

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL**

**CARACTERIZACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA Y ESTIMACIÓN DEL BALANCE  
HÍDRICO DE LA CUENCA DEL RÍO CUTUCHI.**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**CYNTHIA MARIBEL VACA NUÑEZ**

[cynthia.vaca@epn.edu.ec](mailto:cynthia.vaca@epn.edu.ec)

**DRA. CARLA MANCIATI, PHD  
DIRECTOR**

**Quito, octubre 2022**

## DECLARACIÓN

Yo Cynthia Maribel Vaca Nuñez, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.



---

CYNTHIA MARIBEL VACA NUÑEZ

## CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Cynthia Maribel Vaca Nuñez, bajo mi supervisión.



---

**DRA. CARLA MANCIATI, PHD**  
**DIRECTORA DEL PROYECTO**

## AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por nunca abandonarme y llevarme siempre de la mano para no desviar mi camino hasta verme culminar todas mis metas. Dios tiene caminos perfectos para cada persona y sé que él ha guiado el mío para sentirse dichoso y alegre junto a todos los ángeles que tengo en el cielo y que desde ahí me mandan todas las bendiciones.

A mis padres porque ellos son mi bastón aquí en la tierra, sé que con ellos puedo contar toda la vida. No me alcanzan las palabras ni la vida para agradecer todo lo que ellos hacen por mí, toda la fuerza y el amor que me brindan día a día para poder levantarme de cada caída, aprender y sonreír de cada logro.

A mis hermanos que son mi mayor ejemplo de constancia y dedicación, mi apoyo, mi guía, mi fuerza para creer que todo puede ser posible con dedicación.

A mi directora de tesis Dra. Carla Manciatì PhD por su confianza, tiempo, paciencia y creer en el desarrollo de mi proyecto. Además, por ser como una amiga y aconsejarme de la mejor forma en este tiempo siendo una de las mejores maestras que la Politécnica me pudo brindar.

A Ing. Bolívar Palán un ejemplo de persona, un ángel que hoy está en el cielo y que a su tiempo fueron sus palabras quien me enseñó que la Politécnica no es de velocidad sino de perseverancia.

A mis ángeles ya sea del cielo o de la tierra porque sé que existen y están a mi lado todo el tiempo. Dios me mandó personas tan hermosas a cruzar por mi vida y que marcan cada día para que sea diferente, a ellos que sacan una sonrisa para poder iluminar hasta el peor camino. Y que se les llama amigos.

*Cynthia Vaca*

## DEDICATORIA

Dedico este logro a Dios que es mi fuerza para nunca rendirme mi orgullo, mi paz  
y amor para continuar cada día.

A mi familia, por ser mis guías, apoyo, ejemplo y mi todo, a lo largo de mi vida, por  
todo su cariño, paciencia, guía y amor.

Y a todos lo que estuvieron apoyándome y me enseñaron que aún existen  
muchas cosas por cumplir.

*Cynthia Vaca*

## CONTENIDO

DECLARACIÓN .....	I
CERTIFICACIÓN .....	II
AGRADECIMIENTO.....	III
DEDICATORIA.....	IV
CONTENIDO.....	V
ÍNDICE DE TABLAS .....	X
ÍNDICE DE FIGURAS .....	XII
ÍNDICE DE ANEXOS .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
SIMBOLOGÍA Y SIGLAS.....	XV
ABREVIATURAS.....	XVI
RESUMEN .....	XVII
ABSTRACT .....	XVIII
CAPÍTULO 1 .....	19
INTRODUCCIÓN .....	19
1.1. ANTECEDENTES.....	19
1.2. OBJETIVOS .....	20
1.2.1. OBJETIVO GENERAL .....	20
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	20
1.3. ALCANCE.....	20
1.4. JUSTIFICACIÓN.....	20
1.4.1. Justificación Teórica.....	20

1.4.2. Justificación Metodológica.....	22
1.4.3. Justificación Práctica.....	23
CAPÍTULO 2 .....	24
MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE .....	24
2.1 ASPECTOS TEÓRICOS SOBRE LAS CUENCAS HIDROGRÁFICAS ...	24
2.2. CARACTERIZACIÓN DE UNA CUENCA HIDROGRÁFICA.....	25
2.2.1. Perímetro (P) .....	25
2.2.2. Área de la cuenca (A) .....	25
2.2.3. Longitud Axial de la cuenca (L).....	25
2.2.4. Ancho Medio (B) .....	25
2.2.5. Coeficiente de Compacidad (Kc) .....	25
2.2.6. Coeficiente de Forma (kf) .....	26
2.2.7. Geología y Relieve.....	26
2.2.8.- Suelos.....	27
2.2.9. Cobertura Vegetal y Uso de Suelo .....	29
2.3. ESTIMACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO .....	30
2.3.1. Precipitación .....	32
2.3.2. Temperatura .....	33
2.3.3. Humedad .....	33
2.3.4. Infiltración .....	34
2.3.5. Escorrentía .....	34
2.3.6. Evapotranspiración .....	35
2.4. MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN.....	35

CAPÍTULO 3 .....	39
METODOLOGÍA.....	39
3.1. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA DE LA SUBCUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO CUTUCHI .....	39
3.2. CARACTERIZACIÓN DE LA SUBCUENCA .....	40
3.2.1. Hidrología .....	40
3.2.2. Geología y relieve local.....	41
3.2.3. Suelos.....	42
3.2.4. Cobertura y uso del suelo .....	43
3.3. ESTIMACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO .....	45
3.4. PARÁMETROS HIDROMETEOROLÓGICOS .....	46
3.4.1. Precipitación local.....	46
3.4.1.1. Obtención y manejo de datos hidrometeorológicos .....	46
3.4.1.2. Relleno y Validación de Datos de Precipitaciones .....	48
3.4.1.3. Clasificación de estaciones meteorológicas .....	49
3.4.1.4. Agrupación de estaciones meteorológicas .....	50
3.4.1.5. Distribución espacial de la precipitación media mensual .....	54
3.4.1.6. Distribución espacial de la precipitación media anual.....	55
3.4.1.7. La relación entre la variación altitudinal y la precipitación .....	57
3.4.2.- Temperatura .....	58
3.4.2.1. Distribución temporal de la temperatura .....	59
3.4.2.2. Variación altitudinal de la temperatura.....	60
3.4.2.3. Distribución espacial de la temperatura media anual.....	61



3.4.3. Humedad relativa.....	62
3.4.3.1. Humedad relativa anual.....	62
3.4.3.2. Humedad relativa mensual.....	63
3.4.4. Caudal.....	65
3.4.4.1. Obtención y manejo de datos hidrológicos.....	65
3.4.4.2. Análisis de confiabilidad de información hidrológica.....	66
3.4.4.3. Relleno de la información hidrológica.....	68
3.4.4.4. Escorrentía en la subcuenca.....	69
3.4.4.5. Variación de caudal en la subcuenca (datos homogeneizados).....	70
3.5. MÉTODOS PARA ESTIMACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL (ETP) DE LA SUBCUENCA.....	74
3.5.1. Método de Thornthwaite.....	74
3.5.2. Método de Penman-Monteith (FAO).....	75
3.5.3. Evapotranspiración potencial de la subcuenca derivada del Producto CRU (Climatic Research Unit).....	77
3.5.4. Estimación de datos de evapotranspiración a partir del producto MODIS .....	77
CAPÍTULO 4.....	79
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	79
4.1. RESULTADOS DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL.....	79
4.1.1. Evapotranspiración potencial mediante el método de Thornthwaite....	79
4.2.2. Evapotranspiración potencial mediante el método de Penman-Monteith. .....	85

4.2.3. Evapotranspiración potencial mediante el producto CRU.....	86
4.2.4. Evapotranspiración potencial obtenida por MODIS .....	88
4.2. RESULTADOS DE LA ESTIMACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL EN LA CUENCA.....	89
4.2.1. Evapotranspiración real aplicando la ecuación general de balance hidrológico.....	89
4.2.2. Evapotranspiración real mediante el método de Penman-Monteith (FAO) .....	90
4.2.3. Evapotranspiración real por satélite (CRU).....	91
4.2.4. Evapotranspiración real por MODIS .....	94
CAPÍTULO 5 .....	96
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	96
5.1. CONCLUSIONES .....	96
5.2. RECOMENDACIONES .....	97
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	98
ANEXO.....	105

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Órdenes del Suelo.....	29
Tabla 2. Uso del suelo.....	30
Tabla 3. Métodos indirectos para el cálculo de la evapotranspiración .....	36
Tabla 4. Estado del arte .....	36
Tabla 5. Área de la subcuenca distribuida en las provincias.....	40
Tabla 6. Cobertura y uso del suelo en la cuenca del Río Cutuchi.....	44
Tabla 7. Estaciones meteorológicas de la zona de estudio.....	47
Tabla 8. Pares de estaciones meteorológicas con su coeficiente de correlación.	48
Tabla 9. Ecuación correspondiente a la recta de regresión para cada estación. .	48
Tabla 10. Criterio de clasificación de estaciones según disponibilidad de datos..	49
Tabla 11. Clasificación de estaciones según disponibilidad de datos .....	49
Tabla 12. Datos disponibles en las estaciones, porcentajes de datos vacíos, valores máximos (max), mínimos (min), media aritmética (med) y desviación estándar de la precipitación (SD). .....	50
Tabla 13. Agrupación de estaciones según régimen de precipitación.....	51
Tabla 14. Precipitaciones medias anuales según años en el periodo 2008-2011.	56
Tabla 15. Medias anuales de humedad relativa (%) para los años comprendidos en el periodo 2008-2011. ....	62
Tabla 16. Estaciones Hidrológicas. ....	66
Tabla 17. Clasificación según calidad de información diaria de precipitación. ....	66
Tabla 18. Estaciones hidrológicas para análisis de doble masa. ....	67

Tabla 19. Pares de estaciones hidrológicas con su coeficiente de correlación. ...	68
Tabla 20. Ecuación correspondiente a la recta para cada estación. ....	69
Tabla 21. Estadística de información de caudales líquidos medios diarios. ....	69
Tabla 22. Valores de esorrentía en cada una de las estaciones. ....	70
Tabla 23. Estaciones consideradas para el cálculo de la ETP método Penman-Monteith.....	77
Tabla 24. Evapotranspiración Potencial (mm) en cada una de las estaciones meteorológicas. ....	79
Tabla 25. Evapotranspiración potencial mensual según años de análisis usando el Método Thornthwaite (mm). ....	83
Tabla 26. Valores de evapotranspiración potencial (mm) obtenidos por el modelo de Penman-Monteith .....	85
Tabla 27. Resultados de la evapotranspiración real mediante la ecuación general del Balance Hídrico. ....	90
Tabla 28. Datos del cultivo, kc y tipo de suelo de cada estación (CROPWAT). ...	91
Tabla 29. Evapotranspiración real por el método de Penman-Monteith FAO para las estaciones meteorológicas indicadas-CROPWAT.....	91
Tabla 30. Valores Comparativos entre las dos fórmulas empíricas Penman-Monteith Y Ecuación General (mm/año) .....	95

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Triángulo de texturas del suelo USDA. ....	27
Figura 2. Balance hidrológico en la cuenca.....	32
Figura 3. Ubicación de la subcuenca del Río Cutuchi como componente del sistema Pastaza. ....	39
Figura 4. Hidrología en la subcuenca del Río Cutuchi. ....	41
Figura 5. Mapa de suelos en la subcuenca del Río Cutuchi. ....	43
Figura 6. Mapa de uso de suelos en la subcuenca del Río Cutuchi.....	45
Figura 7. Parámetros hidrometeorológicos en el balance hídrico.....	45
Figura 8. Parámetros hidrometeorológicos en el balance hídrico.....	47
Figura 9. Distribución temporal de precipitación del grupo 1.....	52
Figura 10. Distribución temporal de precipitación del grupo 2.....	52
Figura 11. Distribución temporal de precipitación del grupo 3.....	53
Figura 12.- Distribución temporal de precipitación del grupo 4.....	54
Figura 13. Precipitación media mensual en la cuenca del río Cutuchi .....	55
Figura 14. Precipitaciones medias anuales en la cuenca del río Cutuchi.....	57
Figura 15. Variación altitudinal de la precipitación media en la cuenca del río Cutuchi. ....	58
Figura 16. Caracterización de la temperatura en la cuenca del río Cutuchi. ....	59
Temperatura media mensual.....	59
Figura 17. Variación de la temperatura media mensual en cada una de las estaciones meteorológicas .....	60

Figura 18. Variación altitudinal de la temperatura media anual en la subcuenca del río Cutuchi. ....	61
Figura 19. Caracterización de la humedad relativa anual en la subcuenca del río Cutuchi. ....	63
Figura 20. La humedad relativa media mensual (2008-2011) dentro de la subcuenca del río Cutuchi. ....	64
Figura 21. Mapa de ubicación de las estaciones hidrológicas dentro de la subcuenca del río Cutuchi. ....	65
Figura 22. Curva de doble masa H0797. ....	68
Figura 23. Caudales medios diarios en la estación Cutuchi en Caspi (H0854). ....	71
Figura 24. Caudales medios diarios en la estación H0792. ....	71
Figura 25. Caudales medios diarios en la estación H0797. ....	72
Figura 26. Caudales medios diarios en la estación H0857. ....	72
Figura 27. Caudales medios diarios en la estación H0799. ....	73
Figura 28. Caudales medios mensuales (1987 -2014). ....	73
Figura 29. Variabilidad interanual e intranual de caudales para el río Cutuchi. ....	74
Figura 30. Parámetro del clima a ingresar en el programa CROPWAT. ....	76
Figura 31. Evapotranspiración potencial mensual (mm) usando el Método Thornthwaite, en la estación M0029. ....	80
Figura 32. Evapotranspiración potencial mensual (mm) usando el Método Thornthwaite, en la estación M0126. ....	80
Figura 33. Evapotranspiración potencial mensual (mm) usando el Método Thornthwaite, en la estación M004. ....	81

Figura 34. Evapotranspiración potencial mensual (mm) usando el Método Thornthwaite, en la estación M0122.....	82
Figura 35. Evapotranspiración potencial mensual (mm) usando el Método Thornthwaite, en la estación M0123.....	82
Figura 36. Evapotranspiración potencial de Satélite (CRU) incluido el valor de ETP Thornthwaite (azul) y Penman-Monteith (rojo) en mm/año. ....	87
Figura 37. Evapotranspiración potencial (MODIS) incluido el valor de ETP Thornthwaite (azul) y Penman-Monteith (rojo) en mm/año. ....	88
Figura 38. Interfaz del programa CROPWAT con sus respectivos componentes.	90
Figura 39. Evapotranspiración Real por Satélite CRU .....	93
Figura 40. Mapa de Evapotranspiración Real obtenido por MODIS.....	94

## SIMBOLOGÍA Y SIGLAS

<b>Q</b>	Caudal ( $m^3/s$ )
<b>tc</b>	Tiempo de concentración (s)
<b>C</b>	Coefficiente de esorrentía
<b>tc</b>	Tiempo de concentración (min u horas)
<b>T</b>	Periodo de retorno (años)
<b>P</b>	Perímetro de la cuenca (km)
<b>A</b>	Área de la cuenca ( $km^2$ )
<b>L</b>	Longitud de la cuenca (km)
<b>Kc</b>	Coefficiente de compacidad (km/km)
<b>B</b>	Ancho de la cuenca ( $km^2/km$ )
<b>Kf</b>	Coefficiente de forma ( $km^2/km^2$ )
<b>Dd</b>	Densidad de drenaje ( $km/km^2$ )
<b>ETP</b>	Evapotranspiración potencial (mm/año)
<b>ETR</b>	Evapotranspiración real (mm/año)



## ABREVIATURAS

**FAO** Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación.

**IGM** Instituto Geográfico Militar.

**INAMHI** Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología.

**MAE** Ministerio de Ambiente.

**MAGAP** Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca.

**SNI** Sistema Nacional de Información

**USDA** Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de Norteamérica por sus siglas en inglés

**UTM** Proyección Universal Transversa de Mercator

**WRB** Base Referencial Mundial

## RESUMEN

Las cuencas hidrográficas ofrecen el mayor servicio como recolectores de agua para la sociedad. El río Cutuchi se considera una de las principales fuentes de abastecimiento hídrico de la región comprendida entre el sector de Lasso y la ciudad de Latacunga (extremo sur). El objetivo del proyecto es determinar las características hidrometeorológicas y estimar el balance hídrico de esta cuenca. Interpretando los resultados obtenidos por los diferentes factores como la hidrología, geología, el clima y la vegetación; se evaluó las diferentes interacciones entre el agua superficial y subterránea.

Para lo cual, se recopiló, rellenó datos de precipitación y caudales líquidos a nivel mensual. Se realizó el análisis de las diferentes variables meteorológicas y la caracterización hidrometeorológica del área de estudio. Se determinó que en la zona existe variación climática por la cercanía a la región oriental. La distribución espacial de la precipitación mensual en la cuenca es muy irregular, se encuentra en un rango que va de 46.9 a 135.7 mm y en su mayoría las estaciones presentaron datos con características bimodales (picos máximos en los meses enero-marzo y noviembre-diciembre). De igual manera, los caudales líquidos mensuales se encontraron en un rango de 5 a 16 m<sup>3</sup>/s con un régimen bimodal. Se aplicaron diferentes métodos como Thornthwaite, Penman-Monteith, CRU y MODIS para obtener la evapotranspiración potencial. Con la información antes mencionada se calculó el balance hídrico en la subcuenca del río Cutuchi. Finalmente se determinó que los métodos de Thornthwaite, Penman-Monteith presentan resultados similares en cuanto de evapotranspiración potencial con valores de hasta 830 mm/ año. Adicionalmente se aplicó el método de la curva de Budyko para estimar la evapotranspiración real y se identificó el aporte de un flujo adicional de agua en la cuenca que puede deberse a la presencia de agua subterránea en la zona de estudio.

## ABSTRACT

Basins offer the greatest service as collectors of water for society. The Cutuchi River is considered one of the main sources of water supply in the region between the Lasso sector and the city of Latacunga (extreme south). The objective of the project is to determine the hydrometeorological characteristics and estimate the water balance of this basin. Furthermore, the different interactions between surface and groundwater were assessed by interpreting the results obtained by different factors such as hydrology, geology, climate and vegetation.

Data on precipitation and water flow were collected and filled in on a monthly basis. The analysis of the different meteorological variables and the hydrometeorological characterization of the study area was carried out. It was determined that there is a climatic variation in the area due to its proximity to the eastern region. The spatial distribution of annual precipitation in the basin is very irregular, it is in a range that goes from 46.9 to 135.7 mm and most of the stations presented data with bimodal characteristics (maximum peaks in the months January-March and November-December). Similarly, the monthly flow were found in a range of 5 to 16 m<sup>3</sup>/s with a bimodal regime. Different methods such as Thornthwaite, Penman-Monteith, CRU and MODIS were applied to obtain the potential evapotranspiration. In addition, the water balance in the Cutuchi river sub-basin was calculated with the aforementioned information. Finally, it was determined that the Thornthwaite, Penman-Monteith methods present similar results in terms of potential evapotranspiration with values of up to 830 mm/year. Additionally, the Budyko curve method was applied to estimate the real evapotranspiration and the contribution of an additional flow of water in the basin was identified, which may be due to the presence of groundwater in the study area.

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

Este primer capítulo aborda los aspectos introductorios a la investigación del balance hídrico en la cuenca del río Cutuchi. Se organiza en un grupo de características de localización, rasgos geográficos generales y en la justificación teórica, metodológica y práctica que guían el proceso de indagación científica de este objeto de estudio.

### 1.1. ANTECEDENTES

La cuenca del río Cutuchi forma parte de la cuenca del río Pastaza, el cual, a su vez, forma parte del contexto alto del gran Amazonas; por lo que los procesos de flujos de masas de agua transitan desde las estribaciones orientales de la cordillera andina hasta los diversos paisajes amazónicos. Se ubica en gran parte en la provincia de Cotopaxi y la provincia de Tungurahua, alimentado por dos fuentes fundamentales: la lluvia de carácter estacional en el régimen anual y sobre todo por los deshielos de los sectores sur y occidente del volcán Cotopaxi.

Esta zona es considerada una gran fuente hídrica tanto de escurrimiento superficial como recursos hidrogeológicos, proveyendo a toda la actividad económica que en ella tiene lugar, ya sea la producción agropecuaria, agroindustrial, industrial y de servicios, de ingentes dotaciones de agua potable. De hecho, su utilización es tan importante que no hay cómo concebir los espacios agrícolas que conforman todo su contexto geográfico, sin esas demandas elevadas que se requieren del recurso, ya sea para el riego de cultivos o también para el desarrollo de toda la base agro productiva que caracteriza esta zona que forma parte del callejón interandino en el centro del país.

Sin embargo, aunque ha sido documentada ciertas dinámicas funcionales de los fenómenos hidrológicos en la cuenca del río Cutuchi por diversos autores como revelan los aportes de Mayorga (2013); Maya (2006); Taco (2000), aún hoy es un asunto pendiente la estimación específica del balance hidrológico. De este modo se puede disponer del volumen anual promedio del agua que recibe y también, de las cantidades que regresan a la atmósfera por transpiración y evaporación (en

conjunto evapotranspiración), lográndose estimar el saldo de disponibilidad de recursos hídricos con que cuenta la cuenca en la actualidad.

## **1.2. OBJETIVOS**

### **1.2.1. OBJETIVO GENERAL**

Determinar el balance hidrológico de la subcuenca hidrográfica del río Cutuchi como instrumento fundamental en la conservación y disponibilidad de los recursos hídricos que dispone esta unidad geográfica.

### **1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Definir las características geográficas, climáticas e hidrológicas de la subcuenca del río Cutuchi como antecedentes geográficos necesarios para la comprensión de los parámetros del balance hidrológico.
- Estimar el balance hídrico en la subcuenca del río Cutuchi.

## **1.3. ALCANCE**

El proyecto de investigación tiene como finalidad caracterizar la subcuenca del río Cutuchi y calcular el balance hídrico que presenta la zona usando los métodos de Thornthwaite, Penman- Montieith, MODIS y CRU para la obtención de la evapotranspiración, para luego, emplear mapas creados a partir de paquetes computacionales como ArcGIS, que facilita la identificación de las principales características de la zona de estudio como la precipitación y, además, permite el procesamiento de imágenes ráster que serán utilizadas posteriormente para el cálculo de balance hídrico.

## **1.4. JUSTIFICACIÓN**

### **1.4.1. Justificación Teórica**

La notable importancia de la disponibilidad de agua en la cuenca no deja dudas, de incursionar en el campo amplio y a la vez, específico de la Hidrología, como subdisciplina geográfica que se enfoca en el ciclo hidrológico para poder prever las variaciones espaciales y temporales del agua y conocer el movimiento del agua

sobre y debajo de la superficie terrestre, incluyendo los procesos físicos, químicos y biológicos que se presentan (Breña & Jacobo, 2006). La base del estudio de esta ciencia, a más de la comprensión del ciclo hidrológico, es analizar los procesos e interrelaciones tanto superficiales como subsuperficiales.

La cuantificación de cualquier variable involucrada hidrológicamente en algún proceso determinado se hace con la aplicación de principios de la conservación de masa, así como de modelos empíricos y semi-empíricos que se han obtenido a través de años de investigación (Breña & Jacobo, 2006). Existe una amplia clasificación de los modelos hidrológicos aplicados en cuencas dentro de la literatura técnica. Dichos modelos son una herramienta que ayuda a conocer el funcionamiento y comportamiento de los diferentes componentes del ciclo hidrológico e interrelacionar la medición de parámetros meteorológicos e hidrológicos como: la infiltración, la percolación profunda, el flujo subsuperficial, el flujo subterráneo, la escorrentía, entre otros (Cabrera, 2011).

De manera general existe un consenso en todos esos estudios de la necesidad de cuantificar los parámetros hidrológicos para comprender los cambios de almacenamientos en toda la cuenca (Arumí et al. , 2012; Morejón, et al., 2015). Esto se complementa con otras intenciones empíricas más específicas orientadas a la determinación de balances hídricos tomando en cuenta parámetros como diferentes coberturas vegetales (De las Salas & García, 2000; Mendoza et al., 2002). En el caso de Ecuador, de forma muy particular, destacan varias contribuciones por su exhaustiva estimación de parámetros hidrológicos en cuencas andinas. En este contexto se pueden encontrar las evaluaciones aportadas por Torres & Proaño (2018); Duque-Sarango et al., (2019) y con énfasis, aquellas que emplean los sistemas de información geográficos y productos que provienen de imágenes satelitales para medir variables hidrológicas (López et al., 2019; Coral et al., 2015) y otras. Sin dudas, la revisión de esta literatura académica expresa la relevancia que ha tenido la estimación del balance hidrológico, como se lo hace en la presente investigación.

#### 1.4.2. Justificación Metodológica

El estudio evalúa los impactos de la zona del Cutuchi mediante la aplicación de la ecuación general de balance hídrico siendo una herramienta que permite conocer características de la cuenca mediante la aplicación del principio de conservación de la masa o la ecuación de continuidad sobre el equilibrio natural del agua. Las relaciones del balance hídrico en general, han sido considerados como los procesos de agua que se puede establecer como oferta y demanda de la cuenca-. Este principio debe reflejar un cambio en el almacenamiento de agua dentro del área del evaluada y ayudar a establecer a futuras investigaciones el uso de agua como suministro, manejo de agua residual, o como el uso de pozos de agua subterránea y sistemas sépticos considerados impactos negativos netos en el balance hídrico. Para el cálculo de la evapotranspiración se han utilizado modelos basados en los métodos de Thornthwaite, Penman- Montieith, MODIS y CRU, los cuales emplean fórmulas e imágenes de alta resolución. Estos métodos relacionan la evapotranspiración potencial con los diferentes factores climáticos: temperatura, precipitación, radiación solar incidente, velocidad del viento, rendimiento de las cosechas y otros (Montaner & Sánchez, 1988). El método de Thornthwaite, es el más utilizado para el cálculo de la evapotranspiración ya que utiliza valores medios mensuales de temperatura y precipitación (Thornthwaite, 1948). La ecuación de Penman-Montieith estima la evapotranspiración real directa de varios cultivos bajo diferentes condiciones atmosféricas. Este modelo requiere de mediciones simultáneas de temperatura del aire, humedad relativa, velocidad del viento y radiación solar que han sido medidas en varias estaciones meteorológicas instaladas en la zona (Bornhofen et al., 2015). Para el método MODIS y CRU se obtendrán mapas de plataformas en línea del Sistema Nacional de Información (SNI) e imágenes disponibles en la plataforma en línea CRU. Estas serán procesadas con ayuda del software ArcGIS, el cual permite manejar formato ráster. Este formato divide en celdillas las imágenes para poder procesarlas y realizar modelaciones de procesos. Toda la información hidrometeorológica necesaria para aplicar en los diferentes métodos se obtendrá por medio de entidades como el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI).

### **1.4.3. Justificación Práctica**

El desarrollo del presente trabajo de titulación plantea identificar la estimación del balance hídrico de la subcuenca del río Cutuchi mediante la aplicación de los métodos: Thornthwaite, Penman- Montieith, MODIS y el método satelital CRU para definir la evapotranspiración potencial. Una vez obtenidos los resultados del balance hídrico se establece la disponibilidad del recurso hídrico para dar un insumo que podría ser utilizado por los tomadores de decisiones a fin de mejorar la gestión de los recursos hídricos en la zona de estudio.

Al demostrar que los compósitos tienen una buena capacidad de adsorción de Zn, se puede ofrecer una alternativa para la remoción de este contaminante aplicada al tratamiento de las descargas industriales que contengan estos metales pesados. De igual manera, podría resultar útil para plantas de potabilización de aguas que tengan en su composición este metal, beneficiando de esta manera a áreas rurales y urbanas.



## **CAPÍTULO 2**

### **MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE**

En este segundo capítulo se establece la base teórica, las fuentes de información base y las conceptualizaciones necesarias que fundamentan la aplicación de cada uno de los métodos para el cálculo del balance hidrológico en la subcuenca hidrológica del río Cutuchi.

#### **2.1 ASPECTOS TEÓRICOS SOBRE LAS CUENCAS HIDROGRÁFICAS**

Como categoría epistemológica proveniente de la Hidrología las cuencas hidrográficas han sido definidas como las superficies terrestres drenadas por un sistema fluvial continuo y bien definido, cuyas aguas vierten a otro sistema fluvial o a otros cuerpos de agua, cuyos límites geográficos son impuestos por las formas elevadas del relieve (González, 2000). En otras palabras, las cuencas son concebidas como divisiones espaciales instituidas desde fronteras físico-geográficas y han sido designadas como aquellas delimitaciones más adecuadas en el manejo de recursos naturales como agua, suelo, aire, minerales y biomasa que, en su conjunto son las riquezas que dispone el hombre para cometer toda la materialidad construida (Llerena, 2003). A una cuenca también se le considera como un sistema energético-substancial porque en esta se realiza un proceso de constante intercambio material que garantiza la contención de la erosión, la dinámica de sus condiciones edafoclimáticas y la regulación hidrológica propia que posee (González, 2011).

El uso, aprovechamiento y conservación sostenible de estos recursos que posee, han adquirido gran prioridad para muchos países y sociedades, a fin de satisfacer las demandas de agua y otras necesidades de la población (Llerena, 2003).

El manejo integrado de las cuencas hidrográficas son una verdadera oportunidad para la planificación del desarrollo sostenible que, de forma holística y totalizadora permite indagar, viabilizar o solucionar el conjunto de problemáticas ambientales que presenta, el ascenso de la calidad de vida de la población asentada en ella, mejorar los medios de vida locales, la economía de los pobladores, alcanzar un

orden más justo socialmente y esa sostenibilidad del desarrollo al que se aspira (FAO, 2007).

## **2.2. CARACTERIZACIÓN DE UNA CUENCA HIDROGRÁFICA**

### **2.2.1. Perímetro (P)**

Esta característica se define como la longitud que delimita la unión de todos los puntos que forman parte de aguas o divisorias topográficas de la cuenca hidrográfica. Se define en kilómetros.

### **2.2.2. Área de la cuenca (A)**

Corresponde a la totalidad de la superficie de la cuenca proyectada en un plano horizontal. Se delimita por el perímetro de la cuenca y su unidad de medida generalmente son kilómetros cuadrados.

### **2.2.3. Longitud Axial de la cuenca (L)**

Se define como la línea recta del centro del cauce principal (cauce con mayor longitud desde el nacimiento hasta la salida), definida igualmente en kilómetros.

### **2.2.4. Ancho Medio (B)**

El ancho medio corresponde a la medida del ancho de la cuenca y se define como la relación entre el área y la longitud axial de la cuenca, definida en kilómetros.

$$B = A / L$$

**Ecuación 1**

Donde:

**A** = área de la cuenca (km<sup>2</sup>)

**L** = longitud axial de la cuenca (km)

### **2.2.5. Coeficiente de Compacidad (Kc)**

Es un indicador que expresa la forma de la cuenca y se mide relacionando el perímetro sobre la longitud de la circunferencia de un círculo que tenga un área igual a la de la cuenca, definida en km/km.

$$K_c = 0.28 * (P / A^{1/2})$$

**Ecuación 2**

Donde:

**P** = perímetro de la cuenca (km)

**A** = área de la cuenca (km<sup>2</sup>)

Las cuencas irregulares presentan coeficientes de compacidad mayores a uno y valores de coeficiente de compacidad igual o muy cercanos a uno son característicos de cuencas con formas más circulares.

