicación del recurso hídrico en la micro cuenca del río Yanayacu, cantón Cotacachi.
- Vidal, C., y Romero, H. (2010). Efectos ambientales de la urbanización de las cuencas de los ríos Bío-bío y Andalién sobre los riesgos de inundación y anegamiento de la ciudad de Concepción.
- Vilca, S. (2017). Utilización de un sistema de información geográfica para establecer zonas de afectación por amenazas de deslizamiento en el cantón Antonio Ante.
- Villegas, J. C. (2004). Análisis del conocimiento en la relación agua-suelo-vegetación para el Departamento de Antioquía. *Revista EIA(1)*, 73-79.
- 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

# ANEXOS

## Anexo A: Figuras

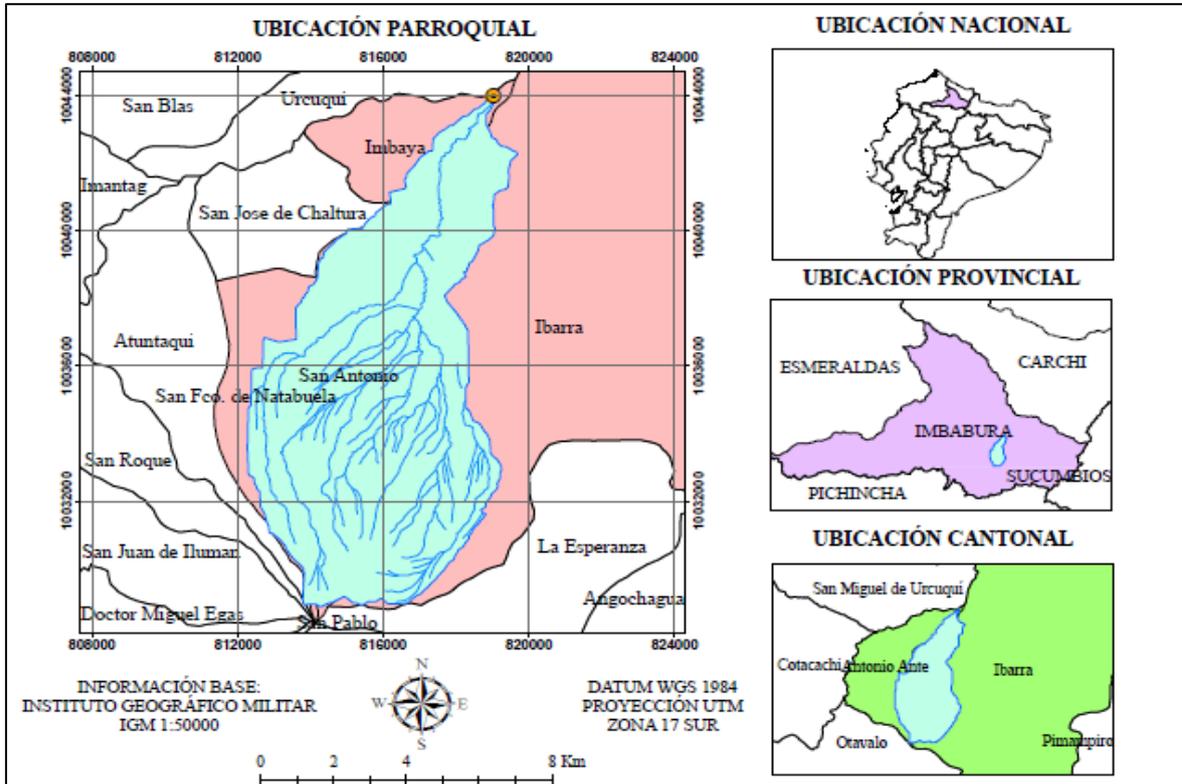


Figura A1. Mapa de ubicación de la microcuenca del río Chorlaví

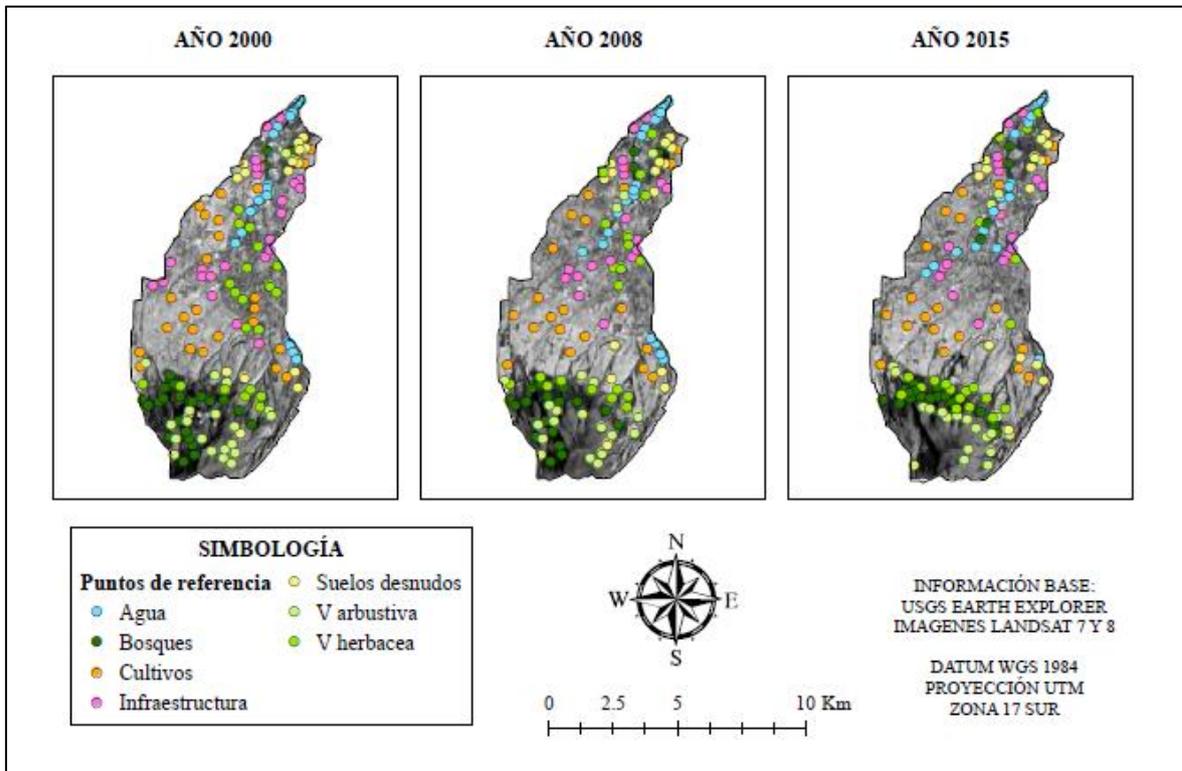


Figura A2. Puntos de referencia para la validación de la clasificación supervisada

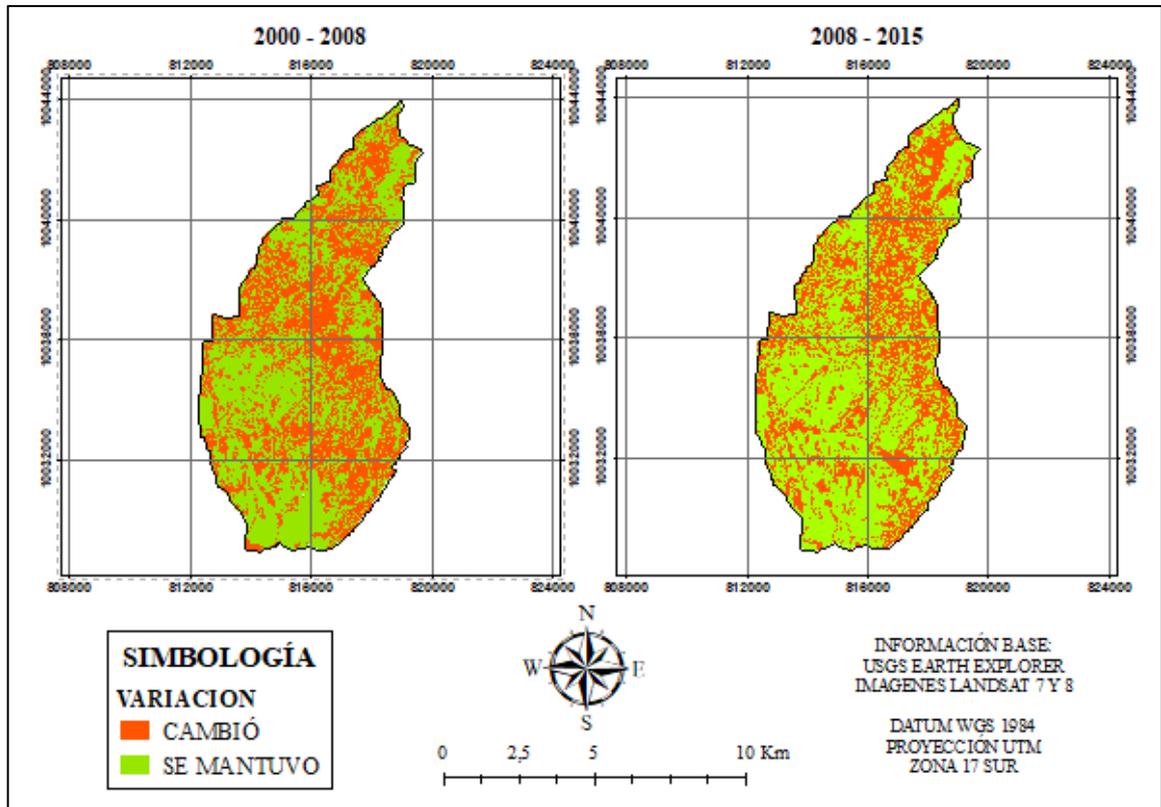


Figura A3. Variación de la microcuenca en los dos periodos de estudio

Hydrologic Element	Drainage Area (KM2)	Peak Discharge (M3/S)	Time of Peak	Volume (MM)
SUBCUENCA 1	305,94	22,7	10feb2015, 00:00	714,17
SUBCUENCA 2	138,05	9,7	10feb2015, 00:00	689,97
UNION 1	443,99	32,4	10feb2015, 00:00	706,65
RÍO 1	443,99	32,3	10feb2015, 00:00	706,65
SUBCUENCA 3	323,41	35,1	15oct2015, 00:00	929,07
UNION 2	767,40	66,1	15oct2015, 00:00	800,39
SUBCUENCA 4	102,93	8,1	10feb2015, 00:00	738,86
RÍO 2	870,33	73,1	15oct2015, 00:00	793,10
AFORO	870,33	73,1	15oct2015, 00:00	793,10

Figura A3. Simulación de subcuenca del río Ambi en software HEC-HMS

PIAR IBAPPA

- Caudal diario 39.562 m<sup>3</sup>/dia.
- Caudal horario 1.648,42 m<sup>3</sup>/hora.
- Población 197.809 habitantes.
- Dotación 200l/habitantes/dia.

Datos Diseño de Caudal PIAR

- Caudal horario 1656 m<sup>3</sup>/hora
- Caudal diario 39744 m<sup>3</sup>/dia.
- Caudal punta (diseño primario) 332m<sup>3</sup>/hora
- Caudal horario 6.629 m<sup>3</sup>/hora.