### 2.2.6. Coeficiente de Forma (kf)

Asimismo, el coeficiente de forma es otra medida que permite cuantificar la forma de la cuenca. Relaciona el ancho medio y la longitud axial de la cuenca definida en kilómetros cuadrados sobre kilómetros cuadrados (km<sup>2</sup>/ km<sup>2</sup>)

$$K_f = A / L^2$$

**Ecuación 3**

Donde:

**A** = área de la cuenca (km<sup>2</sup>)

**L** = longitud axial de la cuenca (km)

Si se tienen dos cuencas de igual área, aquella que presenta mayor valor de kf está sujeta a presentar crecientes.

### 2.2.7. Geología y Relieve

El substrato geológico se explica desde las formaciones geológicas que se hallan en la subcuenca. Además, se sabe que son los factores geológicos, los encargados de moldear la fisiografía de cualquier unidad geográfica y también de la forma que tienen las cuencas hidrográficas (Hernández & Ortiz, 2005).

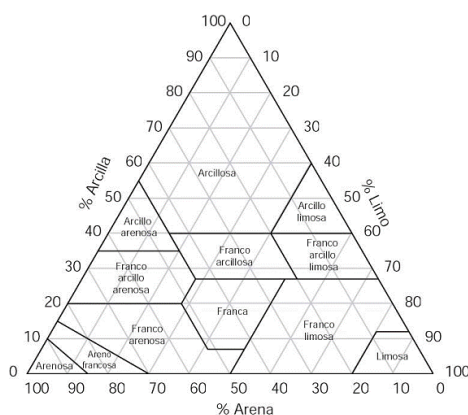
El relieve terrestre se define como las configuraciones que adopta la superficie terrestre resultado de la evolución de la dinámica del ciclo geográfico. Esto se produce mediante la acción de procesos constructivos llamados endógenos conducidos por deformaciones tectónicas, la formación de los cuerpos magmáticos

y metamórficos o las grandes deformaciones catastróficas ocurridas durante los movimientos telúricos (Rodríguez A., 2000). La geología local será descrita en el capítulo 3.

### 2.2.8.- Suelos

Los suelos han sido concebidos como recursos finitos y no renovables de mayor y permanente demanda antrópica. Asimismo, constituyen el substrato de la mayoría de las formas de vida y al mismo tiempo, se ha instituido como base fundamental de la producción material y alimentos de las sociedades. Formados por agua, aire, materia inorgánica y orgánica, son medios fundamentales del ciclo hidrológico puesto que transportan el paso del agua desde la superficie hacia el subsuelo a través de la infiltración. Así también, los suelos viabilizan la circulación biogeoquímica de elementos claves para la vida en el planeta (Montanarella, 2015).

La textura del suelo es la proporción de partículas de diversos tamaños, sean gruesas o finas, que se hallan en diferentes capas del suelo. El suelo puede variar su textura conforme a la profundidad caracterizando cada capa como un nuevo horizonte (Blanquer et al., 2010). Por tanto, determinar el tipo de textura del suelo permite identificar las zonas donde existiría facilidad para el movimiento y almacenamiento de agua conociendo el porcentaje de contenido de arcilla, limo o arena como entidades que lo forman. En la figura 1, se puede observar el diagrama triangular de las clases texturales básicas del suelo según el tamaño de las partículas.



**Figura 1.** Triángulo de texturas del suelo USDA.

**Fuente:** Tomado de (Blanquer et al., 2010)

Otra propiedad que permite evaluar los parámetros hidrológicos es la porosidad, entendida como la capacidad de los suelos de poseer intersticios. Esta propiedad se relaciona con el proceso de infiltración cuando los suelos disponen de mayor volumen que no está ocupado por los sólidos en el suelo y por ende es susceptible de ser ocupado por agua, aire, nutrientes y gases. Mientras las partículas que forman los suelos sean predominantemente arcillas sería un suelo muy poroso. Al mismo tiempo, el nivel de porosidad disminuye si las partículas constituyentes están representadas en mayores cuantías por arenas sin embargo, los poros o intersticios son de mayor tamaño (Llambi et al., 2012).

La taxonomía es la categorización del suelo dividiéndolo en orgánicos o minerales según sus características, y clasificándolos en 6 categorías y 12 órdenes. La USDA, Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de Norteamérica por sus siglas en inglés (USDA, 2018) establece esta clasificación agrupando a los suelos de acuerdo a las propiedades similares dadas por la WRB (Base Referencial Mundial) y la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación) (Schad & Vargas, 2015).

Las características del suelo están influenciadas por su posición vertical como horizontal; de tal forma, que se los categoriza en: orden, suborden, gran grupo, subgrupo, familia y serie. De esta manera, se transita desde clases poco numerosas y más heterogéneas hacia otras más abundantes y menos diferentes entre sí. Los órdenes se agrupan por presencia o ausencia de los llamados horizontes diagnósticos: climas edáficos o por características morfométricas (Nuñez, 2000), como se muestra en la tabla 1.

**Tabla 1.** Órdenes del Suelo.

<b>ORDEN</b>	<b>CONNOTACIÓN</b>
<b>Andisol</b>	Propiedades ándicas y suelos volcánicos
<b>Alfisol</b>	Horizonte argílico o nátrico o kándico
<b>Aridisol</b>	Régimen de humedad árido
<b>Entisol</b>	Perfil poco desarrollado
<b>Gelison</b>	suelo congelado
<b>Histosol</b>	Turba, suelo orgánico
<b>Inceptisol</b>	Grado de desarrollo incipiente o pobre
<b>Mollisol</b>	Epipedón móllico
<b>Oxisol</b>	Suelos ácidos, endopedión óxico
<b>Espodosol</b>	Suelo ácido, espódico
<b>Ultisol</b>	Suelo ácido, con horizonte argílico o kándico
<b>Vertisol</b>	Arcillas expansibles

**Fuente:** (Nuñez, 2000).

**Elaborado por:** Cynthia Vaca Nuñez.

### 2.2.9. Cobertura Vegetal y Uso de Suelo

La cobertura vegetal es una capa protectora para el suelo ya que mantiene la humedad y además no permite que las gotas de lluvia o rayos solares lo impacten directamente llegando a provocar erosión o disminuyendo la evaporación del agua que contiene. La presencia de una capa de cobertura vegetal en el suelo evita la erosión física y por tanto se previene la pérdida de suelo. Al mismo tiempo de la labor protectora que realiza al suelo también aporta con varios nutrientes y biomasa por medio de las cosechas anteriores los cuales recirculan nuevamente incrementando la materia orgánica en el suelo (García-Fayos, 2004).

El uso del suelo se constituye como una variable biofísica muy importante desde el punto de vista hidrometeorológico puesto que, expresando el tamaño del área que ocupan las diferentes categorías en que se subdivide las formas en que se usan los suelos, se puede inferir el comportamiento de algunos parámetros que participan en el balance hidrológico, como la escorrentía, caudal y la evapotranspiración. Para ello se utilizan las categorías que se muestran en tabla 2 y que se han utilizado como referencia en el presente estudio.

Tabla 2. Uso del suelo

USO DE SUELO
Agrícola
Agropecuario
Antrópico
Avícola
Conservación y Producción
Conservación y Protección
Cuerpo de agua
Forestal
Pecuario
Protección o Producción
Tierras improductivas

Fuente: MAGAP, (2002); IEE, 2013

Elaborado por: Cynthia Vaca Nuñez.

### 2.3. ESTIMACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO

El balance hídrico es la estimación de la cantidad de agua que circula en las diferentes capas de la envoltura geográfica: atmósfera, litósfera, hidrósfera o también, se ha definido como los cambios de almacenamiento de agua (suelo, vegetación, aguas subterráneas, lagos naturales y artificiales, etc.) (González, 1988). El balance hídrico se expresa mediante la ecuación 4:

$$P = Q + ET \pm \Delta S \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

**P:** precipitación

**Q:** escurrimiento

**ET:** evapotranspiración.

**$\Delta S$ :** almacenamiento

De esta manera se puede estimar el balance hidrológico dependiendo de la información disponible para cada cuenca entre las entradas: precipitación (P), trasvases de agua provenientes de otras cuencas, escorrentía superficial y recarga de aguas subterráneas de cuencas fronterizas y, las salidas: el escurrimiento (Q), la evapotranspiración (ET), la infiltración, exportaciones de agua a otras cuencas, así como descarga de aguas subterráneas a otras cuencas adyacentes. En

complemento, a ello se le debe adicionar el almacenamiento en aguas subterráneas, tanto por cambio de humedad como por almacenamientos superficiales (Monsalve, 1999). Entonces, la consideración de estas diferencias, dan a conocer la estabilidad o el equilibrio que presentan los recursos hídricos como componente esencial de la cuenca (Lvovitch, 1959). Dicho de otra manera, la ecuación 5 permite evaluar el recurso hídrico en base a las variables hidrológicas que determinan su comportamiento.

De esta manera, retomando a Monsalve (1999) el balance en superficie queda determinado por la ecuación 5:

$$P - R + R_s - E_s - T_s - I = S_s \quad \text{Ecuación 5}$$

Mientras que en el caso del balance hidrogeológico se define por:

$$I + G_1 - G_2 - R_g - E_g - T_g = S_g \quad \text{Ecuación 6}$$

Lo que es sumatoria de ambas ecuaciones anteriores:

$$P - R - (E_s + E_g) - (T_s + T_g) + (G_1 - G_2) = (S_s + S_g) \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

**P:** Precipitación

**R:** Escorrentía superficial

**E:** Evaporación

**T:** Transpiración

**I:** Infiltración

**S:** Almacenamiento

**G1:** Escorrentía subterránea entrante

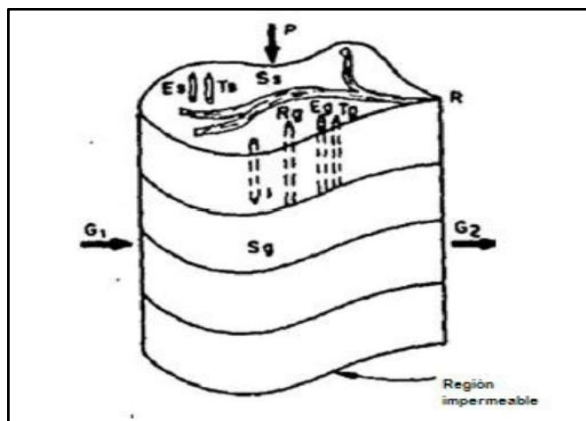
**G2:** Escorrentía subterránea saliente

**Rg:** Escorrentía subsuperficial que aparece como escorrentía superficial

**Subíndice s:** proceso de origen superficial

**Subíndice g:** proceso de origen subterráneo





**Figura 2.** Balance hidrológico en la cuenca.

**Fuente:** Monsalve (1999)

**Modificado:** Cynthia Vaca Nuñez.

Estas ecuaciones cuantifican la cantidad de agua desde el principio básico que presupone la ley de la conservación de la masa, a fin de medir la deficiencia y excedente hídrico (disponibilidad) como resultado de las constituyentes esenciales que intervienen en el balance hidrológico (Buttle, 1988).

### 2.3.1. Precipitación

Como expresión de los ingresos de agua a la cuenca, las lluvias o la precipitación es una variable fundamental del balance hidrológico. En forma de lluvia, llovizna, granizo o nieve, lo cierto es que su intensidad, durabilidad y frecuencia en el contexto local, están conducidas por la variación de dirección y velocidad del viento, así como por la incidencia de la altimetría donde según sea la ladera de barlovento o sotavento de las cordilleras o regiones montañosas, determinan el comportamiento de estos parámetros que la definen (Morejón et al., 2015)

A escala regional, continental o global, de manera general, responde a la circulación atmosférica, lo que, a su vez, son resultados de las diferencias de centros de presiones y la incidencia de la radiación solar (Olmo, 2020). Las regiones secas suelen ser zonas de altas presiones puesto que se produce la compresión y calentamiento de la superficie debido a la convergencia en altura. A diferencia de las zonas que presentan bajas presiones, donde se produce la expansión, condensación y enfriamiento de la superficie por efecto de convección y divergencia

en niveles superiores, siendo estas áreas de abundante precipitación (Inzunza, 2019).

La precipitación está directamente ligada al tipo de clima presente en la región y las condiciones meteorológicas locales y por ende, están estrechamente interrelacionadas a las masas de aire presentes en el lugar (Zuñiga & Crespo, 2010). En fin, la precipitación es una variable importante en el cálculo del balance hídrico, ya que sigue su proceso atmosférico y llega a la superficie terrestre, siendo el principal parámetro de entrada de aporte a la cuenca (Liang & Wang, 2019).

### **2.3.2. Temperatura**

La temperatura es una variable meteorológica que esencialmente expresa la rapidez del movimiento de las partículas que constituyen la materia. Ordoñez (2014) menciona que la temperatura también se puede definir como la cantidad de energía presente en el aire en un periodo determinado.

La temperatura tiene como unidad de medida más comunes la Escala Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ), la Escala Fahrenheit ( $^{\circ}\text{F}$ ) o la Escala Kelvin ( $^{\circ}\text{K}$ ). Las temperaturas generalmente se miden en máximas y mínimas, que son los valores más altos y más bajos registrados en un periodo de tiempo, por ejemplo, un día. También se establecen temperaturas medias según las diferentes temporalidades de referencia que serían medias aritméticas, por ejemplo, en un mes o año (Rodríguez et al., 2004). La altitud, latitud y la proximidad del mar son factores del clima que influyen en los cambios de temperatura (Ordoñez, 2014).

### **2.3.3. Humedad**

La humedad es la variable hidrometeorológica que expresa la cantidad de vapor de agua contenida en el aire. Para medir el contenido de humedad en la atmósfera se utilizan los parámetros de humedad absoluta o humedad relativa. Mientras la primera se define como la cantidad de masa de vapor de agua contenida en una unidad de volumen de aire o la densidad de ese vapor de agua que es medida en  $\text{gr}/\text{m}^3$ . La segunda es la proporción de vapor de agua real en el aire comparada con la cantidad de vapor de agua necesaria para la saturación a una misma

temperatura. Se mide en porcentaje donde cero significa un aire seco y 100% es un aire saturado en humedad (Inzunza, 2019).

#### **2.3.4. Infiltración**

Cuando el agua de la precipitación impacta la superficie terrestre puede ser transferida hacia los horizontes inferiores del suelo, proceso mediante el cual intervienen la morfología del relieve y la composición de los suelos. Este proceso es conocido como infiltración, en el cual, el agua que se infiltra puede estar ocupando total o parcialmente los poros del suelo y del subsuelo (Allen, 2007).

#### **2.3.5. Escorrentía**

El agua de las precipitaciones que no es evaporada ni infiltrada, escurre superficialmente en forma de:

- Escorrentía directa: el agua llega directamente a los cauces superficiales tras la precipitación. Esta escorrentía agrupa tanto la escorrentía superficial y la sub-superficial.
- Escorrentía basal: es la que alimenta a los cauces superficiales en época de estiaje (Ordoñez, 2014).

Una vez que se estima el volumen de agua que se infiltra mensualmente en una cuenca se determina que el agua restante es la que va a escurrir superficialmente, lo que se conoce como caudal o escurrimiento superficial (Bohn & Campo, 2010). Esta variable hidrológica resulta de notable importancia pues es una de las formas de agua que está disponible para todas las actividades antrópicas. Sus formas más frecuentes de alimentación son el exceso de lluvia, otras formas de precipitación o afloramientos de aguas subterráneas (Monsalve, 1999).

Existen un conjunto de factores geográficos o propiedades de otros constituyentes naturales que determinan el comportamiento de la escorrentía. La amplitud de la superficie y las condiciones de permeabilidad de los suelos influyen directamente sobre los niveles y la dinámica del escurrimiento superficial. De igual manera, la capacidad de infiltración de los suelos tiene una relación directa con su permeabilidad y por ende interfiere en los caudales de escorrentía o flujos de agua que se desplazan en la superficie conducidos por la gravedad (Monsalve, 1999).

### **2.3.6. Evapotranspiración**

La evaporación es el cambio que sufre el recurso hídrico de estado líquido a gaseoso. Este proceso sucede tanto en la superficie terrestre o marítima, ya que el cambio de temperatura es el causante de la evaporación del recurso convirtiéndola en vapor de agua (Allen, 2007). Pero la transmisión de agua a la atmósfera es un proceso más complejo que involucra distintas superficies. Cuando se combina tanto la evaporación de la superficie del suelo y la transpiración de las plantas se configura un fenómeno hidrometeorológico que se denomina evapotranspiración. Los usos más frecuentes en el estudio de tal fenómeno se le atribuye a la observación del cambio de energía y transferencia de humedad del suelo a la atmósfera ya que a través de su acción, se produce el intercambio de masa y energía desde la litósfera hacia el sistema atmosférico global (Segura-Castruita et al., 2017).

La determinación de esta variable hidrometeorológica es de difícil cuantificación, sobre todo por la ausencia de estaciones que permitan medir sus indicadores en el campo, por lo que resulta necesario deducir, el valor de la evapotranspiración potencial mediante fórmulas empíricas (Ordoñez, 2014). En todo caso, la evapotranspiración es una variable dependiente de otras variables hidrometeorológicas como la radiación, temperatura, velocidad del viento, humedad atmosférica y su efecto en la humedad del suelo, y el albedo. El comportamiento de estas variables reunidas determina las tendencias de la evapotranspiración (Figueira, 2019).

## **2.4. MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN**

Existen diferentes métodos tanto directos como indirectos para estimar la evapotranspiración. Los directos nos proporcionan información del consumo de agua utilizando aparatos que se puede comprobar directamente. Al contrario, en los métodos indirectos se emplean fórmulas empíricas para obtener los consumos de agua considerando varios parámetros representativos para determinar todo el ciclo vegetativo de la planta. En el presente trabajo se utilizaron métodos indirectos para el cálculo de la evapotranspiración potencial y real. A continuación, en la tabla

3, se presenta el detalle de los diferentes métodos indirectos que se utilizarán en el estudio.

**Tabla 3.** Métodos indirectos para el cálculo de la evapotranspiración

MÉTODOS INDIRECTOS	FORMULA	PARAMETROS
Thornthwaite	$ETP_{sc} = 16 \left( \frac{10t}{T} \right)^a Kd$	ETP <sub>sc</sub> =ETP mensual en mm/mes t= Temperatura media mensual °C I = indice de calor anual $i = \left( \frac{t}{5} \right)^{1.514}$
Penman-Monteith	$ET_p = \frac{0,408 \times \Delta \times (R_n - G) + \gamma \times \frac{900}{(T + 273)} \times U_2 \times (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 \times U_2)}$	ETO=Evapotranspiración de referencia mm/día R <sub>n</sub> =Radiación neta en la superficie del cultivo Mj m-2Día -1 O= Flujo de calor del suelo Mj m-2 día -1 T=Temperatura media del aire a 2m de altura °C u <sub>1</sub> =velocidad del viento 2 m de altura, m/s e <sub>s</sub> =Presión de vapor de saturación kPa e <sub>a</sub> =Presión de vapor kPa e <sub>s</sub> -e <sub>a</sub> = Deficit de presión de vapor kPa Δ = Pendiente de la curva de presión de vapor kPa °C-1 γ=Constante psicrométrica kPa °C-1
MODIS Y CRU	Basados en el empleo de fórmulas e imágenes de alta resolución que relacionan la evapotranspiración potencial con los factores climáticos de diferentes grado de dificultad en su obtención - temperatura, precipitación, radiación solar incidente, velocidad del viento, rendimiento de las cosechas, etc. que son procesadas con ayuda de software ArcGis, el cual permite manejar formato ráster, este formato divide en celdillas las imágenes para poder procesarlas y realizar modelaciones de procesos naturales.	

Elaborado: Cynthia Vaca Nuñez.

## 2.5. Estado del Arte

**Tabla 4.** Estado del arte

INVESTIGACIÓN	LUGAR Y AÑO	AUTOR (ES)	OBJETO DE ESTUDIO	RESUMEN	RESULTADO
<b>Caracterización hidrometeorológica y estimación del balance hídrico de la cuenca del río Chambo</b>	EPN-FICA, Quito, 2017	Quishpe, Ana	Contribuir con el uso y manejo de los recursos hídricos de la cuenca del río Chambo	En esta investigación se han interpretado diferentes factores tales como: cambio climático, geológico, hidrológico, vegetal y antrópico con el propósito de determinar la variación en el espacio de los elementos característicos del ciclo hidrológico y dar una descripción de la cuenca.	En la zona existe una gran variabilidad del clima debido a la influencia de la región Amazónica y de la topografía. La precipitación media de la cuenca es de 780 mm/año y tiene un comportamiento bimodal siendo el caudal líquido medio anual de 57.23 m <sup>3</sup> /s en el punto de cierre de la cuenca
<b>Caracterización hidrogeológica de la subcuenca del río Chambo</b>	Universidad Central del Ecuador, Quito, 2013	Naranjo, Luis	Caracterizar la subcuenca del río Chambo de acuerdo a parámetros hidrológicos meteorológicos, geomorfológicos, geológicos, geofísicos e hidrogeológicos	En el presente estudio se determinó la vulnerabilidad de los acuíferos de acuerdo a la metodología de GOD y DRASTIC.	La subcuenca del río Chambo, tiene una forma de ovalada alargada a rectangular alargada. La precipitación media de la subcuenca es de 1065 mm/año.
<b>Estudio del balance hídrico superficial de las cuencas hidrográficas, sector Jadán y Zhidman en el área de interpretación con el bosque y vegetación protectora Aguarongo (BVPA)</b>	Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca, Cuenca, 2017	Cajamarca, Ronald	Corregir y validar datos faltantes, evaluar caudales en los principales cauces de la red hídrica y analizar el comportamiento hídrico de las microcuencas.	La investigación busca estimar el balance hídrico sobre las microcuencas Chaquilcay y Mulacapana que interceptan con la superficie del BVPA, cantón Gualaceo. Se han estudiado cuatro estaciones meteorológicas del INAMHI, de las cuales se ocupó los datos mensuales de precipitación y temperatura con series temporales con más de 30 años, período (1982-2015).	La microcuenca Chaquilcay alcanza precipitaciones promedio anual de 843.7 mm, con una diferencia de almacenamiento de 18.7 mm que representa el 2.22% de precipitación total.
<b>Estudio hidráulico del río Chambo para la determinación de la conductancia entre río-acuífero y zonas de inundación</b>	Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba, 2018	Arias, Hernán Pérez, Miguel	Realizar el estudio hidráulico del río Chambo para la determinación de la conductancia entre río-acuífero y zonas de inundación.	El proyecto tiene como objetivo el estudio hidráulico del río Chambo, determinando conductividad y las zonas de inundación, es decir la eficacia con que los fluidos se van a transportar a través del suelo tanto del río al acuífero de Chambo y viceversa.	En la parte alta sector del puente vía a Chambo con un valor de 0.4249 m <sup>2</sup> / h y un caudal de interacción entre río - acuífero de 0.1955 m <sup>3</sup> / h, existe aporte del río hacia el acuífero, en la parte media sector del puente vía a Quimiag con un valor de 0.1826 m <sup>2</sup> / h y un caudal de interacción entre río-acuífero de 0.0292 m <sup>3</sup> /

<b>Balance hídrico superficial de la cuenca alta del río Pilcomayo</b>	Instituto de Hidráulica e Hidrología, UMSA, La Paz, 2005	de Molina, Jorge e Espinoza, Daniel	Evaluación de los recursos hídricos de la cuenca alta del río Pilcomayo por medio del balance hídrico de cuenca	Este proyecto fue el primer balance hídrico que abarcó todo el territorio boliviano. Se consideraron ocho grandes cuencas hidrográficas. El Balance Hídrico Superficial de Bolivia brinda información con carácter macroregional de los tres términos principales del balance: precipitación, evapotranspiración y escorrentía superficial, a nivel medio anual, en base a datos plurianuales de 1968-1982.	h, existe aporte del río hacia el acuífero y en la parte baja sector del puente vía a Penipe con un valor de $0.4999 m^2 / h$ y un caudal de interacción entre río-acuífero de $0.2300 m^3 / h$ , de igual forma existe aporte del río hacia el acuífero.	El CONAPHI planificó iniciar el Balance Hídrico de esta cuenca el año 2004, lo que coincidió con las actividades previstas por el Proyecto. Bajo estas condiciones, se suscribió un Convenio de cooperación técnica. La primera actividad a realizar en el marco de este convenio es el Balance Hídrico de la Cuenca del río Pilcomayo. Se decidió realizar primero el Balance de la Cuenca Alta del río, aguas arriba de Misión La Paz.
<b>Estimación del balance hídrico en una cuenca semiárida, El Mogor, Baja California, México</b>	Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada, México, 2014	de Del Toro, Francisco Kretschmar, Thomas Hinojosa, Alejandro	Llevar a cabo una cuantificación hidrogeológica integral en una zona semiárida silvestre del aporte que genera la subcuenca El Mogor hacia el flujo superficial del Valle de Guadalupe y la recarga a su acuífero.	El trabajo de investigación se efectuó en la subcuenca El Mogo en el Valle de Guadalupe (VG) en Baja California, México. Se realizó una caracterización integral, con el objetivo de hacer una cuantificación del aporte hidrogeológico de la subcuenca hacia el valle en el año hidrológico 2010 - 2011.	Se obtuvo una infiltración potencial generalizada en la subcuenca de $974\ 000 m^3$ y un escurrimiento de $86\ 000 m^3$ . Se estimó un volumen de $60\ 000 m^3$ . Finalmente, mediante fórmulas empíricas, se calculó una recarga de $466\ 000 m^3$ , que fue equivalente al 7% de la precipitación infiltrable en el año hidrológico en estudio.	

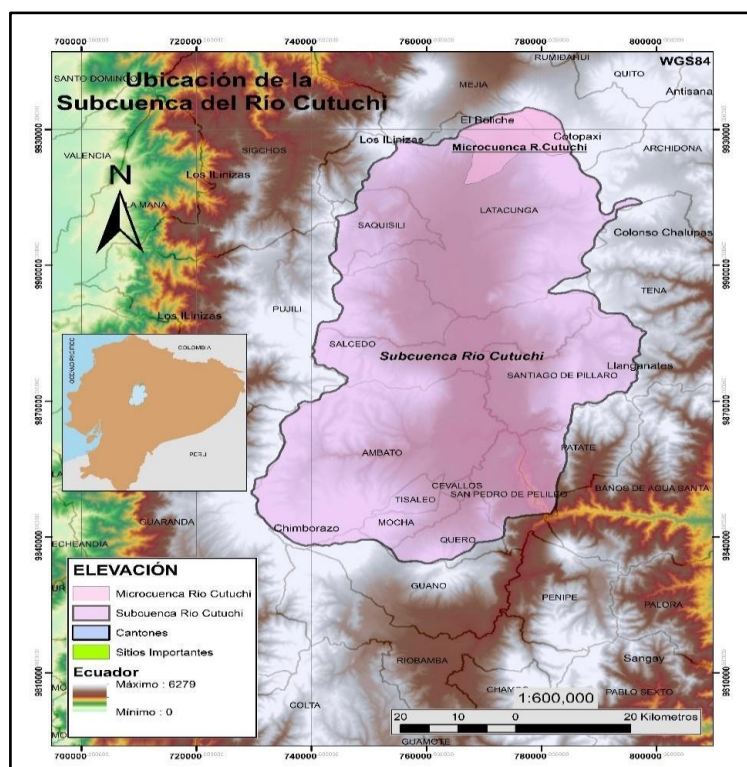
## CAPÍTULO 3

# METODOLOGÍA

En este capítulo se describe la localización geográfica y la caracterización de la subcuenca del río Cutuchi. Adicionalmente, se describe el proceso de obtención de los parámetros hidrometeorológicos y los métodos utilizados para la estimación de la evapotranspiración que será utilizada en el cálculo del balance hidrológico.

### 3.1. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA DE LA SUBCUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO CUTUCHI

La subcuenca del río Cutuchi está localizada en la provincia de Cotopaxi y en la provincia de Tungurahua, tiene una superficie de 4294 km<sup>2</sup>. Es una de las unidades hídricas perteneciente al gran sistema hidrográfico de la cuenca del río Pastaza y está bordeada al oeste y este por las estribaciones que pertenecen a la Cordillera Occidental y Cordillera Oriental del Ecuador, respectivamente (Bustamante, 2012).



**Figura 3.** Ubicación de la subcuenca del Río Cutuchi como componente del sistema Pastaza.

**Elaborado:** Cynthia Vaca Nuñez.



En la tabla 5, se muestra el porcentaje de área de la subcuenca que ocupa en los diferentes cantones de las provincias de Cotopaxi y Tungurahua.

**Tabla 5.** Área de la subcuenca distribuida en las provincias.

<b>Cantón</b>	<b>Provincia</b>	<b>Área</b>	<b>% Área que ocupa</b>
LATACUNGA	Cotopaxi	1274	29.7
PUJILÍ	Cotopaxi	303	7.06
SALCEDO	Cotopaxi	485	11.3
SAQUISILÍ	Cotopaxi	197	4.6
AMBATO	Tungurahua	1021	23.8
CEVALLOS	Tungurahua	17	0.4
MOCHA	Tungurahua	81	1.9
PATATE	Tungurahua	126	2.9
QUERO	Tungurahua	152	3.5
SAN PEDRO DE PELILEO	Tungurahua	148	3.4
SANTIAGO DE PÍLLARO	Tungurahua	432	10
TISALEO	Tungurahua	58	1.4
<b>TOTAL</b>		<b>4294</b>	<b>100</b>

Elaborado por: Cynthia Vaca Nuñez

## **3.2. CARACTERIZACIÓN DE LA SUBCUENCA**

### **3.2.1. Hidrología**

El río principal, Cutuchi, por el que lleva el nombre la cuenca, nace en el lado occidental del volcán Cotopaxi, llegando hasta el cantón Píllaro, en la provincia de Tungurahua. Su cauce tiene una longitud de 86 km, y realiza un recorrido por las zonas cercanas a Saquisilí, Lasso, Pujilí ubicadas en el extremo sur de Latacunga (figura 4). Este río es uno de los principales ejes hidrográficos de la zona central de la Sierra ecuatoriana, y se considera una de las principales fuentes de abastecimiento hídrico de la zona y uno de los elementos de mayor importancia para investigación por sus usos principalmente en el riego, la industria y el consumo humano convirtiéndola en una fuente vulnerable.

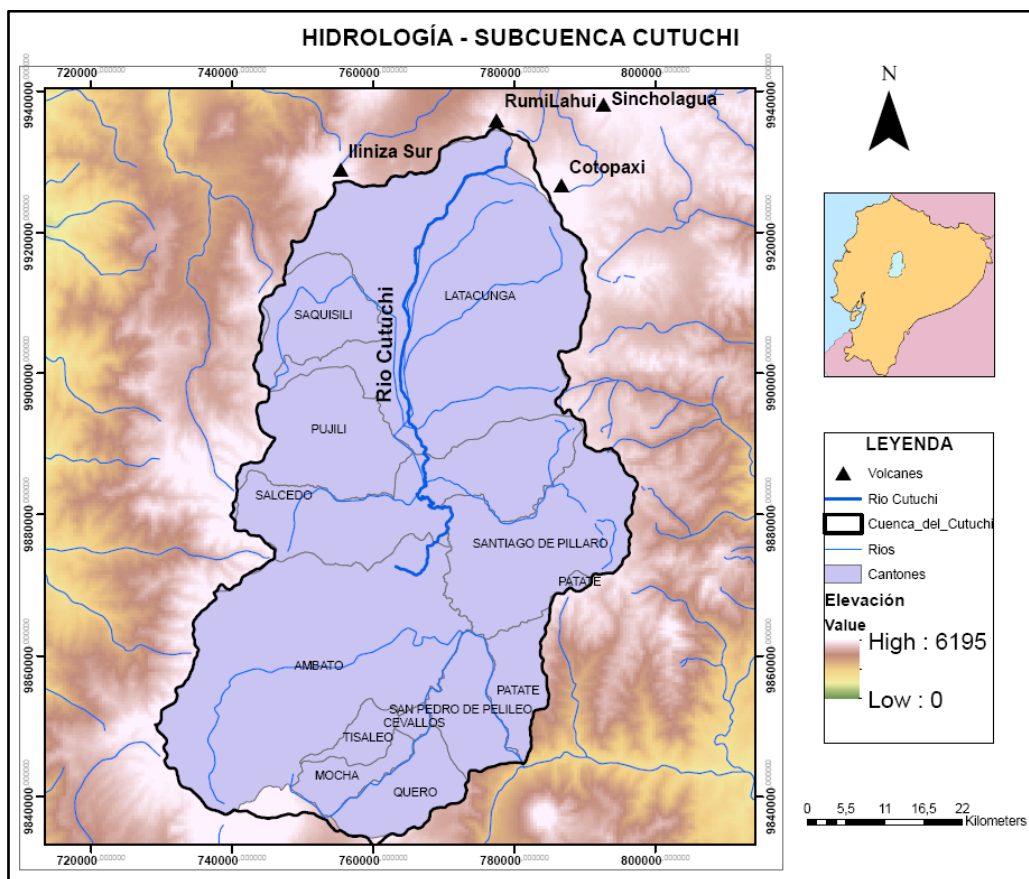


Figura 4. Hidrología en la subcuenca del Río Cutuchi.

Elaborado: Cynthia Vaca Nuñez.

### 3.2.2. Geología y relieve local

El estudio de Taco & Galarraga-Sánchez (2002) muestran que el substrato geológico que subyace la superficie que ocupa la subcuenca del río Cutuchi, está constituido por varias formaciones geológicas que muestran diferenciación litológica. En primer lugar, la formación Pisayambo corresponde a una cobertura volcánica que descansa sobre basamento metamórfico de edad Miocénica. Luego se encuentra la formación Latacunga que es una unidad volcánica formada por lahares, brechas y lavas. Está sobrepuesta por otra unidad sedimentaria con depósitos que provienen de procesos fluviales correspondientes al Plioceno. Todo ello está cubierto por otra unidad litológica que forma el volcán Chalupas que, de gran tamaño territorial, está cubierto con abundante material piroclástico. Por último, de menor superficie, también aparecen depositadas areniscas tobáceas y depósitos piroclásticos retrabajados que son indicativos de la formación Cangahua.

La morfogénesis de la subcuenca muestra una acción fluvial-volcánica, donde no solo intervinieron los procesos fluviales sino también la participación de eventos geológicos de frecuentes desplazamientos de grandes lahares y flujos piroclásticos que erosionaron el valle fluvial y que participaron en el modelaje de la morfoescultura de la zona y en sí de la cordillera andina del Ecuador (Andrade et al., 2005). En otras palabras, la geomorfología que caracteriza esta subcuenca es de origen volcánico, conformada por piroclastos y material laharítico (Recalde, 2002). La acción fluvial ha sido intensa y perenne durante la historia geológica, permitiendo ubicar esta cuenca una morfoescultura de las más singulares del relieve fluvial-andino del centro del Ecuador.

Desde el punto de relieve, el origen de la corriente principal de la subcuenca se deriva de los deshielos del volcán Cotopaxi a 5897msnm para luego seguir su curso y confluir con el río Ambato a una altura de 2400 msnm. Así el cálculo de la pendiente media en la subcuenca hidrográfica alcanza 8.8%, y la diferencia altimétrica alcanza 3497 metros (CNRH et al., 2002).

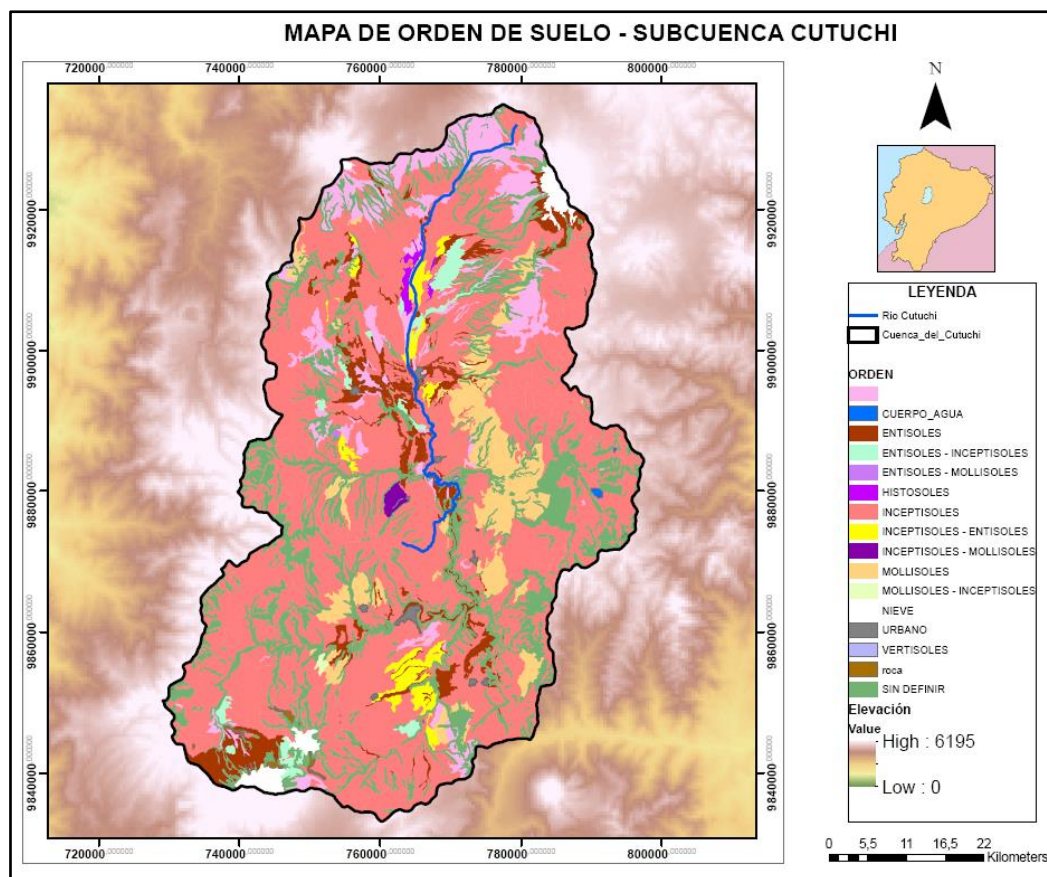
### **3.2.3. Suelos**

Los suelos han sido identificados del mapa de suelos a escala 1:250000 del Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca - MAGAP (SIGAGRO). La cuenca presenta depósitos de suelos franco-arenosos, poco profundos con un pH neutro o ligeramente ácidos de color negro, los cuales son resultado de depósitos o residuos de la meteorización de una capa de Cangahua que, es el substrato formado por materiales volcánicos depositados. Es común, entonces, encontrar compuestos químicos fundamentales de su composición como silicatos, vidrio volcánico, feldespatos, cuarzo, hornblenda, hiperstena, augita y magnetita; los cuales, han sido permanentemente descargados a través de los ejes de drenaje del callejón interandino.

De ahí que la mayoría de estos suelos correspondan al orden inceptisoles con predominancia del suborden andepts por provenir de la meteorización de rocas ígneas (Mayorga, 2013). Además, localizados en la parte alta y media de la cuenca, donde predominan pendientes fuertes mayores a 40%, se caracterizan por ser suelos pocos profundos, arenosos y poco desarrollados. A ello se le puede adicionar que son portadores de mayor exposición a la erosión hídrica y eólica,

donde condiciones de mayor vegetación inhiben los procesos erosivos y le confiere mayores niveles de materia orgánica.

Sin embargo, los entisoles también están presentes en una pequeña superficie que no supera el 3% de la cuenca. En este caso se trata de suelos de ceniza arenosa profunda, arena media gruesa de más de 0.5 mm o menos de 2 mm. En la figura 5 se puede apreciar los tipos de orden de suelo presente en la zona de estudio.



**Figura 5.** Mapa de suelos en la subcuenca del Río Cutuchi.

**Elaborado:** Cynthia Vaca Nuñez.

### 3.2.4. Cobertura y uso del suelo

Al observar la diferenciación espacial de la cobertura y el uso del suelo en la cuenca, se hace evidente un área predominante de más de 2700 km<sup>2</sup> que corresponde a páramos andinos. Lo que está expresando este valor, es una ocupación de vegetación arbustiva y herbácea que, propia de la biomasa de los parajes más altos la cordillera andina, representa el 65% de la unidad espacial. Se observa también un 0,5% dedicado a una ocupación de tipo agropecuario-forestal.

Se pueden agrupar aquellas coberturas de tipo agropecuarias. En la tabla 6 se observa que, reuniendo usos agrícolas, pecuarios y su combinación con acciones de protección, forestal o aquellas de tipo mixtas; se alcanzan espacios que cubren 1007.9 km<sup>2</sup>. En este caso se trata del 23% del espacio geográfico de la cuenca, donde se despliegan actividades primarias, ya sea de tipo propiamente agrícolas o de actividad ganadera. En cualquier caso, se tiene, además, 261 km<sup>2</sup> de cobertura boscosa. Ya sea de uso forestal, de protección o intercalando escasa actividad pecuaria, apenas significan poco más del 6% de la superficie.

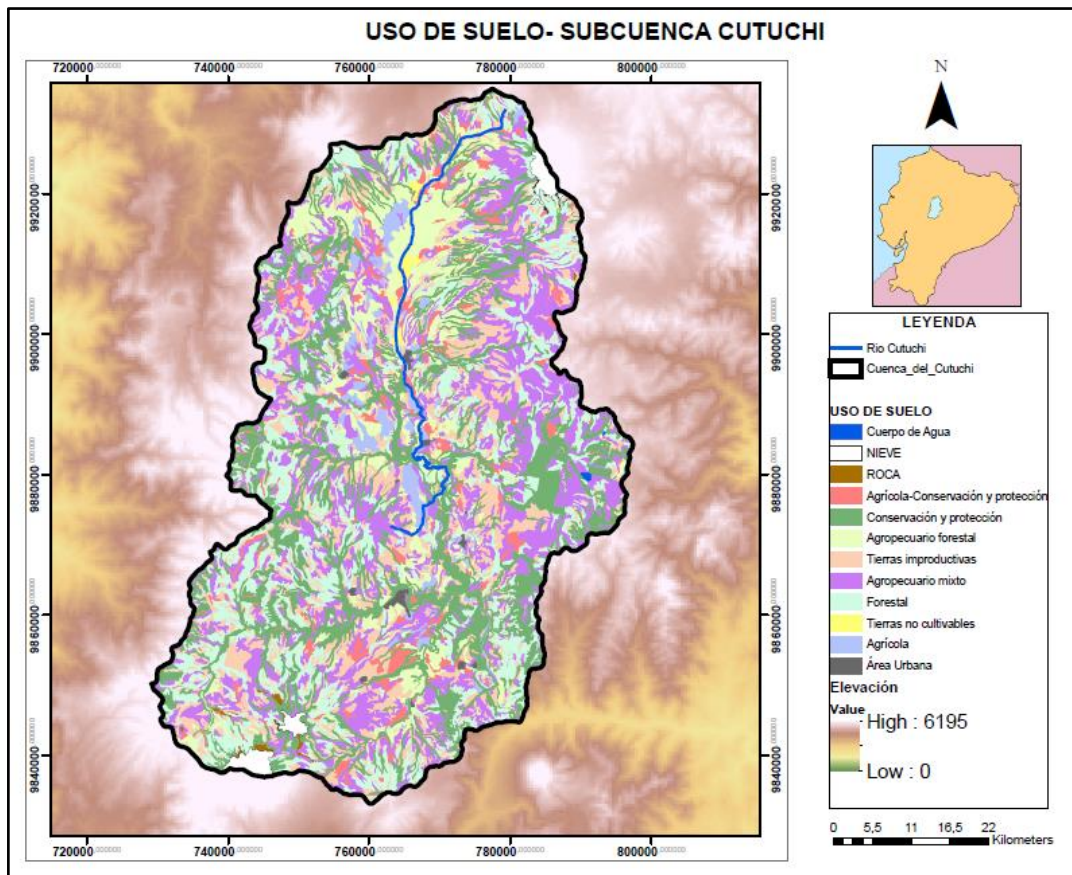
**Tabla 6.** Cobertura y uso del suelo en la cuenca del Río Cutuchi.

<b>Cobertura</b>	<b>Uso</b>	<b>Área (Km<sup>2</sup>)</b>	<b>Uso (%)</b>
Área erosionada	Tierras Improductivas	209.6	4.88%
Bosques (Tierra Forestal)	Agropecuario Forestal	2.1	0.05%
Bosques (Tierra Forestal)	Conservación y protección	230.6	5.37%
Bosques (Tierra Forestal)	Forestal	28.4	0.66%
Agropecuarias	Agrícola	465.6	10.84%
Agropecuarias	Agrícola - conservación y protección	51.2	1.19%
Agropecuarias	Agropecuario Mixto	247.4	5.76%
Agropecuarias	Agropecuario Forestal	7.6	0.18%
Agropecuarias	Pecuario	134.5	3.13%
Agropecuarias	Pecuario - Conservación y Protección	101.6	2.37%
Páramo	Conservación y protección	2776.3	64.66%
Páramo	Agropecuario Forestal	23.5	0.55%
Área Urbana	Antrópicos	13.6	0.32%
Cuerpo De Agua Natural	Cuerpos de Agua	2.2	0.05%
<b>Total</b>		<b>4294</b>	<b>100.00%</b>

**Fuente:** Mapa de Cobertura y Uso de la Tierra del Ecuador Continental. Escala 1:250000, Año 2002. Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca - MAGAP, SIGAGRO.

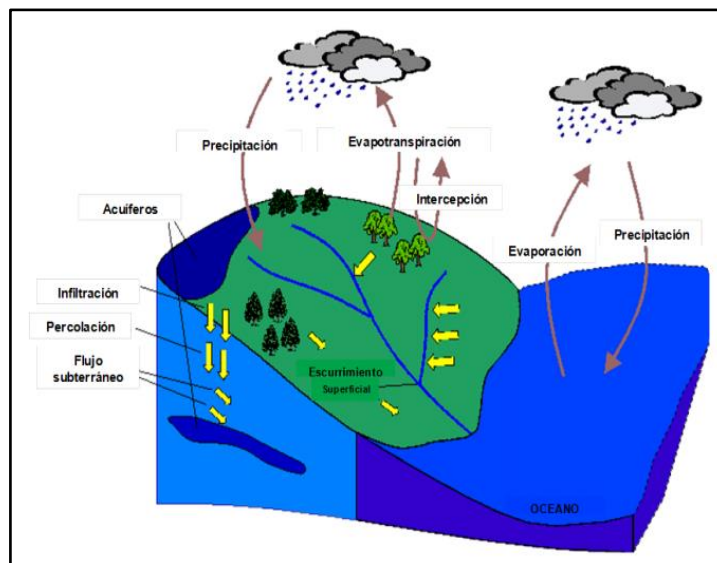
**Elaborado por:** Cynthia Vaca Nuñez

Asimismo, 209 km<sup>2</sup> que corresponden al casi 5% de la cuenca, se identifica el área de suelos considerados improductivos o erosionados. Por último, se presentan las superficies urbanizadas y los cuerpos de agua existentes en la cuenca con espacios que alcanzan los 13.6 km<sup>2</sup> y 2.2 km<sup>2</sup>, lo cual corresponde a usos que significan apenas el 0.3% y 0.05% de la superficie respectivamente (figura 6).



**Figura 6.** Mapa de uso de suelos en la subcuenca del Río Cutuchi.  
**Elaborado:** Cynthia Vaca Nuñez.

### 3.3. ESTIMACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO



**Figura 7.** Parámetros hidrometeorológicos en el balance hídrico.  
**Fuente:** Tomado de (Ordoñez, 2014)

Tal como se mencionó en la sección 2.3, la evaluación de los recursos hídricos se puede realizar mediante la aplicación de la ecuación general del balance hídrico. Considerando la información disponible de la zona; entradas de agua a la cuenca como precipitación (P) y las salidas como: el escurrimiento (Q) y la evapotranspiración (ET). El almacenamiento se desprecia pues la escala temporal a aplicar la ecuación del balance hídrico es anual, por lo que, teóricamente, el sistema está en equilibrio.

$$P = Q + ET \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde:

**P**= precipitación

**Q**= escurrimiento

**ET**= evapotranspiración

### **3.4. PARÁMETROS HIDROMETEOROLÓGICOS**

#### **3.4.1. Precipitación local**

En la cuenca de estudio, las principales fuentes de agua se subdividen en aquellas que se originan en la atmósfera o por el descongelamiento del glaciar que se emplaza en la parte alta del volcán Cotopaxi. De esta manera, el agua puede encontrarse en diferentes estados: sólida como nieve, granizo o rocío que son provocadas por cambios de presión o temperatura o en forma de gotas en la lluvia o ligeras lloviznas bajo condiciones climáticas favorables.

##### **3.4.1.1. Obtención y manejo de datos hidrometeorológicos**

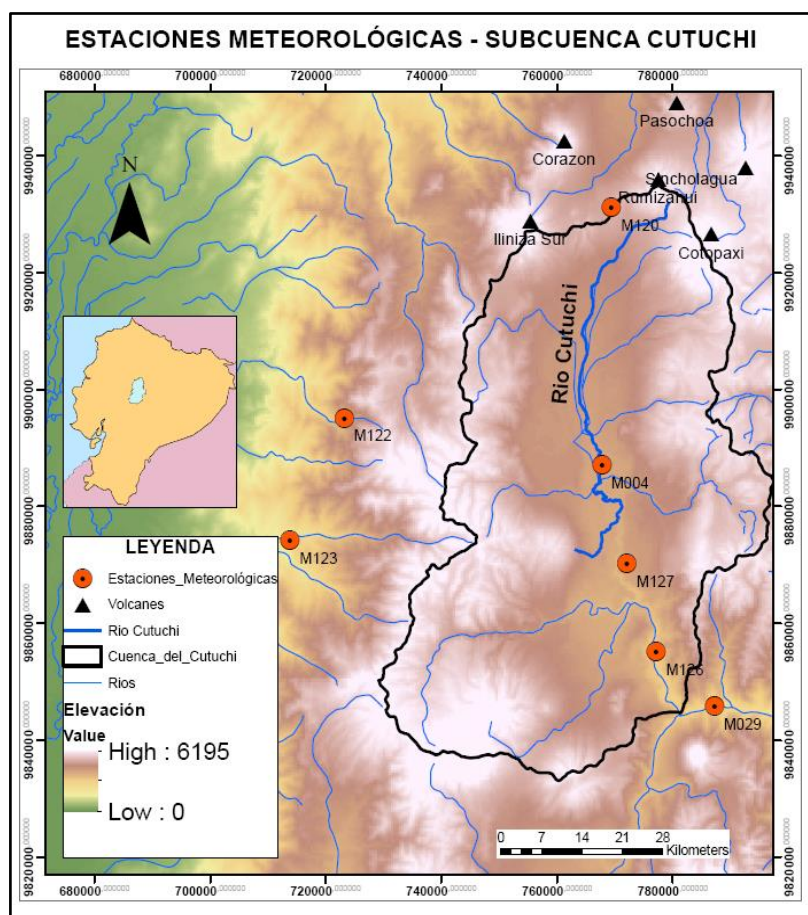
Se trabajó con datos que registra y procesa el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI). Se identificaron un conjunto de estaciones meteorológicas que se localizan próximas espacialmente en el contexto geográfico de la cuenca y que cuentan con la información de precipitación mensual. La información que proporcionan dichas estaciones se complementa con la cartografía digital o mapas creados a partir de paquetes computacionales que forman parte de sistemas de información geográficos como ArcGIS. En la tabla 7, se enumeran las estaciones

meteorológicas utilizadas para la obtención de los datos de precipitación en la subcuenca del río Cutuchi.

**Tabla 7.** Estaciones meteorológicas de la zona de estudio.

Estación	Código	Provincia	Estado	Propietario	Altitud (m.s.n.m)
Rumipamba-Salcedo	M0004	Cotopaxi	Activa	INAMHI	2680
Baños	M0029	Tungurahua	Activa	INAMHI	1695
Cotopaxi	M0120	Cotopaxi	Activa	INAMHI	3510
Pílalo	M0122	Cotopaxi	Activa	INAMHI	2504
El Corazón	M0123	Cotopaxi	Activa	INAMHI	1471
Patate	M0126	Tungurahua	Activa	INAMHI	2220
Píllaro	M0127	Tungurahua	Activa	INAMHI	2793

Elaborado por: Cynthia Vaca Nuñez.



**Figura 8.** Parámetros hidrometeorológicos en el balance hídrico.

Elaborado por: Cynthia Vaca Nuñez.



### 3.4.1.2. Relleno y Validación de Datos de Precipitaciones

Para poder llevar a cabo la caracterización de esta variable, se procedió a agrupar las estaciones verificando la disponibilidad de información y comprobando si las variables están o no correlacionadas mediante el método de análisis de doble masa con el objetivo de realizar el relleno de datos faltantes en base a la proximidad entre las estaciones y determinar la confiabilidad de la información. Se utilizó el software R, que permite llevar a cabo el procesamiento y análisis estadístico de datos. En este estudio se tomó en cuenta las series cuyo coeficiente de correlación sea  $R > 0.7$ .

Como se observa en la tabla 8 se muestra los pares de estaciones correlacionadas las mismas con  $R \geq 0.7$  este valor describe un rango de correlación positiva establecida dentro de las estadísticas como coeficiente confiable.

**Tabla 8.** Pares de estaciones meteorológicas con su coeficiente de correlación.

<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>R</b>
<b>M004</b>	M0120	0,7
<b>M0123</b>	M0122	0,9
<b>M004</b>	M0126	0,7
<b>M0126</b>	M0029	0,7

Elaborado por: Cynthia Vaca Nuñez.

Los pares de estaciones que presentaron mayor coeficiente de correlación, por ende, tienen una relación lineal entre ellas y consecuentemente se utiliza la ecuación correspondiente a la recta de regresión para el relleno de datos faltantes como se expresa en la tabla 9.

**Tabla 9.** Ecuación correspondiente a la recta de regresión para cada estación.

<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>R</b>	<b>Ecuación</b>
<b>M004</b>	M0120	0.7	$y=52.8+1.02x$
<b>M0123</b>	M0122	0.9	$y=7.38+0.46x$
<b>M004</b>	M0126	0.7	$y=31.75+0.43x$
<b>M0126</b>	M0029	0.71	$y=129.74+0.32x$

Elaborado por: Cynthia Vaca Nuñez.

### 3.4.1.3. Clasificación de estaciones meteorológicas

Previo a realizar la correlación y relleno de datos, se analizó la cantidad de datos disponibles y faltantes de cada estación, y se estableció el siguiente criterio de clasificación de estaciones.

**Tabla 10.** Criterio de clasificación de estaciones según disponibilidad de datos.

<b>Clase</b>	<b>Años de registro</b>
A	mayor a 20 años
B	entre 10 y 20 años
C	entre 5 y 10 años
D	menor a 5 años

Elaborado por: Cynthia Vaca Nuñez.

De acuerdo con los criterios de la tabla 10, se realizó la clasificación de cada una de las estaciones de la zona de estudio, estableciéndose de la siguiente manera (tabla 11):

**Tabla 11.** Clasificación de estaciones según disponibilidad de datos

<b>Código</b>	<b>Nombre</b>	<b>Años de registro</b>	<b>Clase</b>
M004	Rumipamba-Salcedo	2008-2018	B
M0120	Cotopaxi-Clirsen	2008-2014	C
M0127	Píllaro	2008-2014	C
M0122	Pilaló	2008-2015	C
M0123	El Corazón	2008-2017	B
M0029	Baños	2015 y 2017	B
M0126	Patate	2008-2015	C

Elaborado por: Cynthia Vaca Nuñez.

Adicionalmente, se identificaron los datos disponibles de la precipitación diaria de cada una de las estaciones, número de datos existentes, el porcentaje de datos faltantes, los valores mínimos y máximos de precipitación, el valor promedio, su desviación estándar y la presencia o no de estacionalidad, tal como se muestra en la tabla 12. Los años de registro varían en cada estación, por ende, el porcentaje de datos vacíos se estableció en base a los años de registro de cada estación. En el Anexo 1, se muestra los valores medios diarios de precipitación registrados en cada una de las estaciones.

**Tabla 12.** Datos disponibles en las estaciones, porcentajes de datos vacíos, valores máximos (max), mínimos (min), media aritmética (med) y desviación estándar de la precipitación (SD).

Código	Años de registro		% vacíos	max	min	med	SD
	desde	hasta					
<b>M0004</b>	2008	2018	0	54	0	1.5	3.9
<b>M0120</b>	2008	2014	0.6	49.8	0	3.4	5.7
<b>M0127</b>	2008	2014	14.9	30.6	0	1.5	2.9
<b>M0122</b>	2008	2015	2.7	73.4	0	3.4	6
<b>M0123</b>	2008	2017	0	133.7	0	6.9	12.4
<b>M0029</b>	2008	2018	27.3	47.7	0	3.8	6
<b>M0126</b>	2008	2015	2	59.5	0	1.7	3.9

Fuente: INAMHI  
Elaborado por: Cynthia Vaca

#### 3.4.1.4. Agrupación de estaciones meteorológicas

La precipitación es un fenómeno de notable implicación geográfica que generalmente ha sido caracterizado por su alta variabilidad espacio - temporal (Tapia, 2016). Su comprensión lo más detallada posible, se considera un asunto esencial para estimar, o incluso pronosticar, que ha sucedido con los aportes de agua y la disponibilidad hídrica en una cuenca.

La precipitación varía en espacio y tiempo de acuerdo con un patrón general de circulación atmosférica. Esta variación define el año hidrológico mismo que consiste en determinar los meses de mayor y menor precipitación (Chow et al., 1994). Los criterios que se detallan en los métodos para la agrupación de estaciones hidrométricas permiten comprobar la existencia de dos tipos de regímenes estacionales: de una estación de menor lluvia a otra de abundantes precipitaciones y luego, una nueva estación con menor lluvia nuevamente.

Es así que, de acuerdo al comportamiento observado de la lluvia, los meses que implican y su duración en el año, permiten establecer grupos que quedan segregados de la siguiente manera:

- **Grupo 1:** Este grupo tiene una característica bimodal, su primer periodo húmedo representativo es en los meses de marzo-mayo y el segundo en los meses de octubre-diciembre.

- **Grupo 2:** Tiene una característica bimodal, se caracteriza por comprender los picos más altos en los meses de abril y diciembre.
- **Grupo 3:** De característica unimodal, donde el pico más alto de humedad en el mes de julio.
- **Grupo 4:** De característica bimodal, en los meses marzo-julio es el primer periodo representativo húmedo y en los meses de septiembre-diciembre el segundo periodo de lluvias.

Tomando en cuenta los grupos mencionados anteriormente, se agruparon a las estaciones meteorológicas según los patrones similares de comportamiento de lluvia en determinados meses del año, identificando los valores mínimos y máximos de precipitación para definir si existe una distribución bimodal o unimodal, tal como se muestra en la tabla 13.

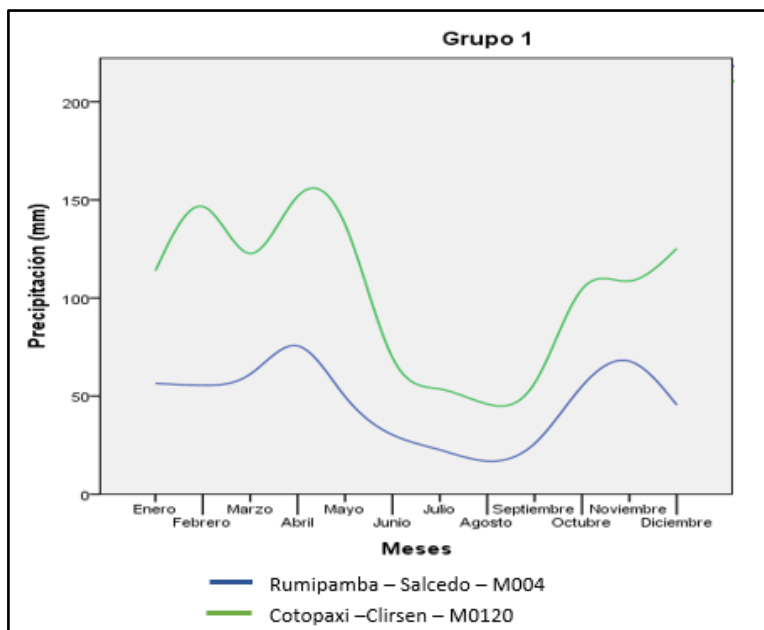
**Tabla 13.** Agrupación de estaciones según régimen de precipitación.

<b>Grupo</b>	<b>Código</b>	<b>Nombre</b>
Grupo 1	M004	Rumipamba-Salcedo
	M0120	Cotopaxi-Clirsen
	M0127	Píllaro
Grupo 2	M0122	Pilaló
	M0123	El Corazón
Grupo 3	M0029	Baños
Grupo 4	M0126	Patate

Fuente: INAMHI

Elaborado por: Cynthia Vaca Nuñez.

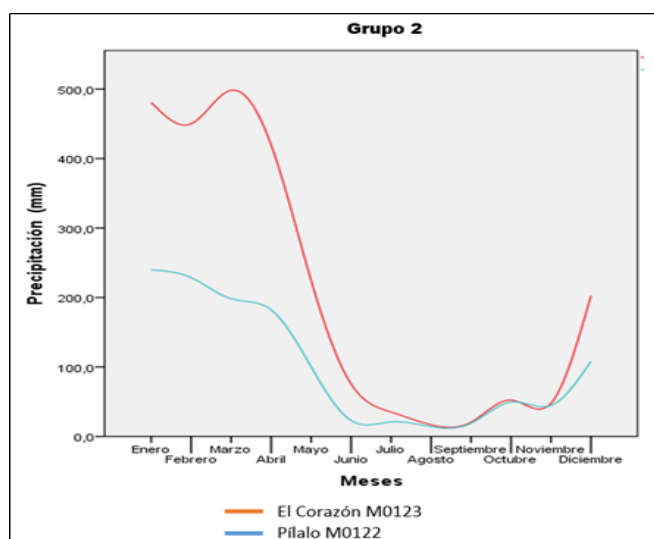
En el grupo 1 se agruparon a las estaciones de Rumipamba-Salcedo (M004), Cotopaxi-Clirsen (M0120) puesto que presentan un comportamiento similar. Los valores pico de precipitación se producen en los meses de abril y posteriormente en el mes de noviembre, se evidencia así su característica bimodal. La precipitación varía de 20 a 150 mm, ver figura 9.



**Figura 9.** Distribución temporal de precipitación del grupo 1.

**Elaborado por:** Cynthia Vaca Nuñez.

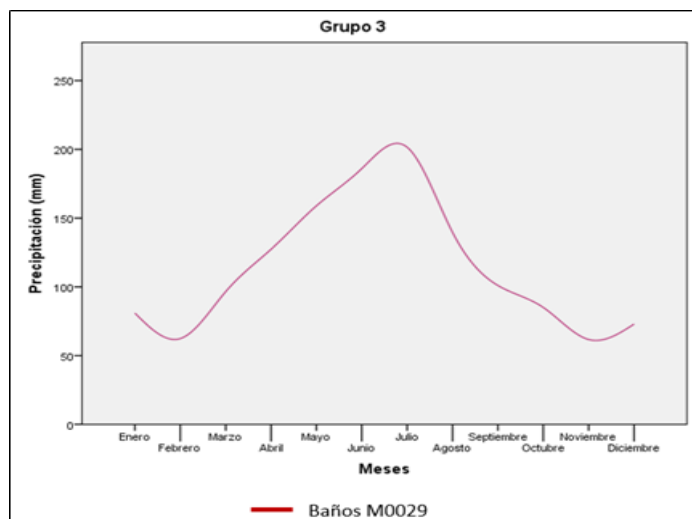
Las estaciones Pilaló (M0127) y El Corazón (M0123) pertenecen al grupo 2, puesto que existe un régimen marcado en la tendencia o comportamiento que sigue la lluvia, comprendiendo dos estaciones. Se caracterizan por la presencia de picos más altos de lluvia en los meses de abril y diciembre. La precipitación media mensual varía en el rango de 14.1 a 498.3 mm, siendo la estación El Corazón (M0123-1471 m.s.n.m) la que presenta mayores valores de precipitación. Ambas presentan un régimen bimodal como se puede notar en la figura 10.