Figura A4. Datos de descarga hídrica obtenidos en EMAPA


INAMHI		FORMULARIO DE ENTREGA DE SERVICIOS Y PRODUCTOS METEOROLÓGICOS E HIDROLÓGICOS		Versión: 1.2		
<b>A) Información del Solicitante:</b>						
Nombres:	Andrés Manolo	Institución:	Solicitud N°:	CIFOR-001		
Apellidos:	Camión Burgos		Fecha:	05 de octubre el 2018		
Cédula-RUC:	100169512-9		Teléfono:			
Profesión:	Ingeniero Forestal		Celular:	0996681234		
Ocupación:	Docente Universidad Técnica del Norte		Pública:	x		
E-mail:	amcamion@un.edu.ec		Privada:			
Dirección:	8 de marzo y 19 de abril esquina		Facultad:	FICAYA		
Domicilio:			País:	Ecuador		
Ciudad:	Ibama		Atención al Usuario:	Fecha:	Hora:	
<b>B) Seleccione la información:</b>						
MARQUE CON UNA X						
<b>Información Estadística Meteorológica e Hidrológica</b>						
Estadística de valores diarios de temperatura máxima	<input checked="" type="checkbox"/>	Estadística de valores diarios de temperatura mínima	<input checked="" type="checkbox"/>			
Estadística de valores diarios de termómetro seco	<input type="checkbox"/>	Estadística de valores diarios de tensión de vapor	<input type="checkbox"/>			
Estadística de valores diarios de humedad relativa	<input checked="" type="checkbox"/>	Estadística de valores diarios de punto de rocío	<input type="checkbox"/>			
Estadística de valores diarios de precipitación	<input checked="" type="checkbox"/>	Estadística de valores diarios de evaporación	<input checked="" type="checkbox"/>			
Estadística de valores diarios de nubosidad	<input type="checkbox"/>	Estadística de valores diarios de recorrido del viento (2m)	<input type="checkbox"/>			
Estadística de valores horarios y diarios de heliofania efectiva	<input checked="" type="checkbox"/>	Estadística de valores mensuales de temperatura máxima	<input checked="" type="checkbox"/>			
Estadística de valores mensuales de temperatura mínima	<input checked="" type="checkbox"/>	Estadística de valores mensuales de temperatura del termómetro seco	<input type="checkbox"/>			
Estadística de valores mensuales de tensión de vapor	<input type="checkbox"/>	Estadística de valores mensuales de humedad relativa	<input type="checkbox"/>			
Estadística de valores mensuales de temperatura del punto de rocío	<input type="checkbox"/>	Estadística de valores mensuales de precipitación	<input type="checkbox"/>			
Estadística de valores mensuales de evaporación potencial	<input checked="" type="checkbox"/>	Estadística de valores mensuales de nubosidad	<input type="checkbox"/>			
Estadística de valores mensuales de dirección y velocidad del viento (10m)	<input type="checkbox"/>	Estadística de valores mensuales de recorrido del viento (2m)	<input type="checkbox"/>			
Estadística de valores mensuales de heliofania efectiva	<input checked="" type="checkbox"/>	Estadística de valores de niveles medios diarios	<input type="checkbox"/>			
Estadística de valores de caudales medios diarios	<input checked="" type="checkbox"/>	Registro detallado de un año de gasto líquido	<input checked="" type="checkbox"/>			
Estadística de valores mensuales de niveles medios	<input checked="" type="checkbox"/>	Estadística de valores mensuales de caudales medios	<input checked="" type="checkbox"/>			
Anuarios Meteorológico	<input type="checkbox"/>	Anuarios Hidrológico	<input type="checkbox"/>			
<b>C) Indique las Estaciones o Sector de donde requiere la información:</b> Estaciones de la provincia de Imbabura desde el año 2000 hasta la actualidad						
<b>D) Finalidad de la información:</b>						
Estudio	<input type="checkbox"/>					
Proyecto	<input type="checkbox"/>					
Tesis	<input checked="" type="checkbox"/>					
Investigación	<input type="checkbox"/>					
Consultoría	<input type="checkbox"/>					
Otros	<input type="checkbox"/>	¿Cuál?				
<b>E) Acuerdo de compromiso</b>						
<i>Por la presente manifiesto mi compromiso de:</i>						
a) Aceptar las condiciones y características de la información recibida.						
b) Garantizar el manejo y uso responsable de la información.						
c) Reconocer en forma documentada y pública la fuente y autoría de la información a nombre del INAMHI.						
d) Entregar al Inamhi, un ejemplar del producto generado con la información entregada como una contribución al desarrollo del conocimiento y cultura meteorológica e hidrológica en el país.						
<b>F) Condiciones generales:</b>						
a) En caso de requerir que la información sea enviada por correo nacional o internacional, el solicitante deberá cubrir los gastos de envío.						
b) Si la información es valorada, se cancelará el valor correspondiente de acuerdo con el Reglamento interno del INAMHI.						
c) Si la información es para uso académico o tesis, adjuntar justificativo del Centro de Estudios.						
d) El INAMHI se reserva el derecho de autorizar o no la entrega de la información de acuerdo a su política interna, lo cual será informado al usuario.						
Firma del solicitante: 			Responsable Atención al Usuario:			
1						

Figura A5. Formulario de solicitud de datos al INAMHI



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES**  
**CARRERA DE INGENIERÍA FORESTAL**

Oficio 016

Ibarra, 5 de octubre de 2018

Licenciado  
José Olmedo Morán  
DIRECTOR EJECUTIVO DEL INAMHI  
Presente

Señor Director:

Por medio del presente solicito a usted se autorice la entrega de la información descrita en el formulario de entrega de servicios y productos meteorológicos e hidrológicos adjunto. La información solicitada corresponde a las estaciones hidrológicas y meteorológicas de la provincia de Imbabura para el periodo 2000-2017.

Particular que solicito con la finalidad de poder desarrollar el trabajo de titulación denominado: *Influencia de la cobertura forestal en la generación de caudales de la microcuenca del Río Chorlavi*; de autoría de la Srta. Jennifer Elizabeth Gómez Arcos, estudiante de la Carrera de Ingeniería Forestal, aprobado el día 23 de julio del 2018, mediante oficio 17-SESIÓN HCD 12-2018.