**Figura 10.** Distribución temporal de precipitación del grupo 2.

**Elaborado por:** Cynthia Vaca Nuñez.

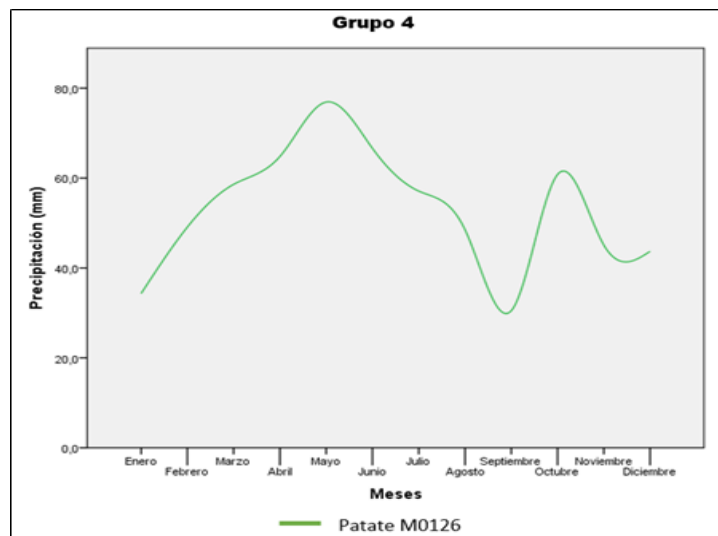
En el grupo 3, se encuentra la estación Baños (M0029), donde se registra precipitaciones medias mensuales de 61.7 a 201.5 mm. Como se visualiza en la figura 11, el comportamiento es unimodal siendo una característica principal de las zonas orientales de la cuenca. Esta variación se debe a la influencia que ejerce el clima de la región amazónica en la zona de estudio.



**Figura 11.** Distribución temporal de precipitación del grupo 3.

**Elaborado por:** Cynthia Vaca Nuñez.

En el grupo 4, se encuentra la estación Patate (M0126), cuya precipitación media mensual varía en el rango de 30.5 a 72.5 mm como cotas más bajas y altas que se producen en los meses de septiembre y mayo respectivamente (figura 12). La estación lluviosa se extiende de marzo a julio. En los meses de septiembre a diciembre se ubica una estación caracterizada por los menores registros de precipitaciones. Sin embargo, en octubre presente un pico de lluvia, en promedio menor a 60 mm. De esta manera, el régimen de esta variable tiene un comportamiento bimodal.



**Figura 12.-** Distribución temporal de precipitación del grupo 4.

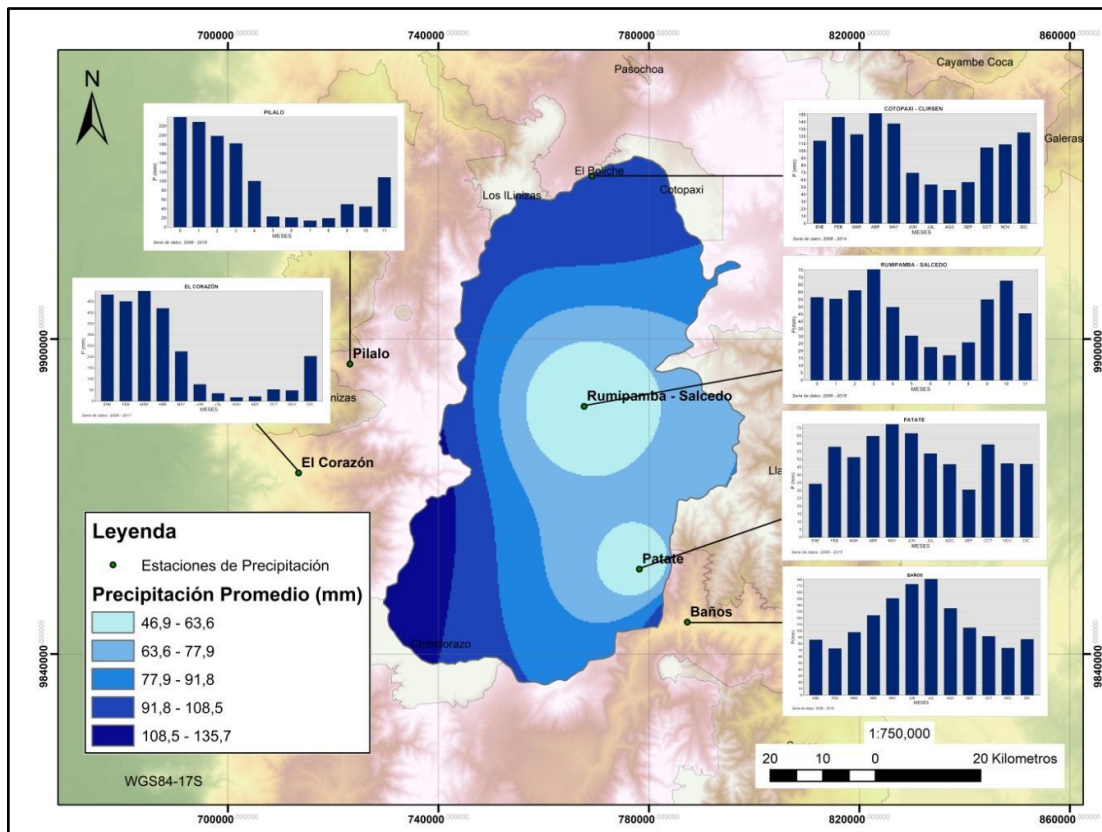
**Elaborado por:** Cynthia Vaca Nuñez.

Como se pudo notar en las estaciones pertenecientes al grupo 1, 2 y 4 el patrón de distribución de precipitación es similar identificándose dos periodos de altas precipitaciones, la diferencia entre cada grupo radica en los meses en los cuales se presentan los picos. Existe esta diferencia debido a la localización geográfica, ya que las estaciones de dichos grupos se ubican en la zona oriental y occidental respectivamente. Por el contrario, la estación Baños presenta un solo periodo de altas precipitaciones.

#### **3.4.1.5. Distribución espacial de la precipitación media mensual**

La precipitación es un fenómeno caracterizado por su alta variabilidad geográfica en el contexto de la cuenca hidrográfica. En la figura 13, se muestra la diferenciación espacial de la precipitación en la subcuenca de estudio. Para esto se utilizó la precipitación media mensual en el período 2008-2011 de cada una de las estaciones meteorológicas y mediante el método de interpolación IDW (Inverse Distance Weight). Se realizó un mapa de isoyetas, el mismo que ha sido creado usando los programas AutoCAD y ArcGIS. En la subcuenca se registran precipitaciones medias mensuales que varían de 46.9 mm a 135.7 mm. Además, se visualiza una distribución desigual de precipitación con cotas que superan los 108 mm al suroeste de la subcuenca, esto evidencia que son zonas donde se emplaza los mayores ingresos de agua. En contraste, en la medida que se transita

hacia el centro, sur y este de la cuenca las precipitaciones medias mensuales disminuyen. Se aprecia que los meses más húmedos son: enero a abril y los de menos lluvia se ubican de junio a septiembre.



**Figura 13.** Precipitación media mensual en la cuenca del río Cutuchi  
**Elaborado por:** Cynthia Vaca Nuñez.

### 3.4.1.6. Distribución espacial de la precipitación media anual

La distribución de la precipitación media anual en la subcuenca Cutuchi se realizó con los datos disponibles recopilados para el periodo 2008-2011. La tabla 14 muestra los valores de precipitación media anual en cada una de las estaciones. En la zona de estudio se tienen precipitaciones que van desde 483 mm a 3223 mm al año.



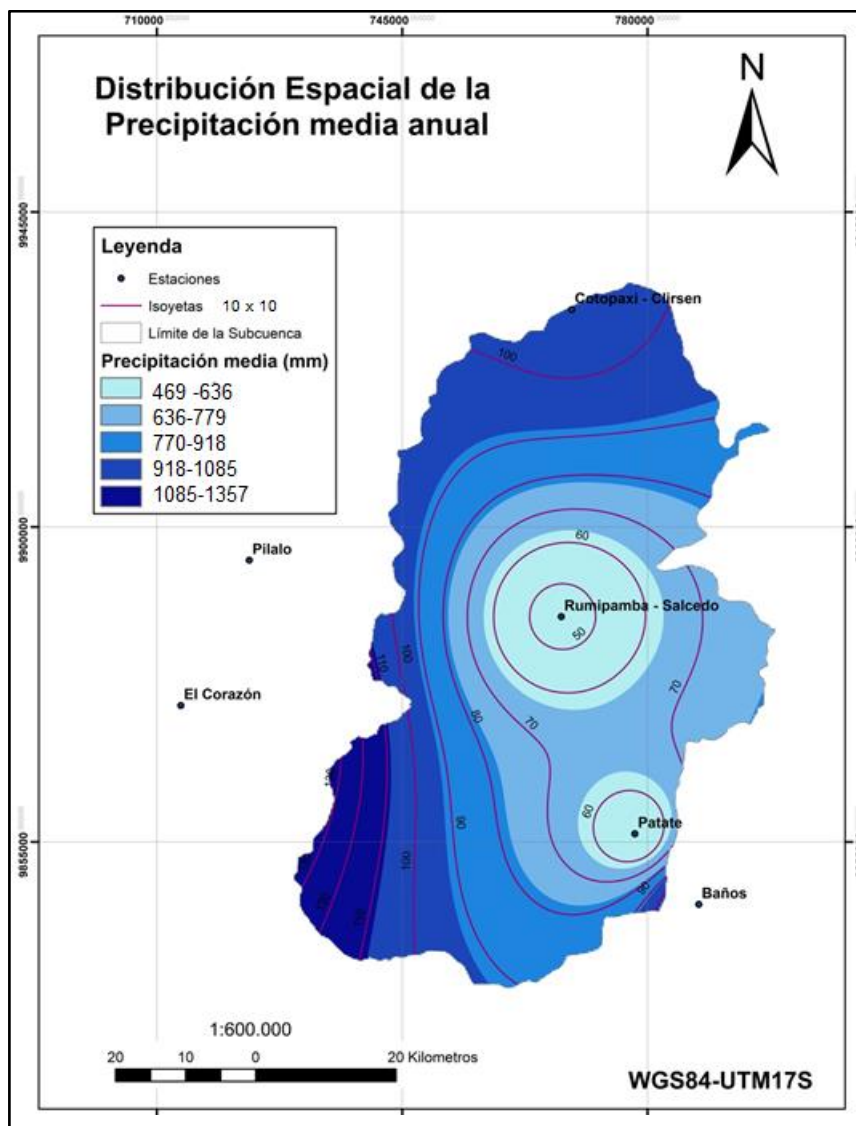
**Tabla 14.** Precipitaciones medias anuales según años en el periodo 2008-2011.

<b>Estaciones</b>	2008	2009	2010	2011
Rumipamba- Salcedo	864	483	594	719
Baños	1532	1189	1305	1241
Cotopaxi	1383	1198	1305	1351
Pilaló	1580	1030	1205	1423
El Corazón	3223	2194	2532	2495
Patate	856	559	734	763

Elaborado por: Cynthia Vaca Nuñez

De todas las estaciones, se destaca la estación de El Corazón ya que registra los valores más altos de precipitación superando los 2100 mm/año. En contraste, los lugares que proporcionan los menores acumulados de lluvia se ubican en las estaciones de Rumipamba-Salcedo y Patate. La precipitación es inferior a 1000 mm de lluvia al año. Para el resto de las estaciones, Baños, Pilaló y Cotopaxi se registran precipitaciones superiores a los 1000 mm/año. Adicionalmente, se tiene que en el año 2008 se produce el máximo de precipitaciones acumuladas alcanzando valores de 3223 mm/año siendo un año particularmente intenso en toda el área.

A partir de estos valores se calculó la distribución anual que presenta la lluvia en el contexto de la cuenca mediante el uso de la interpolación en ArcGIS (figura 14). Las precipitaciones con los mayores valores se ubican en toda la franja oeste de la cuenca donde las cotas medias de la lluvia anual sobrepasan los 918 mm.

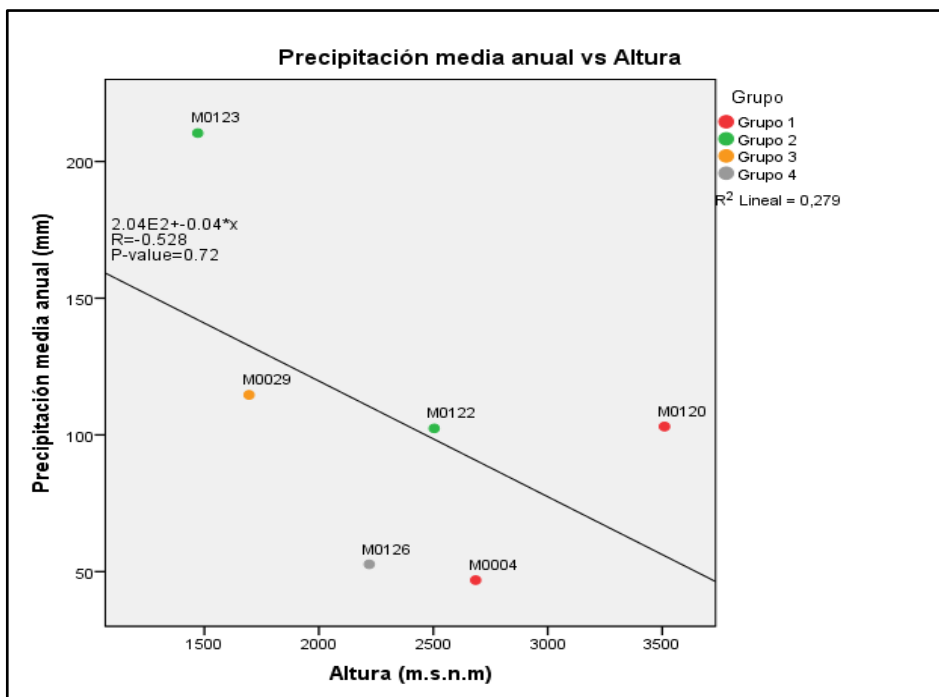


**Figura 14.** Precipitaciones medias anuales en la cuenca del río Cutuchi.

**Elaborado por:** Cynthia Vaca Nuñez.

### 3.4.1.7. La relación entre la variación altitudinal y la precipitación

La precipitación a gran escala está influenciada por efectos altitudinales y latitudinales (Tapia, 2016). La variación altitudinal de la precipitación es el resultado del análisis de las precipitaciones medias anuales de cada estación en relación de su altitud (Figura 15).



**Figura 15.** Variación altitudinal de la precipitación media en la cuenca del río Cutuchi.

**Elaborado por:** Cynthia Vaca Nuñez.

Se determinó que el coeficiente de determinación  $R^2$  es 0.279 entre la media mensual de precipitación y la altura de la estación, es decir, existe una escasa relación entre estas variables. En cuanto al "P-value", no es estadísticamente significativo ya que  $p > 0.05$ . Esto podría deberse en gran medida a la variabilidad espacial de la precipitación en la cuenca donde se sabe que existen otros factores que la influyen como el sentido de donde provienen las masas de humedad o la misma topografía, que es muy irregular en el valle Interandino.

### 3.4.2.- Temperatura

Para realizar el análisis de temperatura en la cuenca de estudio, se tomaron en cuenta los siguientes indicadores:

- Distribución temporal de la temperatura.
- Distribución espacial de la temperatura media anual.
- Variación altitudinal de la temperatura

### 3.4.2.1. Distribución temporal de la temperatura

El análisis de temperatura se realizó con los datos disponibles de temperatura mensual en cada estación meteorológica para el periodo 2008-2011.

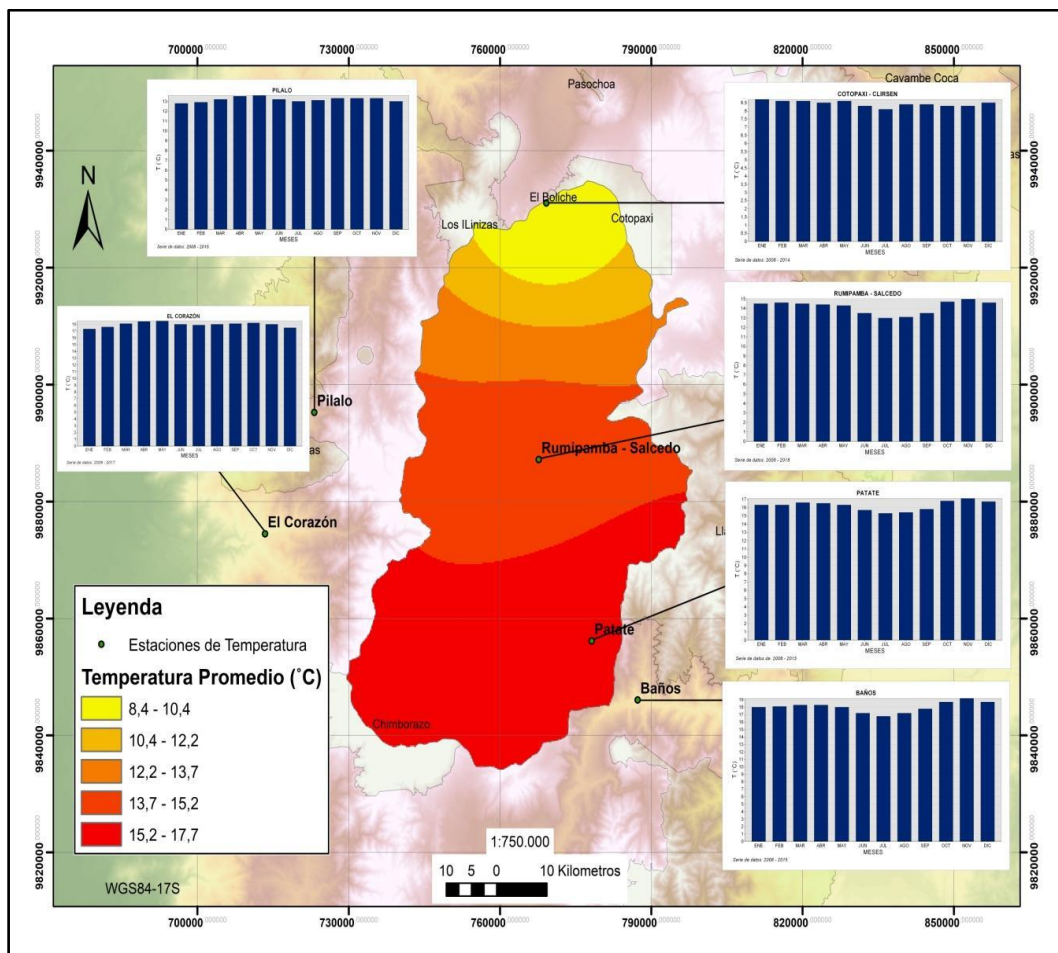
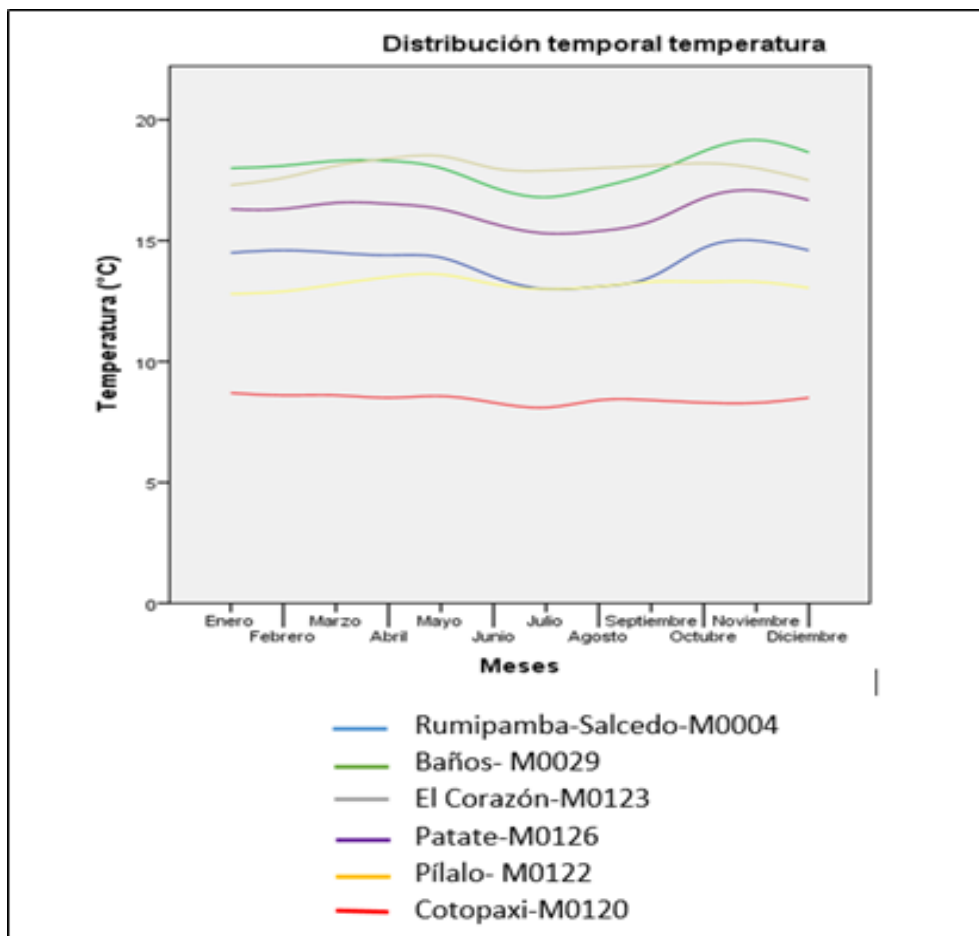


Figura 16. Caracterización de la temperatura en la cuenca del río Cutuchi.

Temperatura media mensual.

Elaborado por: Cynthia Vaca Nuñez.

Adicionalmente, se realizó un gráfico de la variación mensual de temperatura en las estaciones (figura 17).



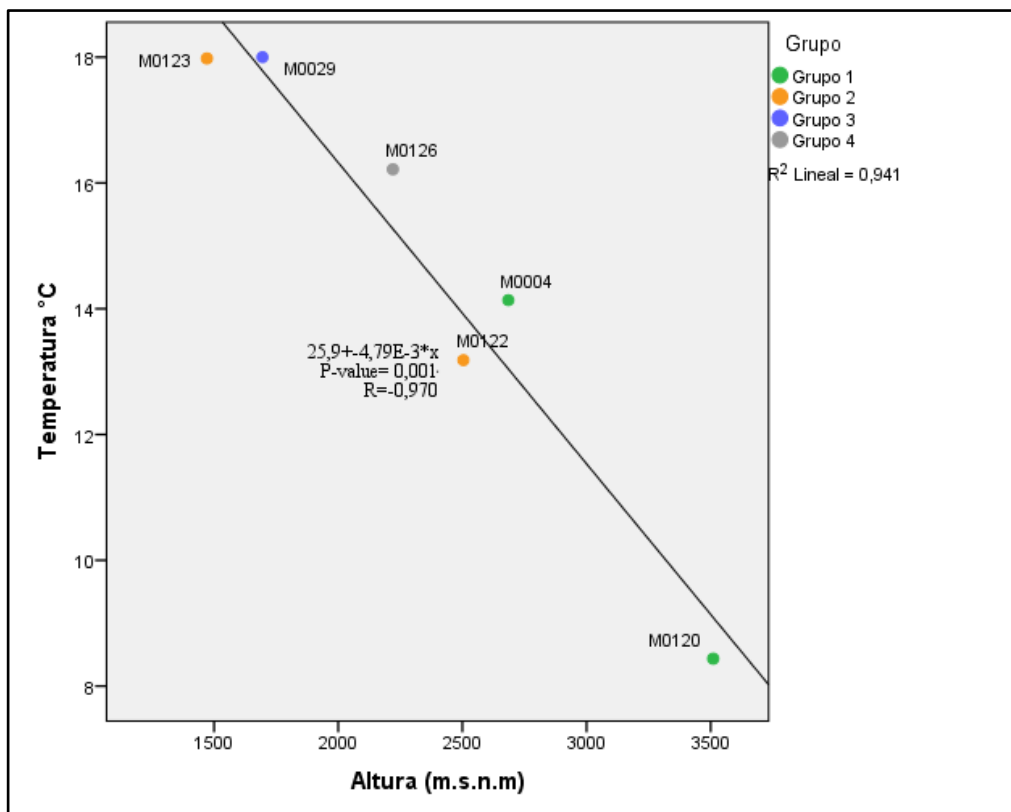
**Figura 17.** Variación de la temperatura media mensual en cada una de las estaciones meteorológicas

**Elaborado por:** Cynthia Vaca Nuñez.

En la subcuenca Cutuchi se comprueba una distribución cuyos valores mínimos de temperatura se registran en la estación Cotopaxi (M012 - 3510 m.s.n.m) y los más altos en la estación Baños (M0029 - 1 695 m.s.n.m). De igual manera, se observa que las mayores temperaturas se registran en el mes de noviembre con 19°C y las temperaturas más bajas se dan en el mes de julio con 7°C, por lo general, en todas las estaciones excepto en Cotopaxi que tiene una distribución más uniforme durante todo el año. En forma general, la variación de temperatura en las estaciones, a pesar de encontrar picos pequeños, se puede decir que es bastante uniforme en todos los meses del año.

### 3.4.2.2. Variación altitudinal de la temperatura

La relación entre altimetría y comportamiento de la temperatura puede comprobarse cuando se correlacionan las temperaturas medias anuales de cada estación en función de la altitud como se observa en la figura 18.



**Figura 18.** Variación altitudinal de la temperatura media anual en la subcuenca del río Cutuchi.

**Elaborado por:** Cynthia Vaca Nuñez.

Adviértase que existe una alta relación lineal entre estas variables, ya que su coeficiente de determinación  $R^2$  es 0.941 y  $R = -0.970$  con un “P-value” igual a 0.001, por lo tanto, es una relación, estadísticamente, significativa. Se establece una correlación inversamente proporcional, es decir, que a mayor altitud menor temperatura. Por otro lado, la ecuación que se obtuvo es:  $y = 25.9 - 0.00479x$ , la cual se utiliza posteriormente para la generación de isotermas en la zona.

### 3.4.2.3. Distribución espacial de la temperatura media anual

Para elaborar el mapa de la distribución espacial de la temperatura media anual, se realizó el mismo procedimiento mencionado anteriormente en la sección 3.4.2.1 haciendo uso del programa ArcGIS y la ecuación obtenida en la figura 16.

Como se muestra en la figura 16, la escala de variación de las isotermas es de  $1^\circ\text{C}$ . Se percibe una diferenciación geográfica de la temperatura media anual que varía desde los  $8.4^\circ\text{C}$  hasta  $17.6^\circ\text{C}$ . Se observa que, en las zonas altas de la cuenca, donde se encuentra localizada la estación Cotopaxi-Clirsen, son portadoras de los

menores valores de temperatura, mientras que en zonas bajas altimétricamente (Baños y Patate) se registran las temperaturas más altas.

Los valores de temperatura en la zona varían de 8.4°C a 17.7°C. Hacia el norte de la subcuenca se tienen rangos de temperaturas muy bajas por debajo de los 10.4°C. Por el contrario, conforme se transita hacia la parte baja de la subcuenca, hacia el sur, se observa una tendencia orientada hacia al aumento de la temperatura, alcanzando en el extremo sur cotas térmicas que superan los 15 °C, tal como se muestra en el mapa de isotermas de la figura 16.

### 3.4.3. Humedad relativa

#### 3.4.3.1. Humedad relativa anual

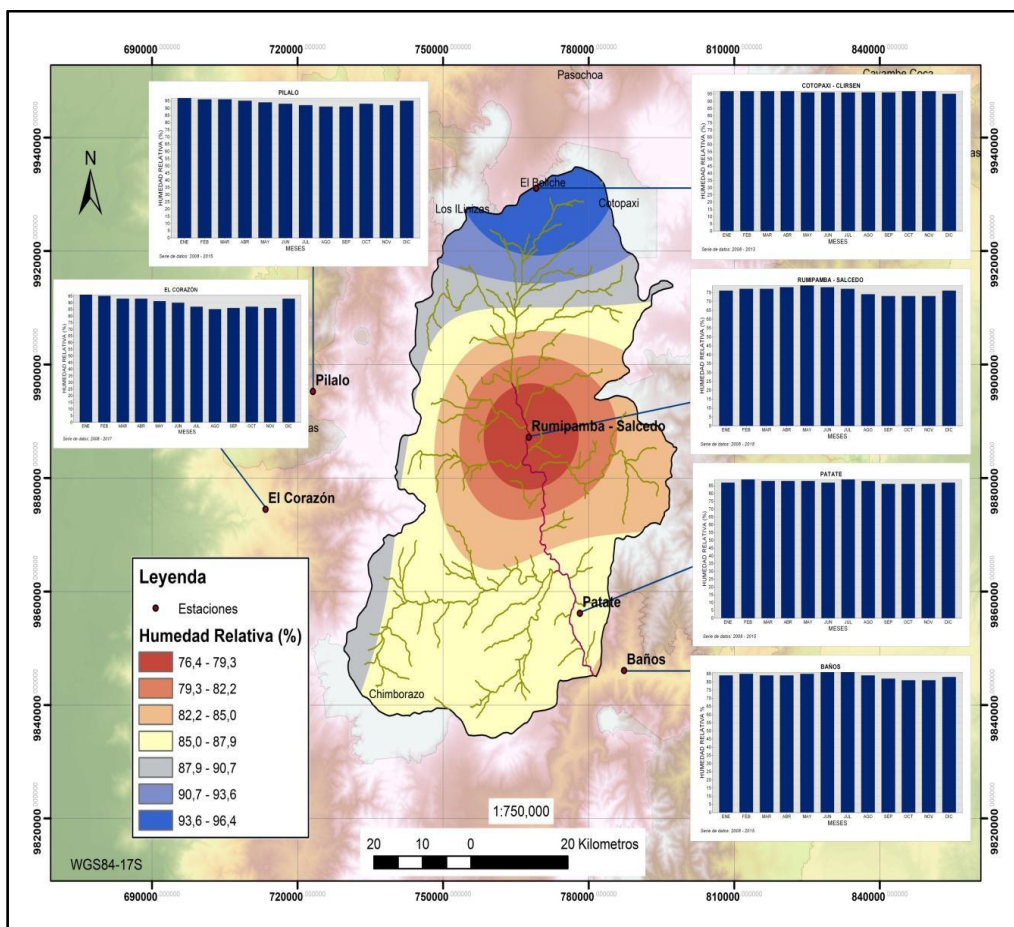
Se recopilaron los valores de humedad relativa anual en cada una de las estaciones para el periodo 2008-2011. Una previa comparación de las medias de humedad relativa para el periodo anual advierte valores relativos más elevados en las estaciones de Cotopaxi y Pilaló con respecto al resto de observatorios hidrométricos considerados. En ambos casos superan el 94% de humedad relativa para todos los años de registros, destacando sobremanera Cotopaxi que en el año 2009 y 2010 superó el 97%.

**Tabla 15.** Medias anuales de humedad relativa (%) para los años comprendidos en el periodo 2008-2011.

<b>Años</b>	<b>Rumipamba</b>	<b>Baños</b>	<b>Cotopaxi</b>	<b>Pilaló</b>	<b>El Corazón</b>	<b>Patate</b>
2008	77,08	84,25	94,42	94,42	90,75	85,87
2009	75,00	84,00	97,42	94,08	88,33	87,27
2010	76,00	81,92	97,50	94,17	89,33	88,67
2011	75,58	82,00	96,33	94,17	88,42	86,33

Elaborado por: Cynthia Vaca Nuñez.

De los datos recopilados, se tiene que la estación Rumipamba presenta los valores de humedad relativa más bajos. Los valores de humedad varían de 75.00% a 77.08%. En el caso de Baños, El Corazón y Patate que, exhibieron valores que oscilan entre 81% y 90%. Finalmente, la humedad relativa registrada en las estaciones Cotopaxi y Pilaló supera el 94%. En cualquier caso, se pone de manifiesto un comportamiento geográfico muy diferenciado en el contexto de la subcuenca en estudio (figura 20).



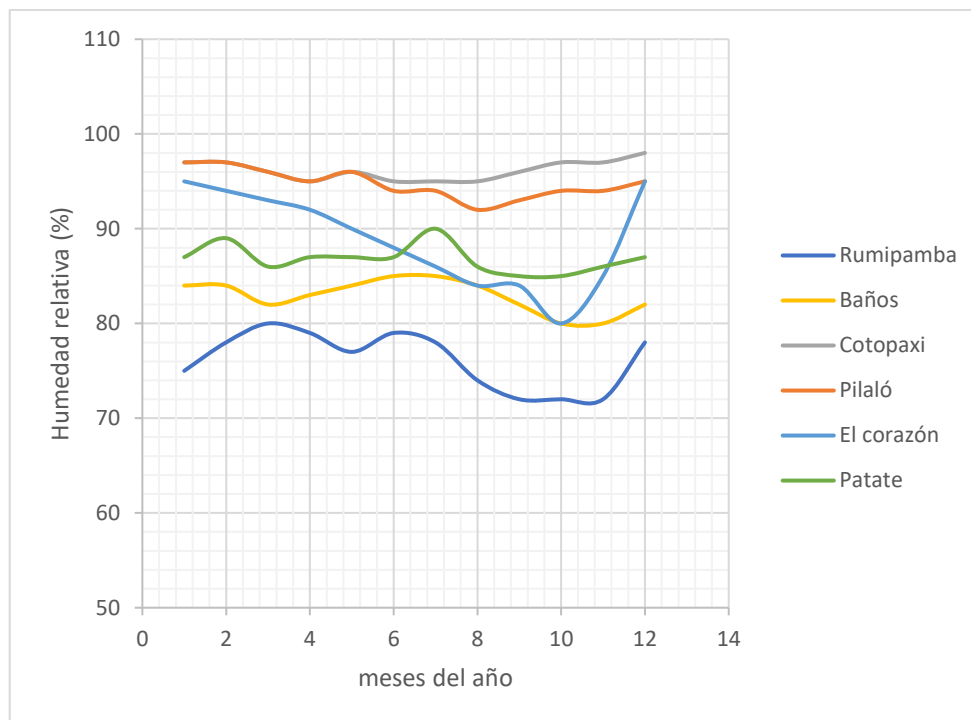
**Figura 19.** Caracterización de la humedad relativa anual en la subcuenca del río Cutuchi.

**Fuente:** INAMHI  
**Elaborado por:** Cynthia Vaca Nuñez.

### 3.4.3.2. Humedad relativa mensual

Adicionalmente, se analizaron los valores de humedad relativa media mensual. La estación Cotopaxi presenta valores máximos, los cuales, en cualquier mes sobrepasan el 95%. En el extremo opuesto, con los menores registros y una palpable variabilidad en las medias mensuales, se sitúa Rumipamba, con valores inferiores a 80% y en los meses de agosto a noviembre la humedad relativa cae por debajo del 75%.





**Figura 20.** La humedad relativa media mensual (2008-2011) dentro de la subcuenca del río Cutuchi.

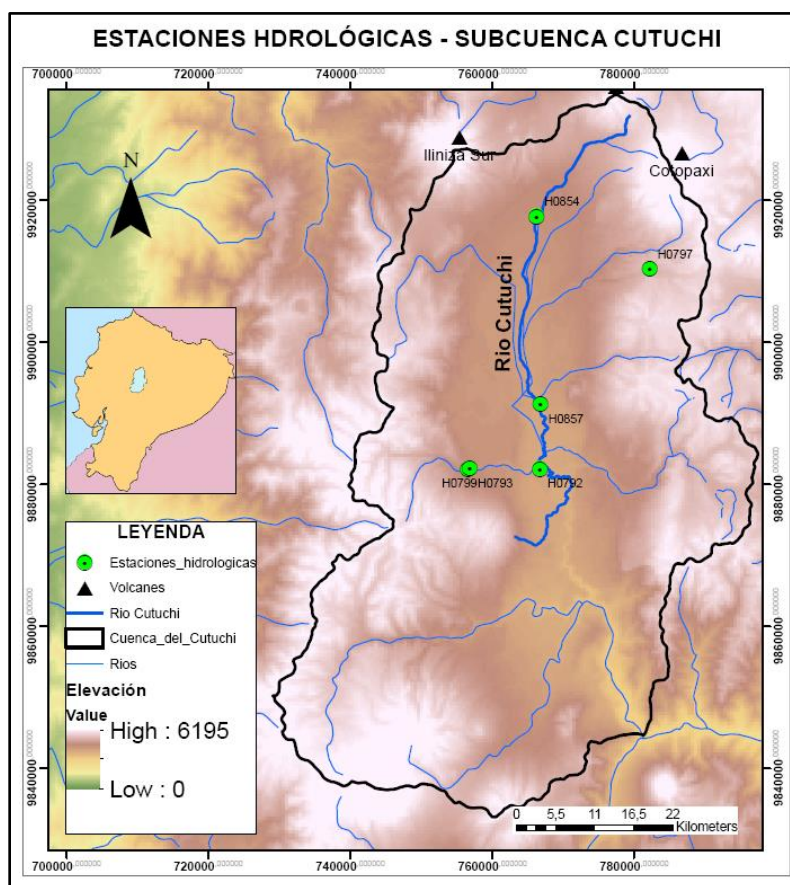
**Elaborado por:** Cynthia Vaca Nuñez.

En la estación Baños se observó que solo supera levemente los valores de 85% en los meses de junio y julio. Incluso, en el caso de los registros medios que muestra para octubre y noviembre sus niveles declinan hasta por debajo del 80%. Por otro lado, en la estación El Corazón se exhibe que los meses más húmedos son enero y febrero mientras que conforme avanza el año existe un declive por debajo de la cota 85%, y no muestra otros picos hasta diciembre. En el caso de Patate, la media mensual máxima se observa en julio, con un valor de 90% y el valor mínimo se produce en septiembre con un 85% de humedad. Por último, Pilaló refiere un comportamiento de las medias mensuales de humedad relativa que permiten ubicarlo como el segundo observatorio con los niveles más elevados de todas las estaciones estudiadas. Lo singular de su caso es que para mayo disminuye su nivel por debajo de 95% y esa tendencia en la media mensual se mantiene hasta diciembre que vuelve a recuperar los valores que superan esta cota. Sin embargo, en ningún caso, las medias mensuales descienden a menos de 90%. Esto se argumenta con los estudios realizados por Chow et al. (1994), Chen & Dudhia (2001), Wielicki et al. (2002) y Vuille et al. (2003) sobre la cobertura de nubes y humedad indican una tendencia positiva de la cobertura de nubes especialmente durante el período de diciembre a febrero en los Andes tropicales del norte.

### 3.4.4. Caudal

#### 3.4.4.1. Obtención y manejo de datos hidrológicos

Las principales fuentes de información de caudales para la zona de estudio se obtuvieron de las siguientes estaciones hidrológicas: Cutuchi en Caspi (H0854), Pansachi en Hda.Baños (H0797), Illuchi Aj Cutuchi (CVA Ambato) (H0857), Canal Mulalillo (H0799), Cutuchi Aj Yanayacu (H0792) y Nagsiche Plta.elec.Cusubamba (H0793); que están ubicadas en la provincia de Cotopaxi y se encuentran en estado operativo. Las características de dichas estaciones se muestran en la tabla 16, así como también el periodo de disponibilidad de datos diarios del caudal líquido para los años seleccionados (2008-2011).



**Figura 21.** Mapa de ubicación de las estaciones hidrológicas dentro de la subcuenca del río Cutuchi.

**Elaborado por:** Cynthia Vaca Nuñez.

**Tabla 16.** Estaciones Hidrológicas.

Estación Hidrológica	Código	Propietario	Altitud	% Vacíos	Años de registro
					Caudal líquido
Cutuchi en Caspi	H0854	INAMHI	2930	19.4	2008-2012
Pansachi en Hda.Banios	H0797	INAMHI	3574	25.6	2008-2012
Illuchi Aj Cutuchi (CVA Ambato)	H0857	INAMHI	2712	5.4	2008-2014
Canal Mulalillo	H0799	INAMHI	3027	3.2	2008-2014
Cutuchi Aj Yanayacu	H0792	INAMHI	2582	2.9	2008-2014
Nagsiche Plta.elec.Cusubamba	H0793	INAMHI	2962	0	2008-2014

Fuente: INAMHI

Elaborado por: Cynthia Vaca Nuñez.

### 3.4.4.2. Análisis de confiabilidad de información hidrológica

De igual manera que en la precipitación, se procedió a la clasificación de las estaciones hidrológicas, según la disponibilidad de datos conforme a los criterios de la tabla 10. Los resultados de este análisis se muestran en la tabla 17.

**Tabla 17.** Clasificación según calidad de información diaria de precipitación.

Código	Estación Hidrológica	Años de registro	Clase
		Caudal líquido	
H0854	Cutuchi en Caspi	2008-2011	C
H0797	Pansachi en Hda.Banios	2008-2012	D
H0857	Illuchi aj cutuchi (cva ambato)	2008-2014	C
H0799	Canal Mulalillo	2008-2014	C
H0792	Cutuchi aj yanayacu	2008-2014	C
H0793	Nagsiche plta.elec.cusubamba	2008-2014	C

Fuente: INAMHI

Elaborado por: Cynthia Vaca Nuñez.

Con el fin de llevar a cabo el análisis de confiabilidad de información se realizó el análisis de doble masa para verificar la homogeneidad de los datos de cada estación. El mismo consistió en elaborar una curva doble acumulativa, en la cual se relacionaron los datos acumulados mensuales de una determinada estación y la media acumulada de los datos mensuales de todas las estaciones cercanas a la estación de interés, que son consideradas homogéneas desde el punto de vista climatológico. En la gráfica que se obtiene, los datos del eje "x" corresponde a la

media acumulada de los datos y en el eje “y” la estación que posteriormente será rellenada.

En el caso de las estaciones hidrológicas, se realizó el promedio de las estaciones H0857, H0799 y H0792, ya que los años de registro de información son iguales; por otro lado, dado que las estaciones H0854 y H0797 disponen de información del periodo 2008-2012, se relaciona con el promedio de las estaciones que comprendan dicho periodo (tabla 18).

**Tabla 18.** Estaciones hidrológicas para análisis de doble masa.

<b>X</b>	<b>Y</b>
<b>2008-2014</b>	H0857
	H0799
	H0792
<b>2008-2012</b>	H0854
	H0797

Elaborado por: Cynthia Vaca Nuñez.

Asimismo, se determinó la tendencia lineal de las estaciones, mediante las gráficas de los valores acumulados de caudales líquidos para periodos de tiempos similares. El Anexo 2 muestra las gráficas de tendencia de cada una de las estaciones. Ahora bien, en el caso de la estación hidrológica H0797 se determinó que no presenta una tendencia lineal, es decir, que hubo un cambio en la pendiente, por lo tanto, se procedió a corregir la curva para que exista homogeneidad, mediante la relación de pendientes utilizando la ecuación 9:

$$p_{cr} = \frac{t_{cr}}{t_{ir}} * p_{ir} \quad \text{Ecuación 9}$$

Dónde:

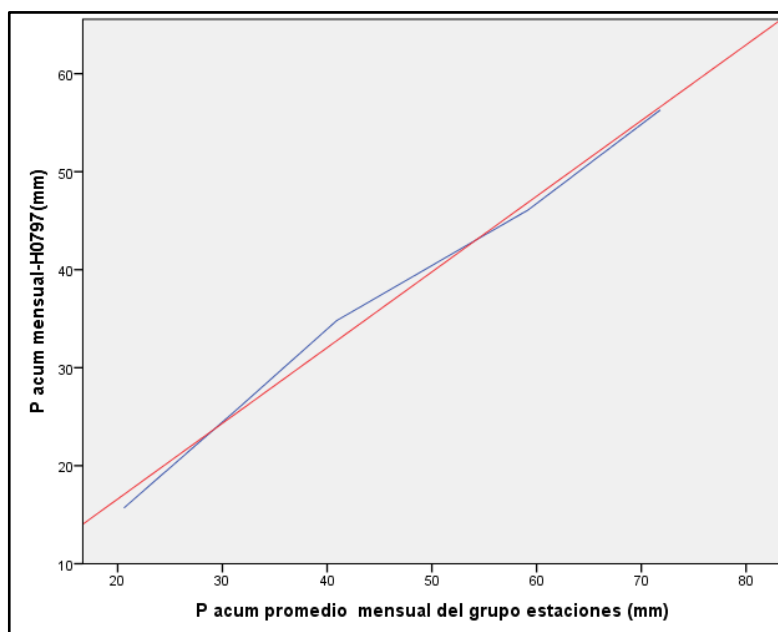
**p<sub>cr</sub>**: valor parcial corregido

**p<sub>ir</sub>**: valor parcial incorrecto

**t<sub>cr</sub>**: pendiente del tramo corregido

**t<sub>ir</sub>**: pendiente del tramo incorrecto

Obteniendo con ello la curva de doble masa corregida:



**Figura 22.** Curva de doble masa H0797.

**Elaborado por:** Cynthia Vaca Nuñez.

#### 3.4.4.3. Relleno de la información hidrológica.

El relleno de información se realizó considerando el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), que establece el grado de asociación lineal entre dos variables. En la tabla 19 se muestra los pares de estaciones correlacionadas las mismas que establecen un valor de 0.7 este valor describe un rango de correlación positiva establecida dentro de las estadísticas como coeficiente confiable.

**Tabla 19.** Pares de estaciones hidrológicas con su coeficiente de correlación.

<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
<b>H0857</b>	H0797	0.8
<b>H0797</b>	H0799	0.7
<b>H0792</b>	H0793	0.9
<b>H0792</b>	H0854	0.9
<b>H0797</b>	H0857	0.8
<b>H0793</b>	H0792	0.9

**Elaborado por:** Cynthia Vaca Nuñez.

Es importante saber que el resultado del coeficiente de determinación oscila entre 0 y 1. Cuanto más cerca de 1 se sitúe su valor, mayor será el ajuste del modelo a

la variable que estamos intentando explicar. De forma inversa, cuanto más cerca de cero, menos ajustado estará el modelo y, por tanto, menos fiable será.

Posteriormente, se procedió a determinar las ecuaciones de regresión lineal (Tabla 20) y avanzar con los cálculos siguientes.

**Tabla 20.** Ecuación correspondiente a la recta para cada estación.

X	Y	Ecuación
H0857	H0797	=0.07+0.84x
H0797	H0799	=0.35+0.68x
H0792	H0793	=0.06+0.16x
H0792	H0854	=0.99+0.06x
H0797	H0857	=0.07+0.84x
H0793	H0792	=1.90+5.42x

Elaborado por: Cynthia Vaca Nuñez.

En la tabla 21, se encuentran los datos de las estaciones hidrológicas, en donde se observa el periodo de información diario disponible de caudales líquidos, el número de datos existentes y vacíos, el porcentaje de datos vacíos, los valores máximos (máx) y mínimos (mín) del caudal líquido, el promedio (med), desviación estándar (SD) y si la información es o no estacionaria (St).

**Tabla 21.** Estadística de información de caudales líquidos medios diarios.

Código	Años de registro		Datos		% vacíos	máx	mín	med	SD	St
	desde	hasta	exist	vacíos						
H0854	2008	2011	1225	237	19.3	4.6	0.9	17.9	0.6	si
H0797	2008	2012	1463	374	25.6	7.3	0.2	0.9	0.7	si
H0857	2008	2014	2421	131	5.4	22.4	0	0.9	1.2	si
H0799	2008	2014	2469	78	3.1	0.8	0	0.2	0.1	si
H0792	2008	2014	2474	73	2.9	78.3	3.3	12.6	8.5	si

Fuente: INAMHI

Elaborado por: Cynthia Vaca

#### 3.4.4.4. Escorrentía en la subcuenca

Para la obtención de los valores de escorrentía se utilizó la información de las estaciones H0817, H0790, H0346, H0347. Una vez obtenida la información

necesaria se realizó una interpolación del promedio obtenido de los valores en los diferentes años por medio de la herramienta IDW de ArcGIS. Los valores de escorrentía se obtuvieron en forma de caudal, por lo tanto, para obtener los resultados en valores de milímetros se utilizó la herramienta del ArcGIS “Raster Calculator” en el cual se realizó la operación correspondiente: dividir el caudal para el área total de la cuenca y se multiplicó por un factor de conversión para convertir los resultados en milímetros por año (tabla 22).

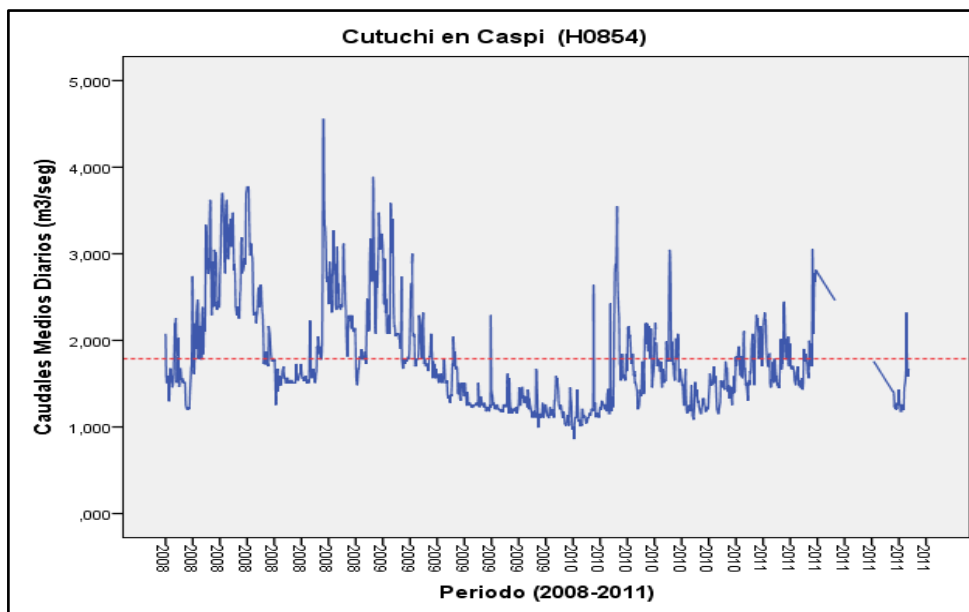
**Tabla 22.** Valores de escorrentía en cada una de las estaciones.

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	PROM
<b>H0817</b>	29.49	34.82	33.22	35.47	32.61	31.67	31.68	24.52	21.80	23.61	25.66	28.50	29.42
<b>H0790</b>	15.10	15.60	14.39	19.66	26.01	34.76	45.25	23.28	28.60	19.57	14.06	13.15	22.45
<b>H0346</b>	217.77	529.80	561.11	440.31	154.53	51.97	43.17	33.26	28.45	16.76	19.30	26.64	176.92
<b>H0347</b>	173.28	399.63	360.15	370.05	162.67	43.85	20.79	14.57	12.18	9.24	7.21	12.47	132.17

Posteriormente se obtuvieron los valores de escorrentía en los puntos de las estaciones originales (Rumipamba, Baños Cotopaxi, Pilaló, El Corazón, Patate) y estos valores de escorrentía se utilizaron después en el cálculo del balance hídrico.

#### **3.4.4.5. Variación de caudal en la subcuenca (datos homogeneizados)**

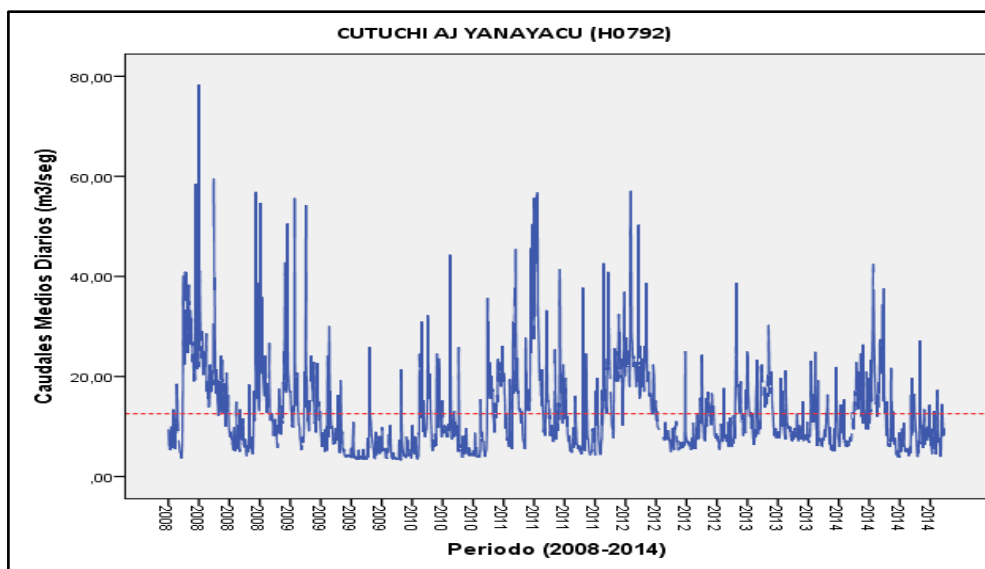
Para conocer el comportamiento del caudal en el área de estudio se realizaron los gráficos de variación de caudal en cada una de las estaciones. En la figura 24, se observa la distribución diaria del caudal líquido de la estación Cutuchi en Caspi H0854, se tienen valores que varían de 1 a 4.5 m<sup>3</sup>/s durante el periodo de años del 2008 al 2011.



**Figura 23.** Caudales medios diarios en la estación Cutuchi en Caspi (H0854).

**Fuente:** INAMHI  
**Elaborado por:** Cynthia Vaca.

La variación de caudal diario en la estación Cutuchi AJ Yanayacu H0792, varía desde los 5 a los 60 m<sup>3</sup>/s aproximadamente. La variación para cada año se da de forma similar observándose los picos más altos de caudal durante el segundo trimestre de abril hasta julio, tal como se ve en la figura 25.

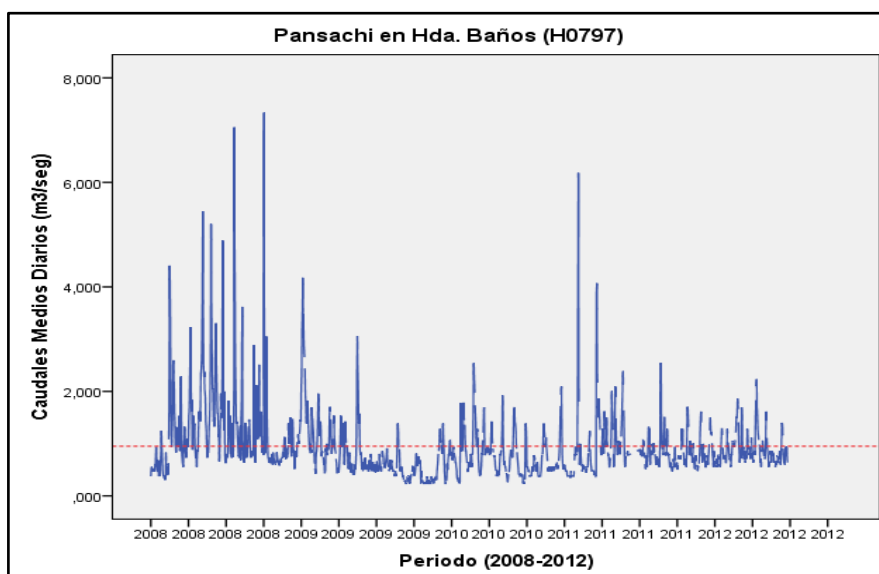


**Figura 24.** Caudales medios diarios en la estación H0792.

**Elaborado por:** Cynthia Vaca

En la estación Pansachi en Hda. Baños H0797, se registran valores de caudal de hasta 7 m<sup>3</sup>/s. Esta estación en particular muestra que el año 2008 es un año característico donde se obtuvieron los mayores valores de caudal.

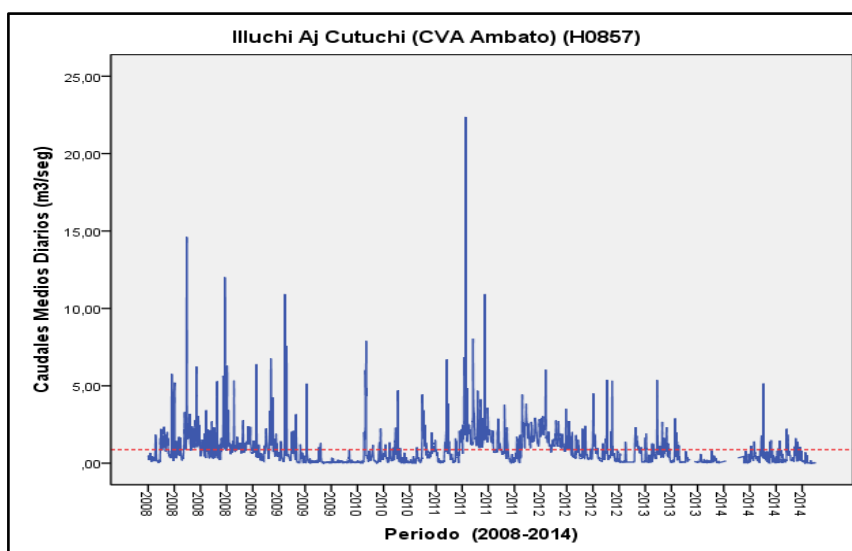




**Figura 25.** Caudales medios diarios en la estación H0797.

**Fuente:** INAMHI  
**Elaborado por:** Cynthia Vaca.

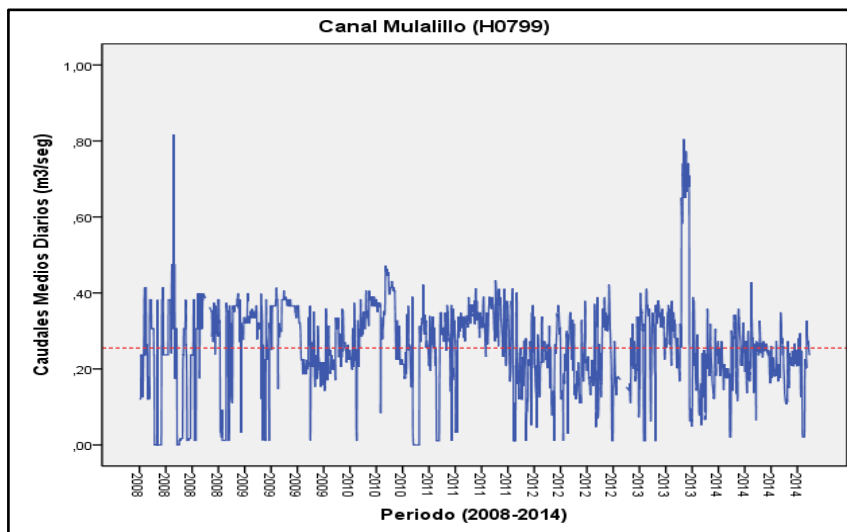
En la figura 27, se observa los valores de caudal para el periodo de 2008 al 2011 registrados en la estación Illuchi Aj Cutuchi (CVA Ambato, H0857). Se presentan valores que superan los 10 m<sup>3</sup>/s, en promedio para el periodo de estudio el caudal registrado en esta estación es de menos a 5 m<sup>3</sup>/s.



**Figura 26.** Caudales medios diarios en la estación H0857.

**Fuente:** INAMHI  
**Elaborado por:** Cynthia Vaca.

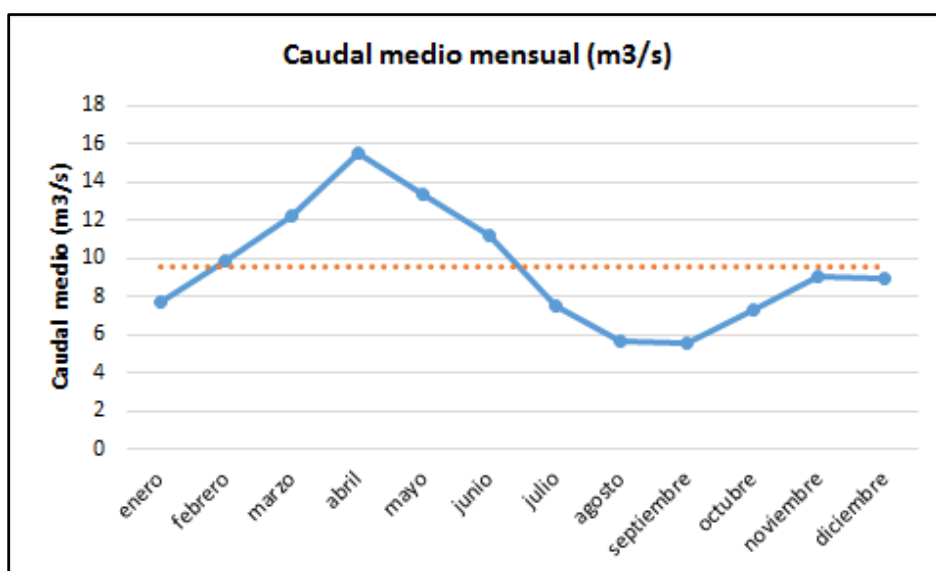
Por último, en la estación Canal Mulalillo H0799, se evidencia una distribución del caudal que obedece a regímenes atípicos, siendo estos menores de 1 m<sup>3</sup>/s (figura 28).



**Figura 27.** Caudales medios diarios en la estación H0799.

**Fuente:** INAMHI  
**Elaborado por:** Cynthia Vaca.

En la subcuenca del río Cutuchi se tiene una variación de caudal medio mensual que va desde los 5 m<sup>3</sup>/s a los 16 m<sup>3</sup>/s (figura 29). Los valores máximos de caudal se tienen en el mes de abril y la temporada de menor caudal en la cuenca se da en los meses de agosto y septiembre.



**Figura 28.** Caudales medios mensuales (1987 -2014)

**Fuente:** Vaca & Tubón, 2019

Cabe señalar que estudios realizados anteriormente en esta zona de estudio durante los años de 1987 al 2014 reflejan que la variación de caudal en el río Cutuchi es de  $9.5 \text{ m}^3/\text{s}$  y que puede tener un caudal máximo de  $40.9 \text{ m}^3/\text{s}$  (Figura 30, Vaca & Tubón, 2019).