Atentamente,  
CIENCIA Y TÉCNICA AL SERVICIO DEL PUEBLO

  
Ing. Andrés Manolo Carrión Burgos  
COORDINADOR CARRERA DE INGENIERÍA FORESTAL  
UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE  
[amcarrion@utn.edu.ec](mailto:amcarrion@utn.edu.ec) / [jegomez@utn.edu.ec](mailto:jegomez@utn.edu.ec)  
0996681234 / 0979491830



Samuel Navarrete  
05-10-2018  
13:26

Anexo: 3 hojas

Figura A6. Oficio de solicitud de datos al INAMHI

**Anexo B: Tablas**

**Tabla B1**

*Datos de precipitación del año 2015 de la estación Ibarra-INAMHI.*

Mes / día	Estación M1240											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0,0	0,0	0,0	1,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,1
2	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	10,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3	0,0	0,0	0,4	0,0	24,2	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4	0,0	0,0	0,0	0,0	11,5	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0	1,8	0,0
6	0,0	5,4	0,0	0,0	0,5	0,1	18,2	0,0	0,0	0,0	18,6	0,0
7	0,0	3,4	0,1	0,0	0,0	0,2	5,8	0,0	0,0	0,0	4,6	0,0
8	0,0	2,6	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	2,8	0,0	0,0	0,0
9	0,0	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0
10	0,0	2,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0
11	0,0	0,0	0,0	14,9	2,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
12	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
13	0,0	0,0	0,7	0,0	0,0	0,1	0,1	0,2	0,0	9,0	0,0	0,1
14	0,0	0,0	3,7	1,7	0,0	0,1	0,3	1,2	0,0	24,5	0,0	1,8
15	0,0	1,4	0,3	3,6	0,4	0,1	0,1	0,2	0,0	19,0	0,0	1,6
16	41,3	0,0	0,5	13,9	0,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0
17	1,1	0,0	21,0	0,5	0,7	0,0	9,2	0,0	0,0	0,0	6,9	0,0
18	2,3	0,6	11,0	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	3,4
19	16,2	9,8	24,9	7,2	0,0	0,0	1,3	0,0	0,0	0,1	2,6	0,0
20	1,0	0,0	2,2	4,5	1,5	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	3,9	0,0
21	5,1	0,0	0,3	4,6	0,0	0,0	4,8	0,0	0,0	0,0	9,2	0,0
22	2,2	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	1,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
23	2,7	0,0	12,0	0,0	0,0	0,0	0,8	0,0	0,0	0,1	7,9	0,0
24	0,7	0,0	0,1	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	3,2	0,8	0,0
25	0,0	0,0	0,0	0,0	1,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0
26	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
27	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
28	0,0	0,0	9,2	0,0	1,0	0,0	0,9	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
29	0,0		4,3	0,0	0,2	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
30	0,0		1,4	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	2,5	0,0	0,0	0,0
31	0,1		3,7		0,2		0,0	0,0		0,5		0,0

**Tabla B2***Datos de precipitación del año 2015 de la estación Atuntaqui*

Mes/ día	Estación M021											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,6	0,0	0,0
2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,1	0,0	0,0
3	0,0	0,0	0,0	0,0	20,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	0,0	6,6	0,0	6,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	15,7	0,0
6	0,0	21,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,1	0,0	12,9	0,0
7	0,0	3,3	0,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,5	0,0
8	0,0	15,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
9	0,0	20,0	0,0	1,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,5	0,0
10	0,0	10,0	7,4	0,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
11	0,0	4,1	2,0	8,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
12	0,0	0,0	0,0	10,0	0,0	5,3	0,0	1,0	0,0	0,0	10,0	0,0
13	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5,0	0,0	0,0	0,0	14,7	0,0	0,0
14	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	14,5	0,0	0,0
15	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,2	0,0	0,0
16	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
17	0,0	0,0	10,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
18	2,0	17,2	20,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
19	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
20	25,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
21	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
22	5,0	0,2	1,3	0,0	0,0	0,0	14,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
23	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
24	9,6	0,0	8,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,5	0,0	0,0
25	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
26	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
27	0,4	0,0	12,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6	0,0	0,0
28	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
29	0,0		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
30	0,0		0,0	0,0	1,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
31	0,0		0,0		0,0		0,0	0,0		0,0		

## Anexo C: Fotografías



Fotografía 1. Sitio de estudio




Fotografía 2. Río Chorlaví




Fotografía 3. Reconocimiento del sitio de estudio




Fotografía 4. Toma de datos de caudal



Fotografía 5. Afluentes del Río Chorlaví



Fotografía 6. Vegetación de la microcuenca



Fotografía 7. Arrastre de material sólido en el cauce



Fotografía 8. Sedimentación del río Chorlaví