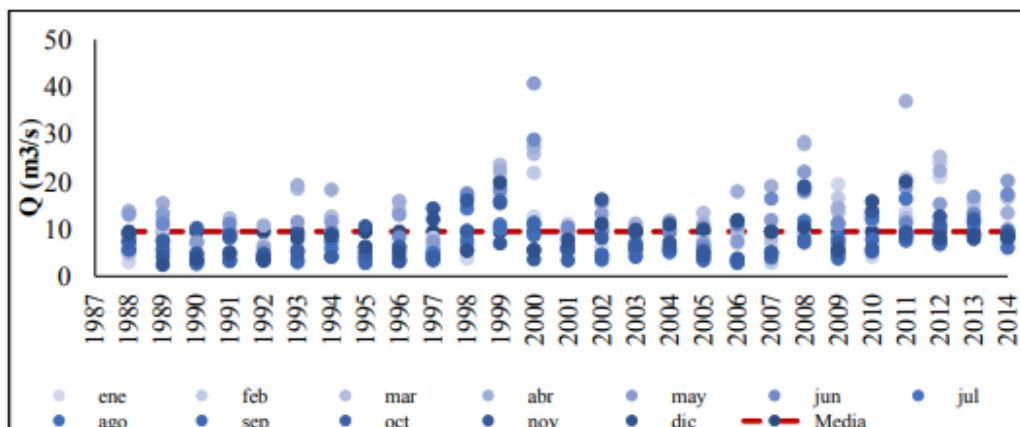


Figura 29. Variabilidad interanual de caudales para el río Cutuchi.

Fuente: Vaca & Tubón, 2019

### 3.5. MÉTODOS PARA ESTIMACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL (ETP) DE LA SUBCUENCA

Uno de los datos hidrometeorológicos fundamentales es la evapotranspiración potencial. En el presente estudio se procede a la aplicación de los siguientes métodos: Thornthwaite, Penman - Monteith, la utilización de la plataforma CRU - Climatic Research Unit y MODIS. De esta manera, se disponen de varios análisis por estos diferentes métodos, a fin de estimar esta variable que participa en el balance hidrológico.

#### 3.5.1. Método de Thornthwaite.

El primer método que se utilizó para el cálculo de la evapotranspiración potencial (ETP) es el método de Thornthwaite. Este es un procedimiento indirecto, asociado con la temperatura media mensual y con la longitud en horas del día. Se ajusta para meses de 30 días y con 12 horas de sol. Además, se trata de una fórmula empírica que puede ser utilizada en cualquier zona en la que se registren temperaturas máximas y mínimas diarias. Además, la temperatura se correlaciona con otros parámetros como: radiación, humedad atmosférica y viento (Thornthwaite, 1948). Así, para el cálculo de la evapotranspiración potencial, se utiliza la ecuación 10:

$$ETP_c = 16 \left( \frac{10T}{I} \right)^{a(I)} Kd \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde:

**$ETP_c$**  = Evapotranspiración potencial climática (mm).

**T** = Temperatura media del aire en el periodo considerado.

**I** = Índice térmico anual (suma de los 12 índices mensuales).

**Kd** = Coeficiente de duración del sol y número de días del mes.

**a(I)** = ecuación cúbica de forma:

$$I = \sum_j^{12} i_j \text{ siendo } i_j = \left( \frac{T_j}{5} \right)^{1.514} \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde:

**T<sub>j</sub>** = Temperatura media mensual

$$a(I) = 6,75 \cdot 10^{-7} \cdot I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} \cdot I^2 + 1,79 \cdot 10^{-2} \cdot I + 0,49$$

$$Kd = \frac{N}{12} * \frac{d}{30} \quad \text{Ecuación 12}$$

**N** = Número máximo de horas de sol, dependiendo del mes y de la latitud

**d** = Número de días del mes.

### 3.5.2. Método de Penman-Monteith (FAO)

El segundo método utilizado en el cálculo de la evapotranspiración potencial es el método de Penman-Monteith. Este método es considerado como el más completo, debido a que realiza un balance de energía utilizando datos climáticos estándar: horas de sol, temperatura, humedad atmosférica y velocidad del viento. La ecuación de Penman-Monteith propone, como un factor relevante a considerar, la importancia del cultivo que radica en la zona, brindando mayor exactitud. La ecuación utilizada fue (ecuación 13):

$$ETP = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$$

**Ecuación 13**

Donde:

**ETP** = Evapotranspiración potencial, mm/día

**R<sub>n</sub>** = Radiación neta en la superficie del cultivo, MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>

**G** = Flujo de calor de suelo, MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>

**T** = Temperatura media del aire a 2m de altura, °C

**u<sub>2</sub>** = Velocidad del viento a 2m de altura, m/s

**e<sub>s</sub>** = Presión de vapor de saturación, kPa

**e<sub>a</sub>** = Presión real de vapor, kPa

**e<sub>s</sub> - e<sub>a</sub>** = Déficit de presión de vapor, kPa

**Δ** = Pendiente de la curva de presión de vapor, kPa °C<sup>-1</sup>

**γ** = Constante psicrométrica, kPa °C<sup>-1</sup>

En este estudio, el cálculo de la evapotranspiración se realizó mediante el programa Cropwat 8.0. En la figura 31 se muestra la entrada de datos en el programa, se ingresaron los datos de las estaciones (véase tabla 23) y el programa automáticamente calculó la ETP anual.

Month	Min Temp °C	Max Temp °C	Humidity %	Wind km/day	Sun hours	Rad MJ/m <sup>2</sup> /day	ETo mm/day
January							
February							
March							
April							
May							
June							
July							
August							
September							
October							
November							
December							
Average							

**Figura 30.** Parámetro del clima a ingresar en el programa CROPWAT.

Fuente: CROPWAT 8.0

**Tabla 23.** Estaciones consideradas para el cálculo de la ETP método Penman-Monteith.

<b>Código</b>	<b>Nombre</b>
M004	Rumipamba- Salcedo
M0122	Pilaló
M0123	El Corazón
M0029	Baños
M0126	Patate

Elaborado por: Cynthia Vaca Nuñez.

### **3.5.3. Evapotranspiración potencial de la subcuenca derivada del Producto CRU (Climatic Research Unit)**

La Climatic Research Unit (CRU) es una de las instituciones dedicadas al estudio del cambio climático natural y antropogénico. La serie CRU TS (Climatic Research Unit Time Series) es un conjunto de datos con resolución espacial de 0.5° x 0.5°, y periodo de registro de 1901 hasta la actualidad, basado en el análisis de los registros de más de 4.000 estaciones meteorológicas. La evapotranspiración potencial (ETP) se estima a partir de una variante de la ecuación de Penman - Monteith, que utiliza valores de temperatura media, rango de temperatura diurna, presión de vapor, cobertura de nubes y velocidad del viento (Velásquez & Poveda, 2019).

En este trabajo, la estimación de la evapotranspiración potencial por medio de este satélite se realizó obteniendo valores en formato ráster correspondientes a la precipitación y escorrentía en 100 puntos colocados de manera aleatoria en la subcuenca. Con esa información se realizó nuevamente una interpolación usando la herramienta IDW de ArcGIS.

### **3.5.4. Estimación de datos de evapotranspiración a partir del producto MODIS**

Las fuentes de información de datos espaciales que corresponden a la evapotranspiración pasan por la captación de un sensor conocido como MODIS. Se trata de un producto de alta tecnología proveniente de plataformas satelitales denominadas Terra y Aqua. Tales estaciones transmiten hacia un sistema de datos y operaciones EOS (en el Centro de vuelo espacial Goddard) que luego, conforman imágenes multibandas y de formato ráster con resoluciones espaciales de 250, 500 y 1.000 metros. De esta manera, poseen datos espaciales de evapotranspiración

global, flujo de calor latente, evapotranspiración potencial y flujo de calor latente potencial. Los datos de MODIS16 son definidos mediante un algoritmo mejorado basado en la ecuación de Penman Monteith (Mu et al., 2009). Estas plataformas satelitales proporcionan información en coordenadas UTM, las mismas que son procesadas con apoyo del software ArcGIS y así estimar la evapotranspiración de la cuenca (Mu et al., 2009).

MODIS se ha convertido en un instrumento para el análisis espacial de los indicadores más refinados que miden la evapotranspiración. Es por ello por lo que ha sido oportuno utilizar todo el conjunto de datos mensuales correspondientes a MODIS16A2 y también anuales como el producto MODIS16A3, con datos desde el año 2008 hasta el 2011. Desde el punto de vista geográfico, corresponden a los cuadrantes h10v09 y h10v8, los cuales abarcan el área de estudio. Cabe mencionar, que estos productos digitales están disponibles en la plataforma web de la Universidad de Montana - Grupo de Simulación Terradínámica Numérica, cuyo vínculo en la web es: [http://files.ntsg.umt.edu/data/NTSG\\_Products/MOD16/](http://files.ntsg.umt.edu/data/NTSG_Products/MOD16/).

Para estimar la evapotranspiración potencial, se comienza por la obtención de valores tanto de precipitación como de escorrentía en formato ráster y para 100 puntos colocados de manera aleatoria en la subcuenca. Todo ello con el fin de adquirir mayor precisión al momento de realizar la triangulación. Con esa información se realizó nuevamente una interpolación por medio de la herramienta IDW del ArcGis, obteniéndose el raster de la evapotranspiración potencial y finalmente se clasifica los valores. Luego, se procede a exportar el mapa con un formato adecuado para ser interpretado desde la representación cartográfica.

## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los resultados que se obtuvieron de la estimación de la evapotranspiración potencial y real, tras la aplicación de los distintos métodos empleados y explicados en el anterior capítulo. Asimismo, no solo se comparan los valores estimados para esta variable, sino que se delimita aquellos procedimientos que fueron considerados más confiables para la posterior determinación del balance hidrológico. Además, se ofrecen los resultados obtenidos mediante la ecuación general que permite estimar su comportamiento.

#### 4.1. RESULTADOS DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL

##### 4.1.1. Evapotranspiración potencial mediante el método de Thornthwaite

Se obtuvieron resultados de la evapotranspiración potencial mediante el método de Thornthwaite, a escala mensual y anual para cada una de las estaciones meteorológicas durante el periodo 2008-2011. En la tabla 24 se muestran los resultados de la evapotranspiración anual.

**Tabla 24.** Evapotranspiración Potencial (mm) en cada una de las estaciones meteorológicas.

Código	Estación	ETP (mm)
M004	Rumipamba- Salcedo	678,77
M0122	Pilaló	656,00
M0123	El Corazón	797,90
M0029	Baños	806,45
M0126	Patate	741,73

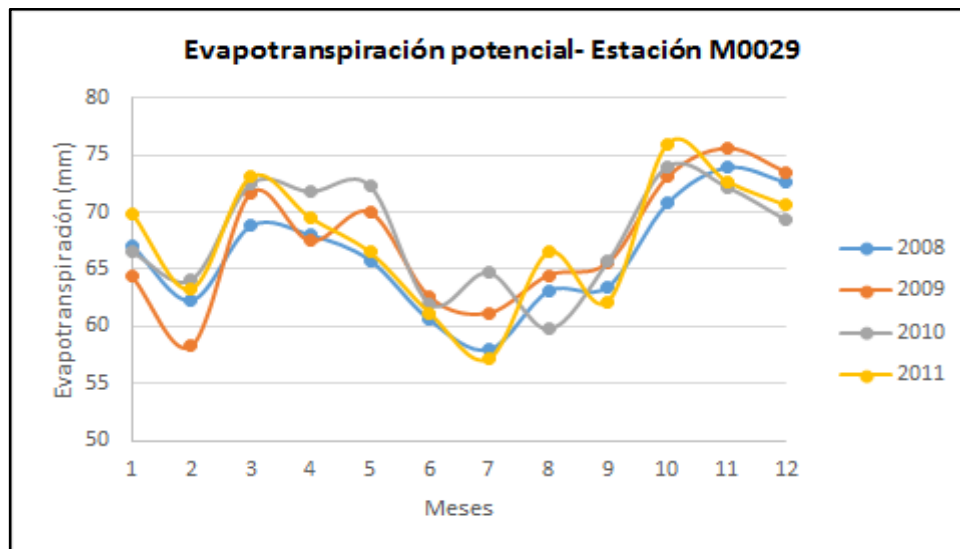
Elaborado por: Cynthia Vaca Nuñez.

Los resultados de evapotranspiración obtenidos en todas las estaciones varían desde los 656 mm/año en la estación Pilaló hasta los 806 mm/año en Baños.

En los siguientes gráficos se muestra la variación mensual de la evapotranspiración potencial en cada una de las estaciones. En la estación Baños se marcan las más altas cotas para esta variable si se comparan con el resto de los registros. La



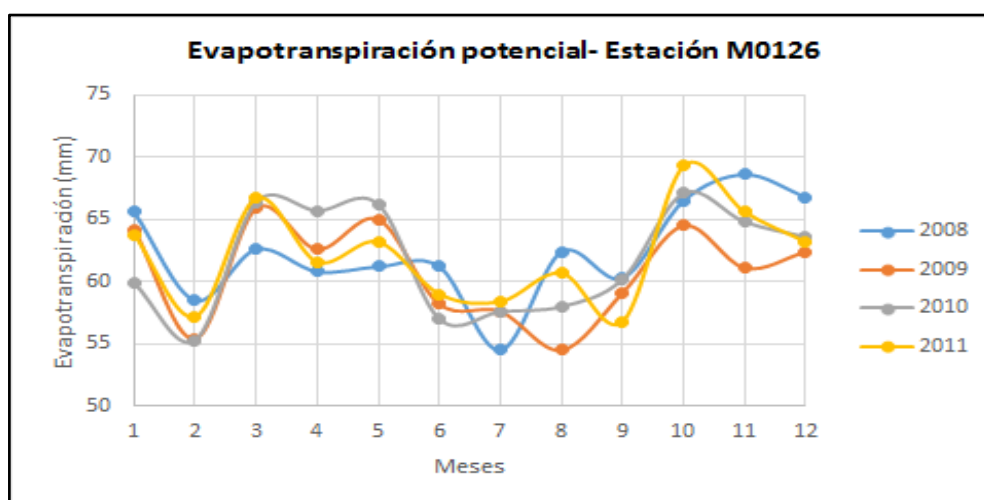
evapotranspiración potencial durante el periodo de 2008 a 2011 varía desde los 55 mm hasta los 76 mm y muestra dos periodos de mayor evapotranspiración siendo estos en los meses de marzo a mayo y de octubre a diciembre (figura 32).



**Figura 31.** Evapotranspiración potencial mensual (mm) usando el Método Thornthwaite, en la estación M0029.

Elaborado por: Cynthia Vaca Nuñez.

Una dinámica muy similar se presenta en las estaciones de Patate (M0126) y Rumipamba-Salcedo (M004), donde los valores más altos (70 mm) se distinguen en los meses de octubre y noviembre, mientras que se observan dos meses con valores muy bajos (55 mm), generalmente septiembre y febrero (figura 33 y 34). Este último mes es portador de las cotas más bajas en todas las estaciones.



**Figura 32.** Evapotranspiración potencial mensual (mm) usando el Método Thornthwaite, en la estación M0126.

Elaborado por: Cynthia Vaca Nuñez.

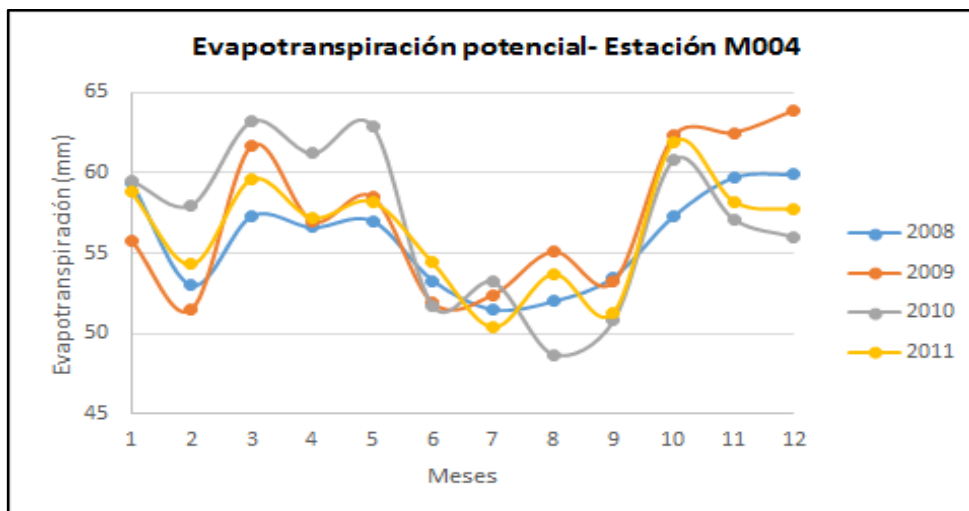


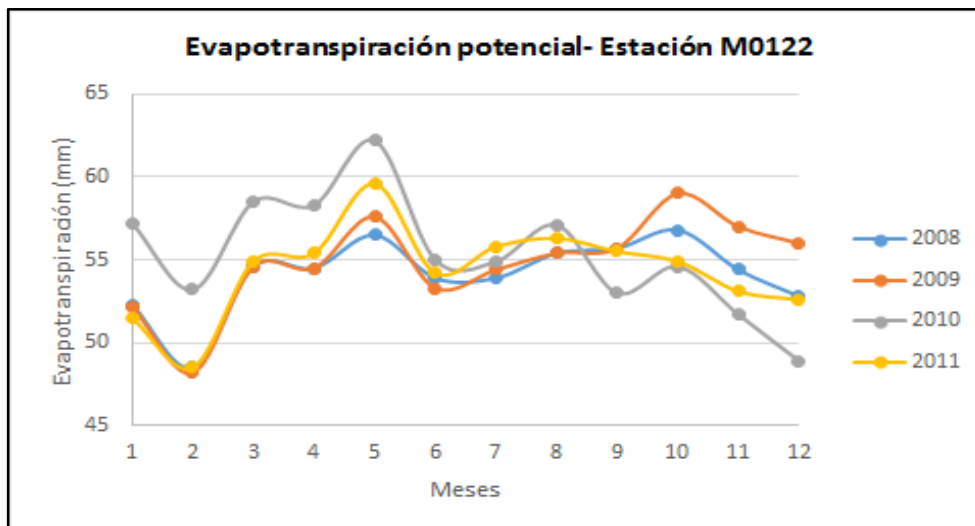
Figura 33. Evapotranspiración potencial mensual (mm) usando el Método Thornthwaite, en la estación M004.

Elaborado por: Cynthia Vaca Nuñez.

Por su parte, en las estaciones de El Corazón (M0123) y Pilaló (M0122) existen años donde el máximo de evapotranspiración se produjo en mayo o junio. En el caso de El Corazón, solo en el año 2009, el máximo no se produce en junio, mientras que en Pilaló en los años 2010 y 2009 se comprueba, igualmente, la máxima cota en mayo; lo que contrasta con el resto de las estaciones (figura 34 y 35).

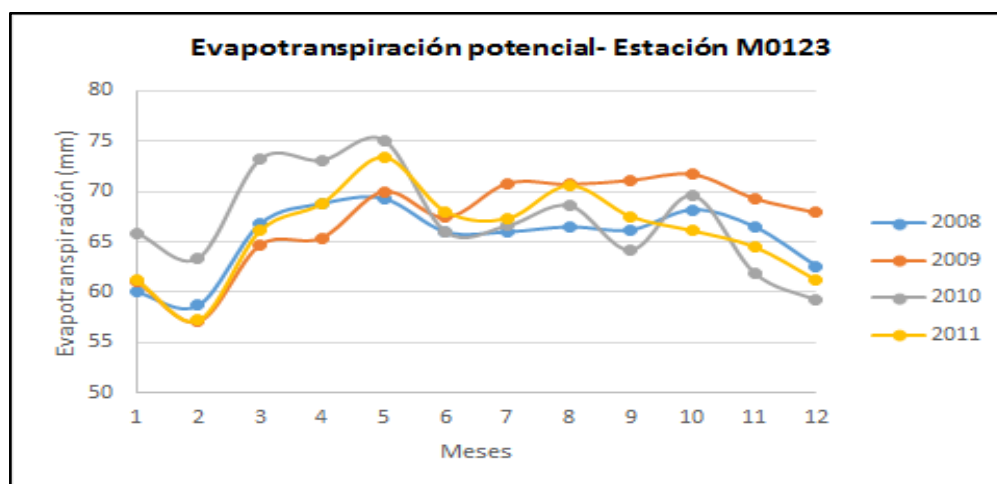
No obstante, lo que parece una regularidad para todas las estaciones es un comportamiento de transición de valores altos entre los primeros meses abril, mayo y junio hacia los meses de julio y agosto, en los cuales se observa una disminución en los valores, para luego formarse el pico en septiembre, octubre y noviembre con aumentos importantes en la magnitud mensual. Cabe mencionar que en comparación con los grupos de estaciones presentados en el capítulo 3.4.1.4, el comportamiento de la evapotranspiración no permite clasificar las estaciones de la misma manera.

En todo caso, el proceso simultáneo a través del cual, la cuenca pierde agua por evaporación del suelo y transpiración del follaje, evidencia un comportamiento variable a lo largo de un año que se ha de expresar en diferencias para el ciclo hidrológico y las disponibilidades de agua como recurso que está regulado por este proceso.



**Figura 34.** Evapotranspiración potencial mensual (mm) usando el Método Thornthwaite, en la estación M0122.

Elaborado por: Cynthia Vaca Nuñez.



**Figura 35.** Evapotranspiración potencial mensual (mm) usando el Método Thornthwaite, en la estación M0123.

Elaborado por: Cynthia Vaca Nuñez.

**Tabla 25.** Evapotranspiración potencial mensual según años de análisis usando el Método Thornthwaite (mm).

<b>Estación</b>		<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>	<b>ETP anual</b>
Baños (M0029)	2008	67.1	62.3	68.8	68.0	65.8	60.6	58.0	63.1	63. 5	70.8	73.9	72.6	794.5
	2009	64.4	58.3	71.7	67.5	70.0	62.6	61.2	64.5	65. 6	73.1	75.6	73.5	808.0
	2010	66.5	64.1	72.5	71.8	72.3	62.0	64.7	59.8	65. 7	74.0	72.2	69.3	814.9
	2011	69.9	63.3	73.1	69.5	66.5	61.2	57.2	66.5	62. 2	76.0	72.7	70.6	808.7
El Corazón (M0123)	2008	60.0	58.7	66.8	68.8	69.3	66.0	66.0	66.5	66. 2	68.2	66.5	62.6	785.6
	2009	61.1	57.1	64.7	65.4	70.0	67.4	70.8	70.7	71. 1	71.7	69.3	67.9	807.2
	2010	65.9	63.4	73.2	73.1	75.1	66.0	66.6	68.6	64. 2	69.6	61.9	59.2	806.8
	2011	61.2	57.2	66.1	68.8	73.4	68.0	67.3	70.6	67. 5	66.1	64.5	61.2	791.9
Patate (M0126)	2008	65.6	58.5	62.6	60.8	61.2	61.2	54.5	62.4	60. 3	66.5	68.6	66.8	749.0
	2009	64.2	55.4	65.9	62.6	65.0	58.2	57.6	54.5	59. 1	64.5	61.1	62.4	730.5
	2010	59.9	55.3	66.4	65.7	66.2	57.0	57.6	58.0	60. 2	67.1	64.8	63.6	741.8
	2011	63.8	57.2	66.7	61.6	63.2	59.0	58.4	60.7	56. 8	69.3	65.6	63.2	745.5
Pilaló (M0122)	2008	52.3	48.5	54.6	54.5	56.5	53.9	53.9	55.4	55. 7	56.8	54.4	52.8	649.3

										55.				
	2009	52.2	48.2	54.6	54.5	57.6	53.3	54.4	55.4	7	59.0	57.0	56.0	657.9
										53.				
	2010	57.2	53.2	58.5	58.3	62.2	55.0	54.9	57.1	0	54.6	51.7	48.9	664.6
										55.				
	2011	51.5	48.5	54.9	55.4	59.6	54.2	55.8	56.3	5	54.9	53.1	52.6	652.3
										53.				
Rumipamba-Salcedo	2008	59.4	53.0	57.3	56.6	57.0	53.3	51.5	52.0	5	57.3	59.7	59.9	670.5
										53.				
(M004)	2009	55.8	51.5	61.7	57.0	58.5	51.9	52.4	55.1	2	62.3	62.5	63.9	685.8
										50.				
	2010	59.5	58.0	63.2	61.2	62.9	51.7	53.2	48.7	8	60.8	57.1	56.0	683.1
										51.				
	2011	58.8	54.3	59.6	57.2	58.2	54.4	50.4	53.7	3	61.9	58.2	57.7	675.7

Elaborado por: Cynthia Vaca Nuñez

Con respecto a la variación de la evapotranspiración anual, se observa que en la estación Baños en los intervalos anuales de 2009 y 2011, se supera o iguala los 808 mm/año, poniéndonos en presencia igualmente de niveles elevados en esta estación. De hecho, solo en el año 2008 la cota se muestra inferior, cuando se tiene solo 794 mm/año. Asimismo, El Corazón (M0123) puede considerarse otra estación que da cuenta de niveles de evapotranspiración relativamente altos. En el año 2011 refiere la mínima media anual con valores de 785 mm/año, mientras el resto de los promedios anuales más significativos alcanzan 807 mm/año y 806 mm/año en los años 2009 y 2010 respectivamente.

En un lugar intermedio está la estación Patate (M0126) donde se tiene valores mínimos de 730 mm/año, en el año 2009. En el año 2008, 2010 y 2011 los valores oscilaron entre cotas de 741 mm/año y 749 mm/año. Ello pareciera ser indicativo de cierta estabilidad en su comportamiento. Los valores menores de evapotranspiración potencial media anual se estimó para las estaciones de Pilaló (M0122) y Rumipamba-Salcedo (M004). El valor máximo registrado es de 685 mm/año. Este valor límite corresponde a la estación Rumipamba-Salcedo. En contraste, el valor medio anual mínimo se localiza en Pilaló y muestra una cota de 649 mm/año para el año 2008.

#### 4.2.2. Evapotranspiración potencial mediante el método de Penman-Monteith.

El siguiente método utilizado para la determinación de la evapotranspiración potencial (ETP), fue el modelo estándar de Penman-Monteith modificado por la FAO (FPM). Los resultados obtenidos con este método se pueden observar en la tabla 26:

**Tabla 26.** Valores de evapotranspiración potencial (mm) obtenidos por el modelo de Penman-Monteith

<b>Código</b>	<b>Estación</b>	<b>ETP (mm)</b>
<b>M0004</b>	Rumipamba- Salcedo	800,5
<b>M0122</b>	Pilaló	732,5
<b>M0123</b>	El Corazón	820,0
<b>M0029</b>	Baños	827,2
<b>M0126</b>	Patate	752,9

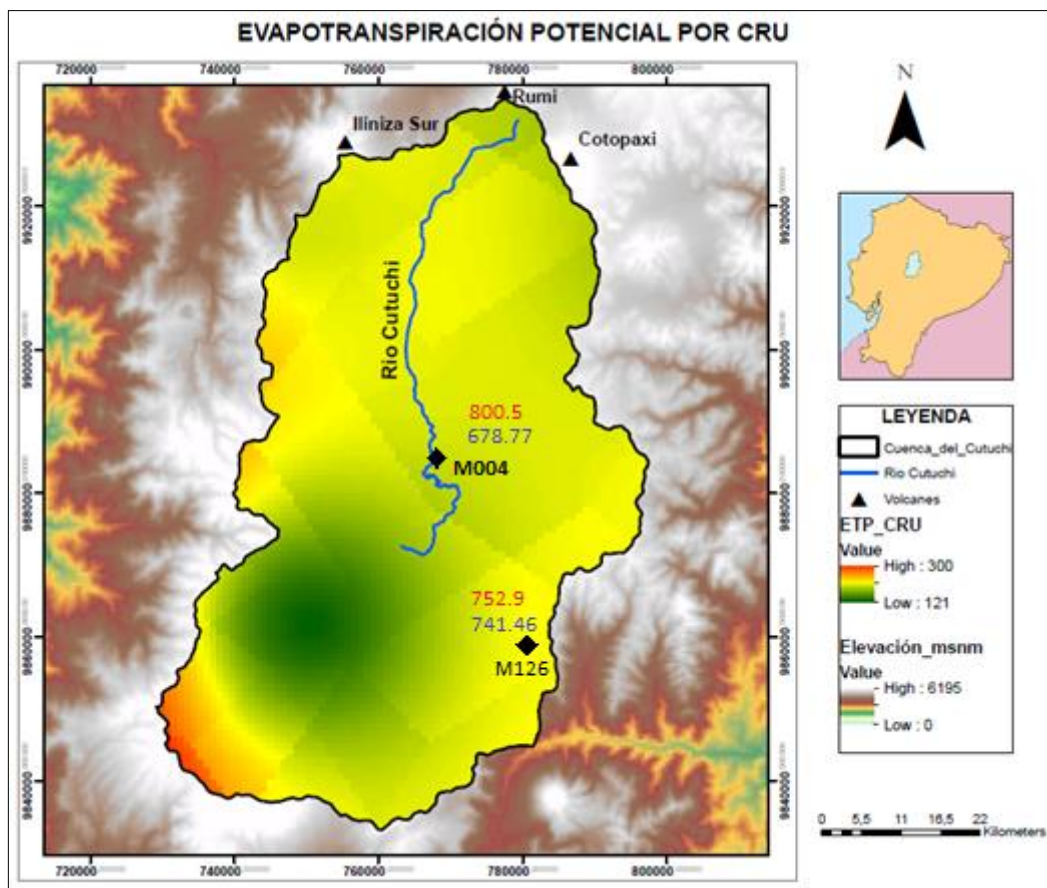
Elaborado por: Cynthia Vaca Nuñez.

Se puede notar que el modelo de Penman-Monteith ubica a Baños (M0029) como la estación que posee el valor máximo de evapotranspiración potencial con un valor de 827.2 mm/año, seguido en orden descendente por el caso de El Corazón (M0123) desde cotas de 820 mm/año, luego se ubica la estación Rumipamba – Salcedo (M0004) con valores de 800,5 mm/año. En el caso de Patate (M0126), se verifican valores similares a los observados en el método Thornthwaite a partir de cotas que se sitúan en los 752 mm/año. Mientras que Pilaló (M0122) se ratifica como estación de menores niveles de evapotranspiración potencial dentro del conjunto. Así, todas las estaciones anteriores revelan resultados que son coincidentes por ambos métodos. Así se puede afirmar que la aplicación de Penman-Monteith evidencia niveles medios anuales muy similares y consistentes con lo presentado por el método de Thornthwaite para el comportamiento medio anual de la evapotranspiración potencial. Sin embargo, el caso de Rumipamba - Salcedo es la única estación que no evidencia un comportamiento similar en sus niveles según lo obtenido por el método anterior. Ahora, desde valores muy elevados 800 mm/año, destaca por una posición intermedia entre todas las estaciones y se sitúa muy por encima de Patate y Pilaló, los que aparecen con los promedios más bajos anualmente.

En todo caso, se puede mencionar que la evapotranspiración potencial se ha presentado con niveles más bajos en la medida que aumentan las cotas altimétricas. Así lo han comprobado investigaciones realizadas por Buytaert (2004); Ochoa et al. (2016) y Torres & Proaño (2018). De esta manera, no es aleatorio que las estaciones de Patate y Pilaló sean aquellas que evidencian los menores valores de evapotranspiración potencial, como se ha mencionado en el capítulo 3, pues se hallan situadas en alturas que sobrepasan los 3000 msnm.

#### **4.2.3. Evapotranspiración potencial mediante el producto CRU.**

A fin de dimensionar la evapotranspiración potencial con la mayor precisión posible, se presenta también el modelo que deriva de la aplicación de CRU. Entre las oportunidades de análisis que este proyecto proporciona, destaca la posibilidad de generar un mapa que le confiere cierta continuidad espacial al comportamiento de la evapotranspiración potencial en la cuenca, tal como se observa en la figura 37.



**Figura 36.** Evapotranspiración potencial de Satélite (CRU) incluido el valor de ETP Thornthwaite (azul) y Penman-Monteith (rojo) en mm/año.

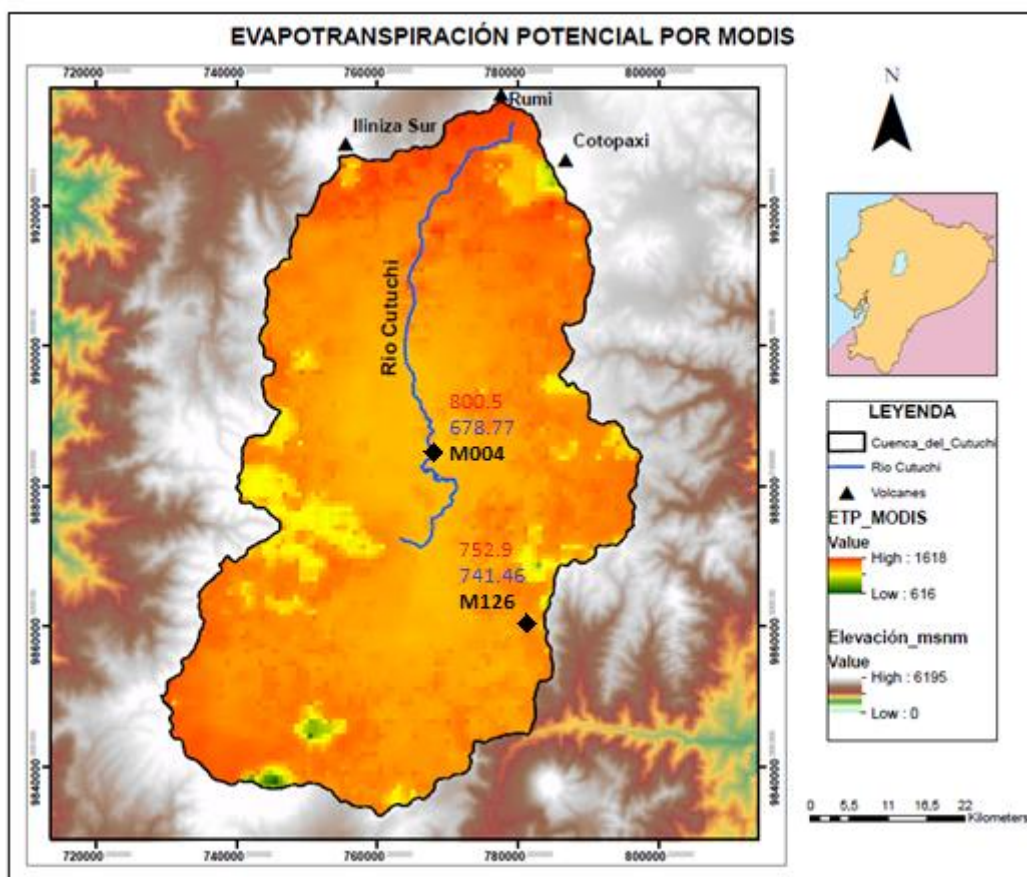
**Elaborado por:** Cynthia Vaca Nuñez

La distribución geográfica que adopta esta variable, destaca valores altos en la zona sur de la subcuenca con valores entre 121 mm/año hasta 300 mm/año. Los valores más bajos se ubican en una pequeña área en la zona centro sur y los valores más altos hacia la zona oeste, sur-oeste.

Los valores que presentan las estaciones estación Rumipambra – Salcedo (M0004) es de 230 mm/año y Patate (M0126) con valores aproximados a los 196 mm/año dichas estaciones se encuentran dentro de la zona de estudio (figura 37).



#### 4.2.4. Evapotranspiración potencial obtenida por MODIS



**Figura 37.** Evapotranspiración potencial (MODIS) incluido el valor de ETP Thornthwaite (azul) y Penman-Monteith (rojo) en mm/año.

**Elaborado por:** Cynthia Vaca Nuñez.

Los resultados obtenidos por las imágenes satelitales del sensor MODIS, muestran valores de evapotranspiración potencial que varían de 616 a 1618 mm/año en la subcuenca de estudio. Para un resultado comparativo entre los dos métodos satelitales se toma como referencia las dos estaciones internas en la zona de estudio la misma que presenta valores de Rumipambra – Salcedo (M0004) 846 mm/año y Patate (M0126) 801 mm/año (figura 38).

Se puede notar una gran diferencia entre los resultados de ETP obtenidos por CRU y MODIS, a pesar de que los dos métodos utilizan imágenes satelitales para el cálculo de esta variable. Esto se debe a que la estimación de ET con cualquier de

los métodos depende entre otros factores como las condiciones meteorológicas, humedad en el suelo, tipo del cultivo, escala espacial y temporal entre otros, esto también se comprueba en otros estudios como el de Tang (2010).

## **4.2. RESULTADOS DE LA ESTIMACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL EN LA CUENCA**

### **4.2.1. Evapotranspiración real aplicando la ecuación general de balance hidrológico**

Para la estimación de la evapotranspiración real en la cuenca mediante la aplicación de la ecuación general de balance hidrológico, se ejecuta, en primera instancia, la obtención de los valores de escurrimiento correspondiente de las estaciones H0817, H0790, H0346, H0347. Con esta información se realizó una interpolación usando la herramienta IDW de ArcGIS. Posteriormente se obtuvieron los valores de escurrimiento en los puntos de las estaciones originales (Rumipamba M004, Baños M0029, Cotopaxi M0120, Pilaló M0122, El Corazón M0123, Patate M0126). Ya que los datos de las estaciones no presentaban la información completa, se trabajó con aquellas mostradas en la tabla 27. Finalmente, con los cálculos de escurrimiento obtenidos, se procedió a realizar el balance hídrico y se obtuvieron los resultados de la evapotranspiración real anual en la subcuenca de estudio. La ecuación a utilizar en este proceso será:

$$P = Q + ET \pm \Delta S \qquad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

**P:** precipitación

**Q:** escurrimiento

**ET:** evapotranspiración.

Donde  $\Delta S$  (almacenamiento) es igual a cero para largos periodos de tiempo como la escala anual, pues los parámetros que intervienen en la ecuación tienden a equilibrarse.

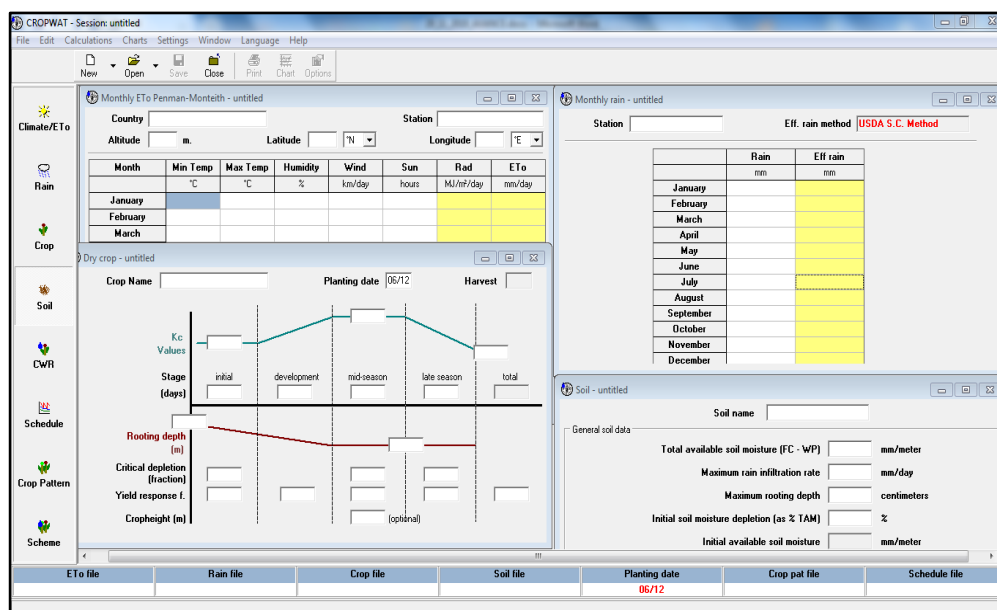
**Tabla 27.** Resultados de la evapotranspiración real mediante la ecuación general del Balance Hídrico.

	Rumipamba	Baños	Cotopaxi	Pilaló	El Corazón	Patate
	M004	M0029	M0120	M0122	M0123	M0126
<b>Precipitación (mm/año)</b>	665.0	1316.5	1309.0	1309.3	2610.7	728.0
<b>Escorrentía (mm/año)</b>	45.61	80.44	51.32	65.84	80.1	33.99
<b>ETR (mm/año)</b>	619.4	1236.1	1257.7	1243.5	2530.6	694.0

Elaborado por: Cynthia Vaca Nuñez

#### 4.2.2. Evapotranspiración real mediante el método de Penman-Monteith (FAO)

Dado que el cálculo de la evapotranspiración real es complejo, la FAO ha desarrollado un software que permite obtener dicho valor con mayor facilidad. El Software se llama CROPWAT y sus componentes se muestran en la figura 39.



**Figura 38.** Interfaz del programa CROPWAT con sus respectivos componentes.

Fuente: CROPWAT 8.0

Elaborado por: Cynthia Vaca

Los componentes que requiere el software para determinar la evapotranspiración real son: datos de precipitación, la información correspondiente a cultivo (Crop), y finalmente las características del suelo. Así, se procedió a establecer en cada una

de las estaciones meteorológicas el tipo de suelo de la estación y tipo de cultivo que prevalece en las zonas acorde a los mapas obtenidos por el INAMHI y MAGAP.

**Tabla 28.** Datos del cultivo, kc y tipo de suelo de cada estación (CROPWAT).

<b>Código</b>	<b>Estación</b>	<b>Cultivo</b>	<b>Kc</b>	<b>Tipo de suelo</b>
<b>M004</b>	Rumipamba- Salcedo	vegetales	0.70-1.05 -0.95	medio
<b>M0122</b>	Pilalo	pasto	0.90-0.95 -0.90	medio
<b>M0123</b>	El Corazón	pasto	0.90-0.95 -0.90	medio
<b>M0029</b>	Baños	vegetales	0.70-1.95 -0.95	medio
<b>M0126</b>	Patate	vegetales	0.70-1.05 -0.95	medio

Elaborado por: Cynthia Vaca Nuñez.

En este sentido, la tabla 28 es relevante toda vez que muestra los valores de kc como los mismos que corresponden a etapas del cultivo: inicial (siembra), media (crecimiento) y final (cosecha), los valores son determinados por la FAO y establecidos en el programa cuando se registra o selecciona un cultivo. También se establece el tipo de suelo de la cuenca por cada estación por medio de un mapa de textura y así poder completar los componentes requeridos para determinar los resultados de evapotranspiración real que se verifica en la tabla 29.

**Tabla 29.** Evapotranspiración real por el método de Penman-Monteith FAO para las estaciones meteorológicas indicadas-CROPWAT.

<b>Código</b>	<b>ETR (mm/año)</b>
<b>M0004</b>	1029.82
<b>M0122</b>	1039.11
<b>M0123</b>	1126.04
<b>M0029</b>	1129.83
<b>M0126</b>	903.58

Elaborado por: Cynthia Vaca Nuñez.

La tabla 29 muestra la evapotranspiración real anual de cada estación, en donde se tiene que la estación Patate M0126 presenta el mínimo valor de ET real de 903.58 mm/año y Baños M0029 obtuvo una ET real de 1129.83 mm/año que es el máximo valor entre todas las estaciones en la zona de estudio.

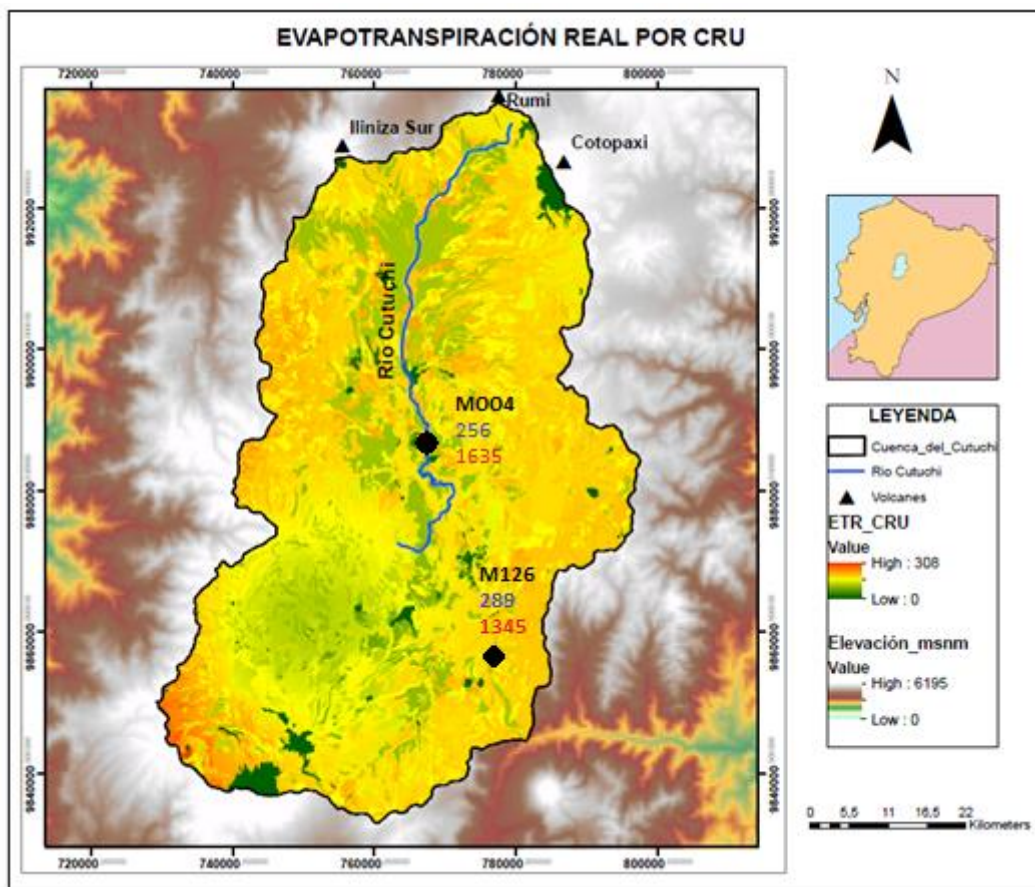
#### **4.2.3. Evapotranspiración real por satélite (CRU)**

La figura 39 presenta los resultados obtenidos mediante el análisis CRU el mismo que se obtuvo con el procesamiento de imágenes raster, que a su inicio se

presentan como valores atípicos de evapotranspiración real de referencia. Con el programa ARGIS se logra procesar los raster para identificar la evapotranspiración real, empezando por la transformación de las imágenes satelitales a puntos de referencia en base a los rangos de tiempos, interpolación por medio de IDW (Ponderación de distancia inversa) para tener un resultado de un raster depurado el mismo que delimita a la zona de estudio y se lo utiliza para el cálculo para la evapotranspiración real.

Para concluir con el cálculo se realiza la multiplicación del raster depurado (evapotranspiración de referencia) por los valores determinado del coeficiente  $k_c$  (coeficiente de cultivo, usado en el método de Penman Monteith) que se representa en un raster con valores que van desde 0.1-1. Se realiza el proceso para cada uno de los años analizados y se obtiene un promedio para concluir como resultado la Figura 40.

La aplicación del método CRU determino valores de evapotranspiración real de hasta 308 mm/año (figura 40) en la cuenca. Los mismos se observa que los menores valores de ETR se presentan en el centro de la cuenca, evidenciando que en la parte de menor altura se obtienen los menores niveles para esta variable hidrometereológica.

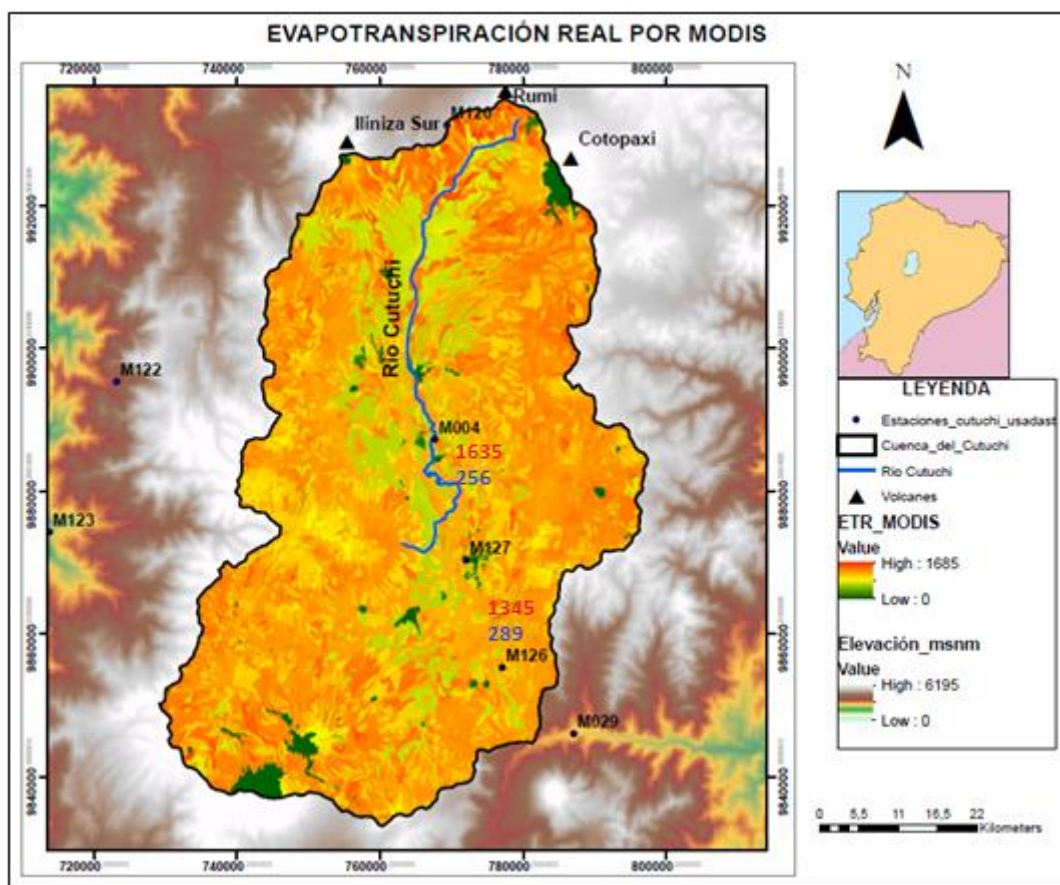


**Figura 39.** Evapotranspiración Real por Satélite CRU

**Elaborado por:** Cynthia Vaca Nuñez.

Asimismo, se observa los valores más elevados de ETR se ubican tanto al norte y al sur de la cuenca. De esta manera, al observar los datos, se infiere que los valores relativamente altos de evapotranspiración real se presentan en la zona de la estación Cotopaxi-Clirsen M0120, valores intermedios en las estaciones de Baños M0029 y Patate M0126 y finalmente los valores más bajos en la estación Rumipamba-Salcedo M004, Patate y Pilaló (figura 40).

#### 4.2.4. Evapotranspiración real por MODIS



**Figura 40.** Mapa de Evapotranspiración Real obtenido por MODIS

**Elaborado por:** Cynthia Vaca Nuñez.

Por último, un proceso comparativo para la determinación de la evapotranspiración real por medio de imágenes satelitales es utilizando MODIS la cual proporciona datos en resoluciones de 250, 500 y 1.000 metros en coordenadas UTM en un rango anual del 2000 a 2014 que son interpoladas usando el método IDW para ser procesadas. Los datos de MODIS son definidos mediante un algoritmo mejorado basado en la ecuación de Penman- Monteith y son procesadas en el programa en ARCGIS en similitud al proceso CRU que se explicó en el subcapítulo 4.3.3. Mediante un proceso algebraico con el coeficiente  $k_c$  da como resultado un ráster de evapotranspiración real presentado en la Figura 41. En la zona de estudio, los valores de evapotranspiración real obtenidos por satélite (MODIS) llegan hasta 1685 mm/año.

Finalmente, es posible resumir que los resultados de la evapotranspiración potencial anual en el método de Thornthwaite muestra similitud con los resultados obtenidos en el caso de Penman-Monteith. Para el caso de los métodos satelitales, se tienen valores de ETR hasta 300 mm/año con CRU y hasta 1600 mm/año con MODIS.

La tabla 34 presenta un cuadro comparativo de los valores obtenidos de evapotranspiración real aplicando las fórmulas teóricas de Thornthwaite y Penman-Monteith los cuales presentan una similitud en sus valores teóricos en el transcurso de procesamiento de datos, resaltando que dichas fórmulas son generales para la aplicación en futuras investigaciones. Sin embargo, los dos métodos satelitales presentan gran variación en los resultados obtenidos por lo que no se puede generalizar el método y debería ser mejor estudiado antes de ser extrapolado a otras áreas.

**Tabla 30.** Valores Comparativos entre las dos fórmulas empíricas Penman-Monteith y Ecuación General (mm/año)

Código	Estación	ETP (mm/año) CRU	ETP (mm/año) MODIS	ETR Penman- Monteith (mm/año)	ETR Ecuación General (mm/año)
M0004	Rumipamba-Salcedo	256	1635	1029.82	619.4
M0122	Pilaló			1039.11	1243.5
M0123	El Corazón			1126.04	2530.6
M0029	Baños			1129.83	1236.1
M0126	Patate	289	1345	903.58	694

Elaborado por: Cynthia Vaca Nuñez.



## CAPÍTULO 5

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. CONCLUSIONES

- Las características de la subcuenca del río Cutuchi como su longitud axial de 87 kilómetros permitió identificar a la cuenca de una forma intermedia de oval redonda a oval oblonga que, extendida de norte a sur, contribuye a la aportación de escurrimiento, con tendencia a la existencia de crecientes rápidas y acentuadas, propias de las cuencas muy altas del relieve fluvial andino.
- En la cuenca se identificó que la precipitación presenta, por un lado, regímenes bimodales con valores máximos en los meses de marzo y abril y en noviembre y diciembre. De igual manera se evidenció que el mes de abril se dan los valores máximos de caudal en la zona y los valores bajos de caudal se tiene en los meses de agosto y septiembre. También se pudo evidenciar que la distribución espacial anual de la precipitación en la cuenca es irregular debido a la influencia de la región amazónica y a la forma de la cuenca, tendiéndose a valores bajos de precipitación en medio de la cuenca y valores altos a los extremos tanto al oeste por la zona de Pilaló y al este de la cuenca en Baños.
- Los métodos de cálculo de evapotranspiración utilizados en el trabajo permitieron notar que la tasa de evapotranspiración potencial es mayor en los meses de febrero a mayo y de octubre a diciembre esto considerando a la evapotranspiración potencial como la capacidad máxima de agua que puede ser perdida por una capa continua de vegetación que cubre todo el terreno, cuando la cantidad de agua suministrada al suelo es ilimitada.
- En el trabajo realizado se pudo notar que el método de Thornthwaite y Penman-Monteith presenta resultados similares de ETP de hasta 800

mm/año, estos valores concuerdan con los resultados en zonas con abundante vegetación y climas templados.

- CRU es el método satelital que dio como resultados los menores valores de evapotranspiración potencial y real de hasta 300 mm/año, mientras que MODIS presentó valores de más de 1600 mm/año.
- Las diferentes metodologías utilizadas para el cálculo de la evapotranspiración potencial y real presentan procesos y variables diferentes para el cálculo de cada variable hidrometeorológica, por ende, se observa la variación entre los resultados obtenidos por cada uno de los métodos.

## **5.2. RECOMENDACIONES**

- La implementación y mantenimiento de las estaciones meteorológicas es necesario para garantizar la recopilación de datos climáticos confiables que puedan ser utilizados en un futuro para estudios hidrológicos.
- Mejorar la planificación territorial en la zona para identificar las áreas adecuadas para el sector agrícola y pecuario, así como aquellas áreas de conservación a fin de proteger los ecosistemas que mantienen los ciclos hidrológicos.
- Continuar con un estudio hidrológico en la zona para determinar la existencia de un posible aporte de agua subterránea en la subcuenca del río Cutuchi pues esto puede mejorar la estimación del balance hídrico en la zona.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allen, B. (2007). *Hidrología Básica y Aplicada*. México DF, México: Grupo de Investigación en Transporte de Sedimentos. Recuperado de <https://tinyurl.com/y5pyyla2>
- Andrade, D., Hall, M., Mothes, P., Troncoso, L., Eissen, J., Samaniego, P., . . . Yepes, H. (2005). *Los peligros volcánicos asociados al Cotopaxi. (Serie los peligros volcánicos del Ecuador ed., Vol. 3)*. Quito, Ecuador: Corporación Editora Nacional IG-EPN.
- Arumí, J., Fuente, L., & Vargas, J. (2012). *Balance hídrico mensual de una cuenca Patagónica de Chile: Aplicación de un modelo parsimonioso. Obras y proyectos (12)*. doi:<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-28132012000200003>
- Blanquer, J., Ibáñez, S & Moreno-Ramón, H. (2010). *La textura del suelo*. Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/50839531\\_La\\_textura\\_del\\_suelo](https://www.researchgate.net/publication/50839531_La_textura_del_suelo).
- Bohn, V., & Campo, A. (2010). *Estimación de escurrimientos superficiales para cuencas no aforadas en Corrientes, Argentina. Investigaciones geográficas, (71), 31-42*. Recuperado de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0188-46112010000100004&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112010000100004&lng=es&tlng=es).
- Bornhofen, E., Todeschini, M.E., Simionato, M.A., Maciel, T.D., Finatto, T., Storck, L. y Benin, G. (2015) *Nitrogen use efficiency in modern wheat cultivars. Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Pato Branco (PR), Brasil*.
- Breña, A., & Jacobo, M. (2006). *Principios y fundamentos de la hidrología superficial*. Ciudad de México: Universidad Autónoma Metropolitana.
- Bustamante, M. (2012). *Diagnóstico preliminar de la contaminación en el río Cutuchi y propuesta de un sistema de depuración para las aguas residuales de la ciudad de Salcedo*. Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Ingeniería Ambiental, Quito. Recuperado el 15 de Junio de 2019, de <https://www.planning.org>

- Buttle, J. (1988). *Fundamentals of small catchments hydrology (Isotope tracers in catchment hydrology ed.)*. (K. C. J.J, Ed.) Holland: Elsevier.
- Cabrera, J. (2011). *Modelos Hidrológicos*. Recuperado de [http://www.imefen.uni.edu.pe/Temas\\_interes/modhidro\\_2.pdf](http://www.imefen.uni.edu.pe/Temas_interes/modhidro_2.pdf).
- Chen, F. and Dudhia, J. (2001) *Coupling an Advanced Land Surface-Hydrology Model with the Penn State-NCAR MM5 Modeling System. Part I: Model Implementation and Sensitivity*. *Monthly Weather Review*, 129, 569-585.
- Chow, V.T., Maidment, D., Mays, L. (1994). *Hidrología aplicada*. Bogotá. McGraw-Hill interamericana, 584p.
- CNRH, CODERECO, & COHIEC. (2002). *Estudio Proyecto piloto Manejo integral del Recurso Hídrico y tratamiento de las aguas servidas en la cuenca del Río Cutuchi*. Quito.
- Coral, A., Leal, A., & Tomaselli, J. (2015). *Cálculo de balance hídrico usando modelamiento de datos espaciales: estudio aplicado a la cuenca del río Buena Vista, Ecuador*. *Formação*, 2(22), 119-137.
- De las Salas, G., & García, C. (2000). *Balance hídrico bajo tres coberturas vegetales contrastantes en la Cuenca del río San Cristóbal, Bogotá*. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 24.
- Duque-Sarango, P., Cjamarga-Rivadeneira, R., Wemple, B., & Delgado, M. (2019). *Estimación del balance hídrico de una cuenca andina tropical*. *La granja revista ciencias de la vida*, 29(1), 59-69. doi: <https://doi.org/10.17163/lgr.n29.2019.05>
- FAO. (2007). *La nueva generación de programas y proyectos de gestión de cuencas hidrográficas*. Roma: Food & Agriculture Org, 150, 139p.
- Figueira, E. (2019). *Comparación de dos métodos de diferenciación de temperatura para estimar la evapotranspiración diaria sobre la cuenca del río Chirgua en*

*el Estado Carabobo usando imágenes satelitales. Universidad de Carabobo, Venezuela*

*García-Fayos, P. (2004). Interacciones entre la vegetación y la erosión hídrica. Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante, 309-334.*

*González, J. I. (2000). Guía metodológica para el estudio de las Cuencas Hidrológicas Superficiales con proyección de manejo. Universidad de la Habana. La Habana: Inédito. Recuperado el 2020*

*González, J. I. (1988). Hidrología práctica. La Habana: Pueblo y Educación.*

*González, J. I. (2011). El manejo de cuencas en Cuba: Un instrumento de planificación territorial. Planificación territorial: presencias y ausencias, V. doi:[https://bdigital.uncu.edu.ar/objetos\\_digitales/13594/05gonzalezproyeccion10.pdf](https://bdigital.uncu.edu.ar/objetos_digitales/13594/05gonzalezproyeccion10.pdf)*

*Hernández, J., & Ortiz, M. (2005). Análisis morfoestructural de las cuencas hidrográficas de los ríos Sabana y Papagayo (tercio medio-inferior), estado de Guerrero, México. Investigaciones geográficas (56), 7-25.*

*Inzunza, J. (2019). Meteorología descriptiva. Concepción, Bío- Bío, Chile: Universitaria. Recuperado de [http://www.met.igp.gob.pe/users/yamina/meteorologia/radiacion\\_doc\\_Univ\\_CHile.pdf](http://www.met.igp.gob.pe/users/yamina/meteorologia/radiacion_doc_Univ_CHile.pdf)*

*Llambi, L., Soto, A., Celeri, R., De Bièvre, B., Ocho, B., & Borja, P. (2012). Ecología, hidrología y suelos de páramos. Quito: Proyecto Páramo Andino.*

*Llerena, C. (2003). Servicios ambientales de las cuencas y producción de agua, conceptos, valoración y experiencias y sus posibilidades de aplicación en el Perú. FAO. Arequipa: Foro Regional sobre Sistemas de Pago por Servicios Ambientales (PSA). Tercer Congreso Latinoamericano de Manejo de Cuencas Hidrográficas. Recuperado de*

[http://www.fao.org/tempref/GI/Reserved/FTP\\_FaoRlc/old/foro/psa/pdf/lIlerena.pdf](http://www.fao.org/tempref/GI/Reserved/FTP_FaoRlc/old/foro/psa/pdf/lIlerena.pdf)

Liang, S., & Wang, J. (2019). *Advanced Remote Sensing: terrestrial information extraction and applications*. (2 ed), 621-647.

López, I., Peña, R., & Velastequi, J. (2019). *Determinación del balance hídrico y mapeo con sistemas de información geográfica de la microcuenca de la quebrada de Quillalli en el Cantón Ambato*. *Ciencia digital*, 3(4.2), 129-143. doi:<https://doi.org/10.33262/cienciadigital.v3i4.2.1014>

Lvovitch, S. (1959). *Hidrología Práctica*. La Habana: Pueblo y Ecuación.

Maya, M. E. (2006). *Estudio hidrológico y optimización del recurso hídrico de la cuenca del río Cutuchi en la ciudad de Latacunga y sus zonas aledañas*. Quito: Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Recuperado de <http://repositorio.puce.edu.ec/handle/22000/2260>

Mayorga, E. (2013). *Comportamiento iónico-pluvial en la cuenca del Cutuchi durante invierno y verano 2013*. *FIGEMPA: Investigación Y Desarrollo*, 45-52.

Mendoza, M., Bocco, G., López, E., & Bravo, M. (2002). *Implicaciones hidrológicas del cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo: una propuesta de análisis espacial a nivel regional en la cuenca cerrada del lago de Cuitzeo, Michoacán*. *Investigaciones Geográficas*(49), 92-117.

Monsalve, G. (1999). *Hidrología en la Ingeniería*. México: Alfaomega.

Montaner Salas, M. E., & Sánchez-Almohalla Serrano, E. (1988). *Aproximación por el método de Thornthwaite, al cálculo de infiltración de lluvia útil*. *Papeles de Geografía*, (14), 223-235. Recuperado de <https://revistas.um.es/geografia/article/view/42801>

- Montanarella, L. (2015). *Agricultural policy govern our Nature*, 528. Recuperado de <https://www.nature.com/news/agricultural-policy-govern-our-soils-1.18854>
- Morejón, Y., Vega, M., Escarré, A., Peralta, J., Quitero, A., & González, J. I. (2015). *Análisis de balance hídrico en cuencas hidrográficas de la Sierra de los Órganos*. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 36(2). 94-108. Recuperado de [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1680-03382015000200008&lng=es&tlng=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382015000200008&lng=es&tlng=es).
- Mu, Q., Jones, L., Kimball, J., McDonald, K., & Running, S. (2009). *Satellite assessment of land surface evapotranspiration for the pan-Arctic domain*. *Water Resources Research*, 45, 1-20. doi:doi:10.1029/2008WR007189.
- Núñez, J. (2000). *Fundamentos de edafología*. (EUNED, Ed.) San José: Universidad estatal a distancia.
- Olmo, M., Bettolli, M., & Rusticucci, M. (2020). *Atmospheric circulation influence on temperature and precipitation individual and compound daily extreme events: Spatial variability and trends over southern South America*. *Weather and Climate Extremes*, 29, Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212094719302233>
- Ordoñez, J. (2014). *Cartilla técnica: Balance Hídrico Superficial. Contribuyendo al desarrollo de una Cultura del Agua y la Gestión Integral de Recurso Hídrico*. Departamento de Ingeniería . Lima: Sociedad Geográfica de Lima. Recuperado de [https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam\\_files/publicaciones/varios/balance\\_hidrico.pdf](https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files/publicaciones/varios/balance_hidrico.pdf)
- Recalde, J. (2002). *Manejo integral de los recursos hídricos y tratamiento de las aguas*. Latacunga: Cohiec Co. Ltda.
- Rodríguez, A. (2000). *Geomorfología*. Moa, Cuba: Instituto Superior Mínero Metalúrgico. Recuperado de

<http://ninive.ismm.edu.cu/bitstream/handle/123456789/1661/RodriguezG.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Rodríguez, R., Benito, Á., & Portela, A. (2004). *Meteorología y Climatología*. Madrid: FECYT (Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología). Recuperado de <https://cab.inta-csic.es/uploads/culturacientifica/adjuntos/20130121115236.pdf>

Schad, P., & Vargas, R. (2015). *Base Sistema internacional de clasificación de suelos para la nomenclatura de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos*. 101-106: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

Segura-Castruita, M., & Ortiz-Solorio, C. (2017). *Modelación de la evapotranspiración potencial mensual a partir de temperaturas máximas-mínimas y altitud*. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 8(3), 93-110. Recuperado de <http://www.scielo.org.mx/pdf/tca/v8n3/2007-2422-tca-8-03-00093.pdf>

Taco, L. (2000). *Estudio hidrológico de la cuenca del río Cutuchi, aguas arriba de la estación hidrométrica Cutuchi A. J. Yanayacu*. Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.

Taco, L., Galarraga-Sanchez, R. (2002). *Modelación de un acuífero regional andino para determinar sus características y vulnerabilidad : El caso del acuífero del río Cutuchi, Ecuador*. (J. R. Vargas, Ed.) *Manejo integrado de aguas subterráneas: Un reto para el futuro*, 189-202.

Tang, R.; Li, Z. -L. and Tang, T. 2010. *An application of the Ts-VI triangle method with enhanced edges determination for evapotranspiration estimation from MODIS data in arid and semi-arid regions: Implementation and validation*. *Remote Sensing of Environment* 114:540-55



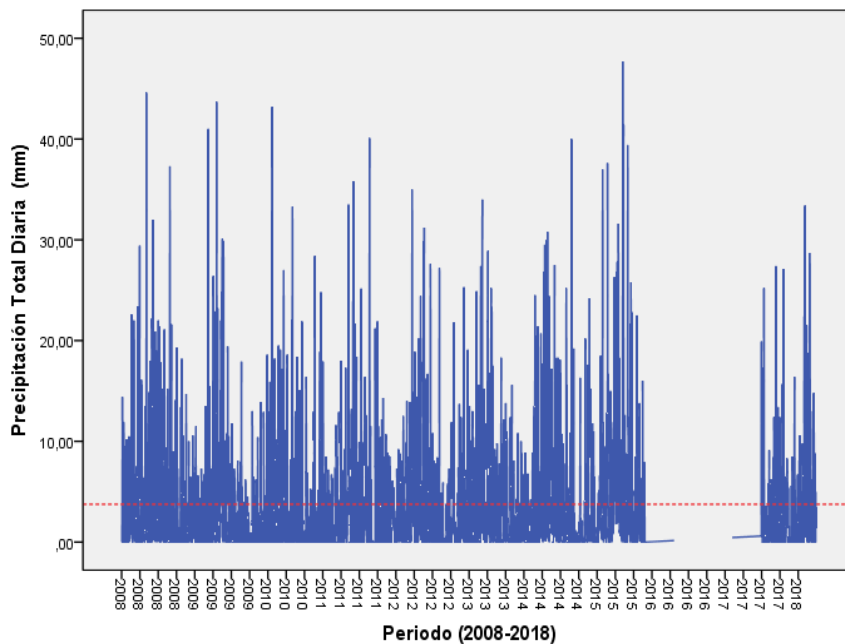
- Tapia, J. (2016). *Estructura de la precipitación y su variabilidad espacio-temporal a lo largo de una gradiente altitudinal*. Universidad de Cuenca, Ingeniería civil, Cuenca, Ecuador.
- Thornthwaite, C. (1948). *An approach toward a rational classification of climate*. *Geographical Review*, 38(1), 55-94. Recuperado de <https://www.jstor.org/stable/210739>
- Torres, S., & Proaño, O. (2018). *Componentes del Balance hídrico en los páramos de Jatunsacha, Ecuador*. *La Granja: Revistas de Ciencias de la Vida*, 2(28), 52-66. doi:<https://doi.org/10.17163/lgr.n28.2018.04>
- USDA. (2018). *Portal de Suelos de la FAO*. Argentina: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- Velasquez- Restrepo, M & Poveda, G (2019). *Estimación del balance hídrico de la región Pacífica Colombiana*. *Revista DYNA*, 86 (208). Recuperado de [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0012-73532019000100297](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532019000100297)
- Vuille, M., Bradley, R.S., Werner, M., Keimig, F. (2003). *20th century climate change in the tropical Andes: observations and model results*. *Climatic Change* 59 (1–2), 75–99
- Wielicki, B. A., T. Wong, R. P. Allan, A. Singo, J. T. Kiehl, B. J. Soden, C. T. Gordon, A. J. Miller, S.-K. Yang, D. A. Randall, F. Robertson, J. Susskind, & H. Jacobowitz (2002). *Evidence for large decadal variability in the tropical mean radiative energy budget*. *Science*. 295, 841-844.
- Zuñiga, I., & Crespo, E. (2010). *Meteorología y Climatología*. ENED.

## **ANEXO**

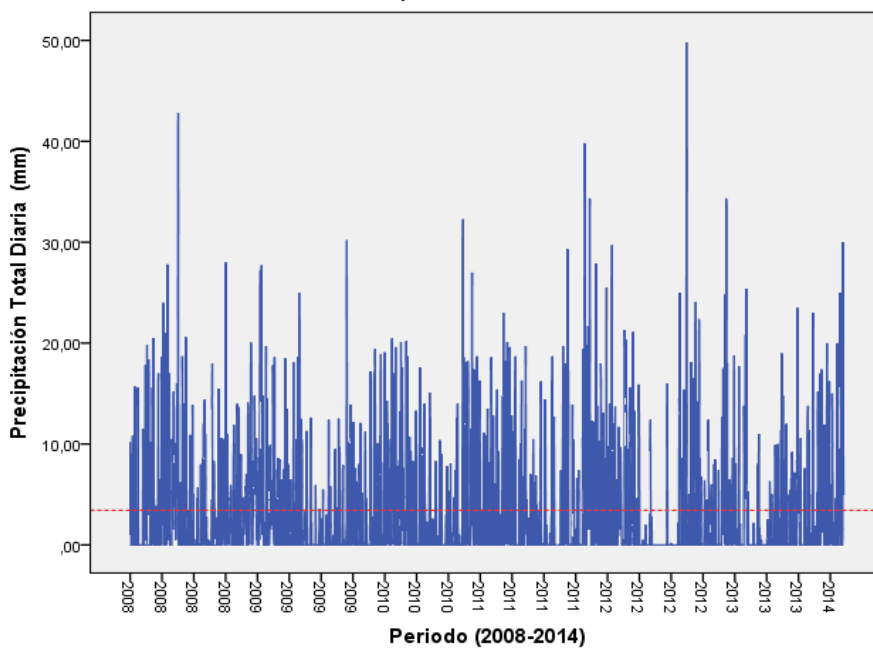
## **ANEXO N1**

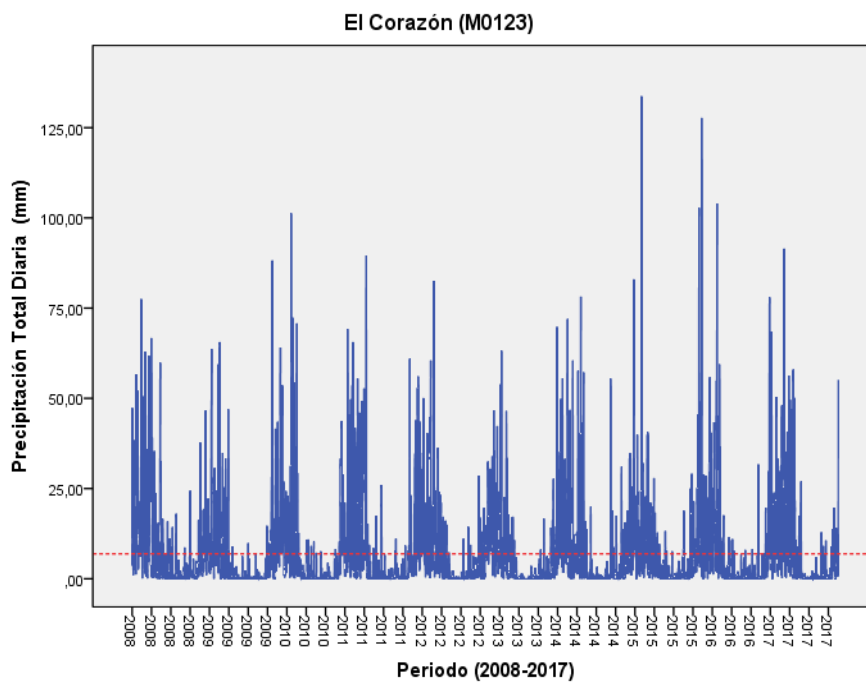
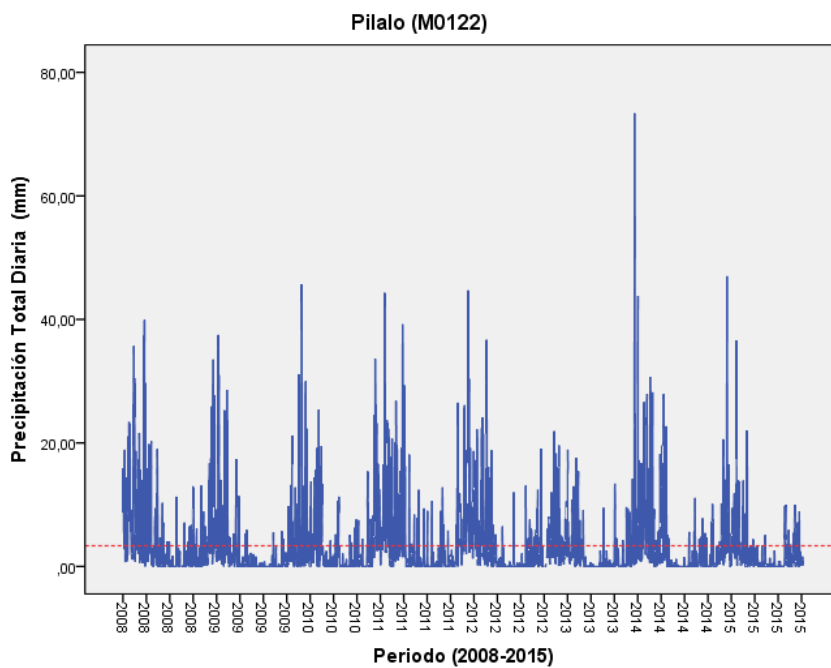
**Valores medios diarios de precipitación.**

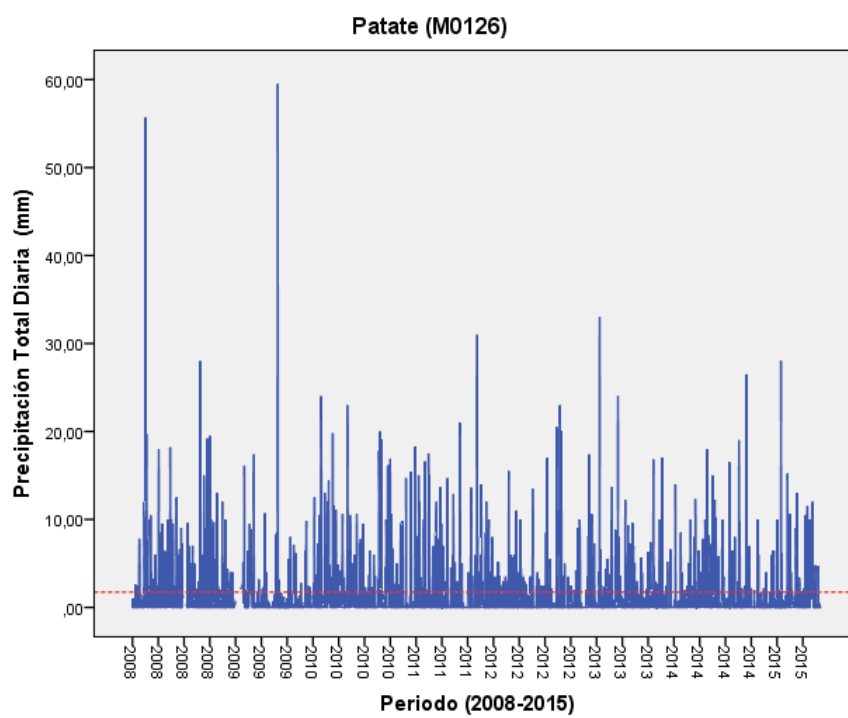
**Baños (M0029)**



**Cotopaxi-Clirsén**







## **ANEXO 2**

### **CURVAS DE DOBLE MASA**

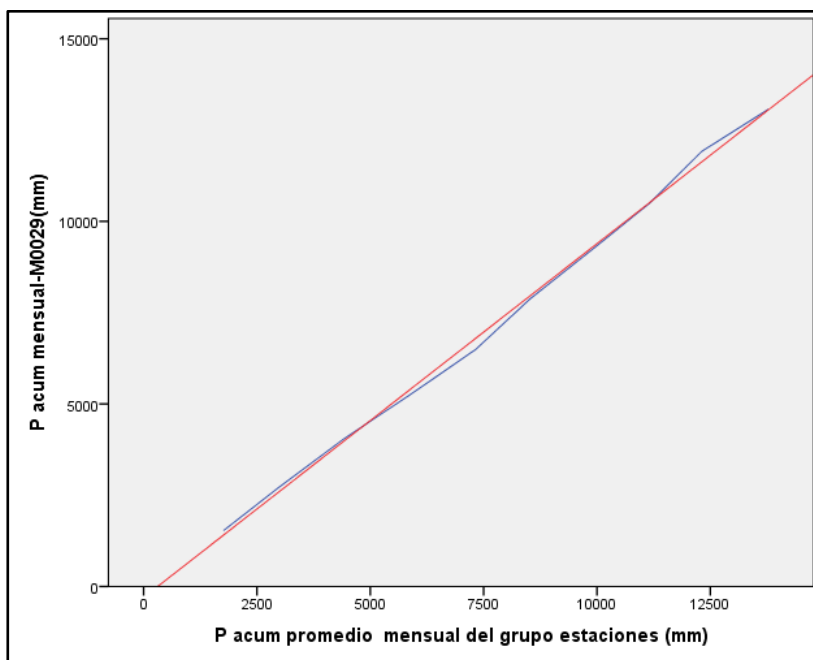


Figura: Curva de doble masa - estación M0029

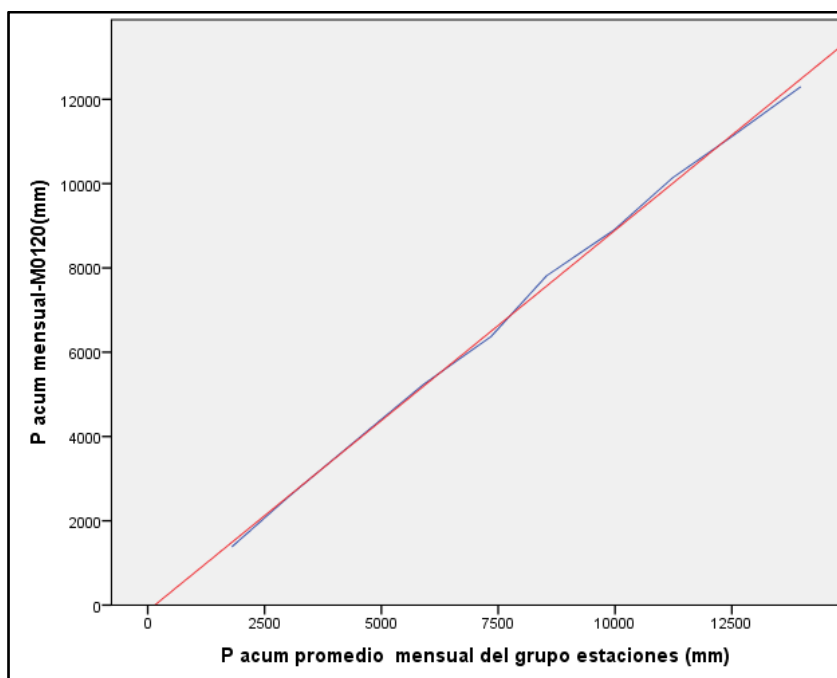


Figura: Curva de doble masa - estación M0120



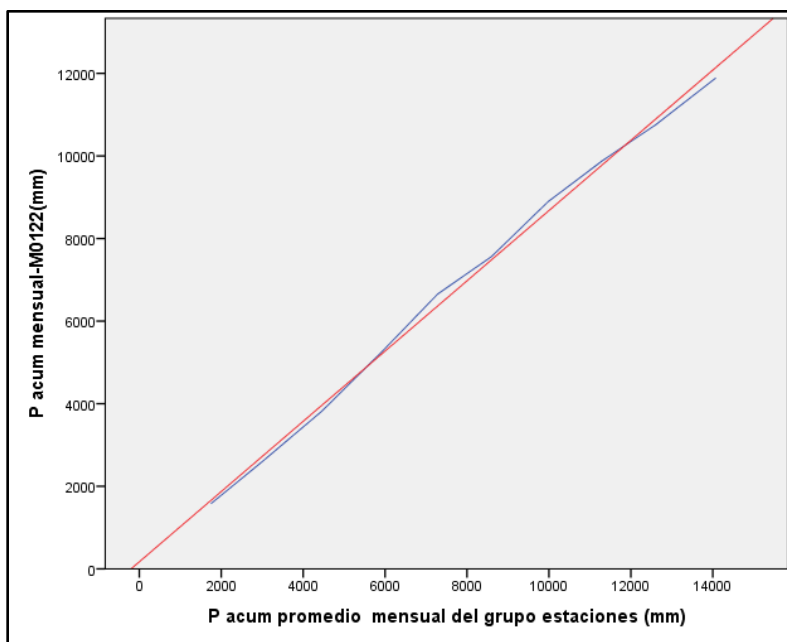


Figura: Curva de doble masa - estación M0122

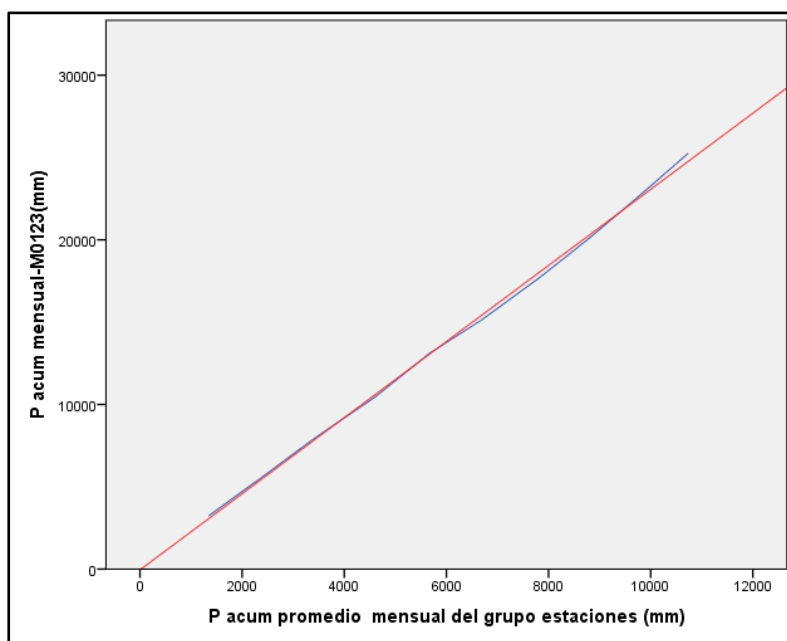


Figura: Curva de doble masa - estación M0123

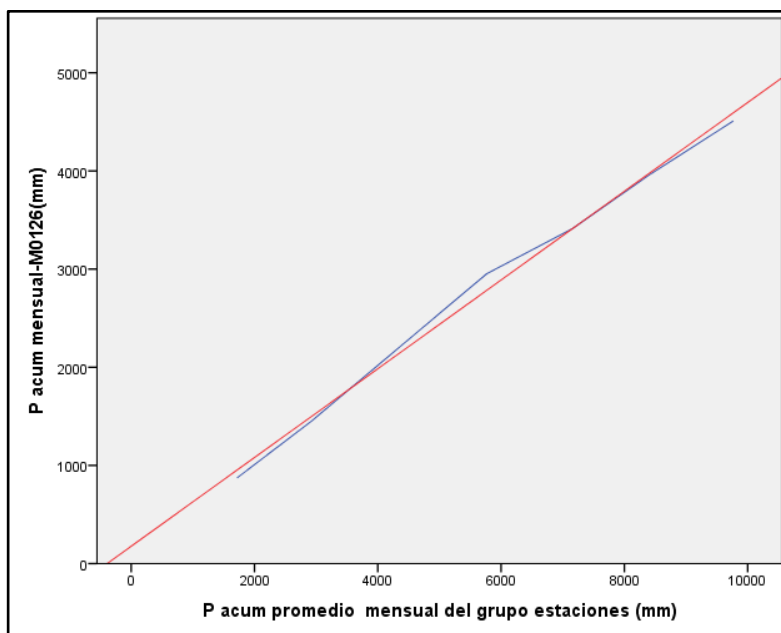


Figura: Curva de doble masa - estación M0126

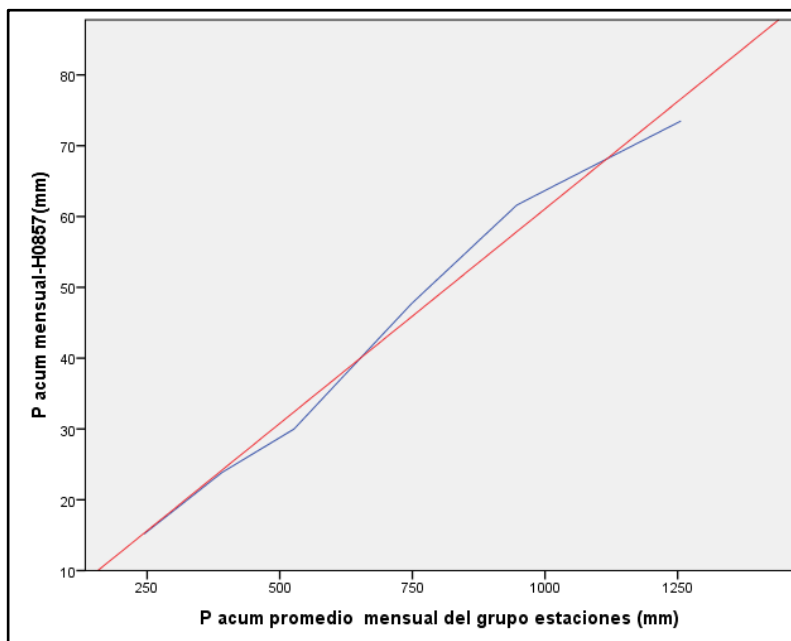


Figura: Curva de doble masa - estación M0857

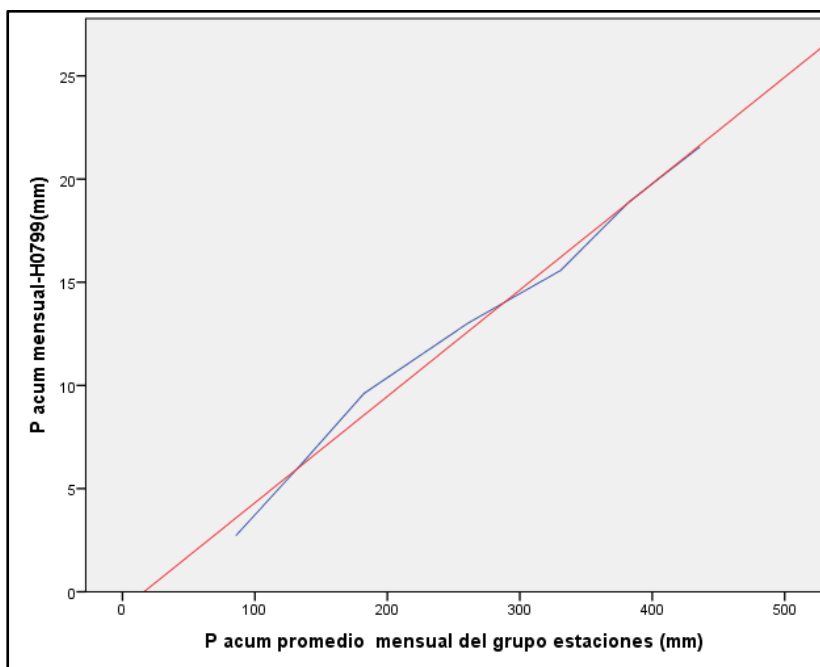


Figura: Curva de doble masa - estación M0799

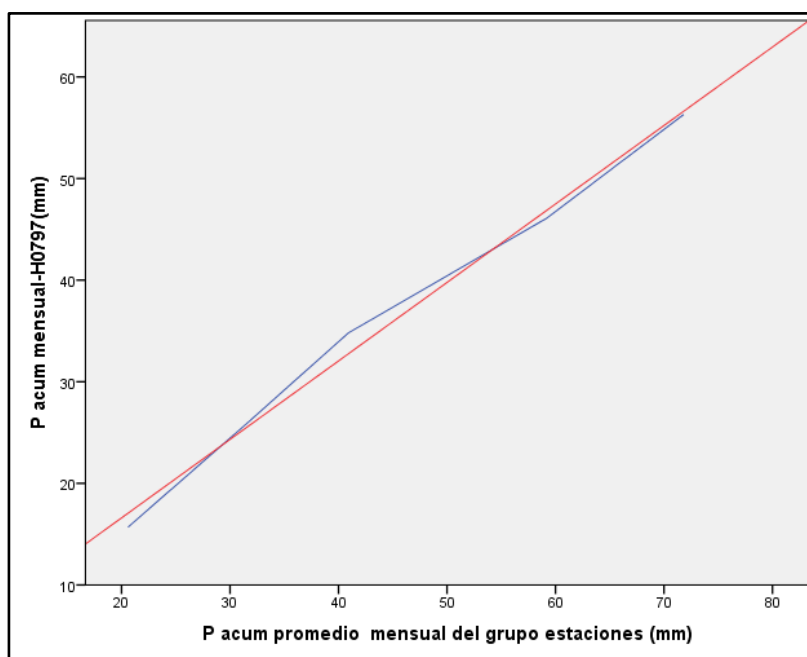


Figura: Curva de doble masa - estación M0797

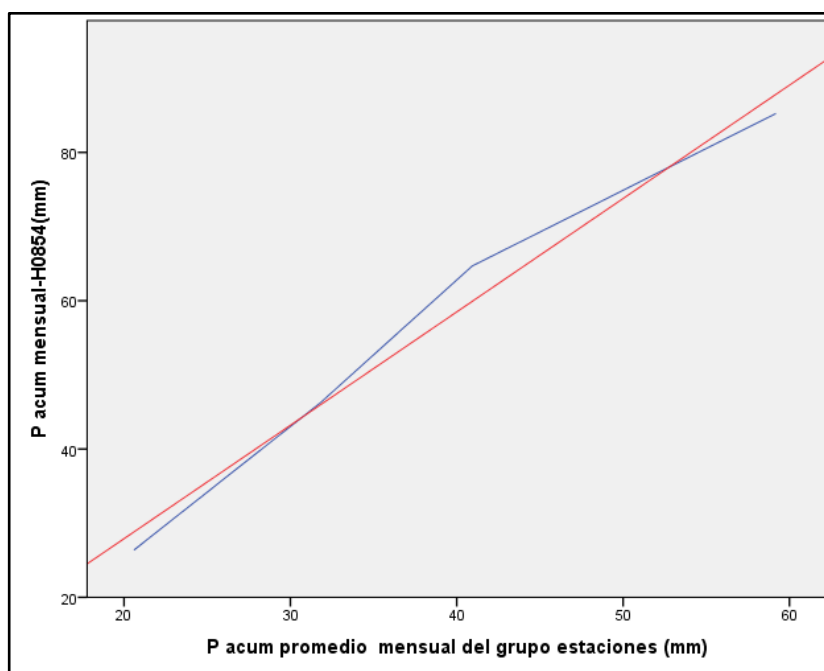


Figura: Curva de doble masa - estación M0854

### **ANEXO 3**

## **EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL ANUAL USANDO EL MÉTODO THORNTHWAITE**

**EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL ANUAL EN EL PERIODO 2008-2011**  
**USANDO EL MÉTODO THORNTHWAITE**

<b>Estación</b>	<b>Años</b>	<b>Valor (mm)</b>
Baños (M0029)	2008	794,6
	2009	808,0
	2010	814,8
	2011	808,4
El Corazón (M0123)	2008	785,6
	2009	807,4
	2010	806,8
	2011	791,8
Patate (M0126)	2008	749,0
	2009	730,6
	2010	741,8
	2011	745,5
Pilaló (M0122)	2008	649,3
	2009	657,9
	2010	664,5
	2011	652,3
Rumipamba-Salcedo (M004)	2008	670,5
	2009	685,7
	2010	683,1
	2011	675,8

**Elaborado por:** Cynthia Vaca Nuñez.

