

UNIVERSIDAD DE CUENCA



Facultad de Ciencias Químicas
Carrera de Ingeniería Ambiental

**Análisis del rendimiento hídrico en cuencas de alta montaña en los Andes
Ecuatorianos**

**Trabajo de titulación previo a la obtención
del título de Ingeniero Ambiental**

Autoras:

Katherine Daniela Belesaca Zhunio C.I. 0106822745

Katherine Isabel Peláez Palacios C.I. 0105778211

Director:

Ing. Edison Patricio Timbe Castro PhD C.I. 0301289963

Tutor:

Ing. Mario Xavier Gualpa Gualpa C.I. 0302224068

Cuenca – Ecuador

2018



RESUMEN

Las cuencas de los Andes tropicales comprenden una variedad de ecosistemas, entre estos se encuentran bosques andinos y zonas de páramo. La importancia de estos ecosistemas andinos radica en la provisión de servicios ambientales. Particularmente el suministro de agua en la cuenca del río Paute, ubicada en las estribaciones sur-orientales de los Andes Ecuatorianos, depende del estado de conservación de los ecosistemas que forman sus cuencas hidrográficas. Por otro lado, la respuesta hidrológica de las cuencas montañosas puede también estar controlada por factores biofísicos y características morfométricas. En este contexto, el presente estudio pretende incrementar la información sobre el papel que desempeñan las características del paisaje, en el funcionamiento hidrológico de los ecosistemas andinos. Para alcanzar el objetivo se analiza los efectos de la variabilidad de los parámetros físicos y morfométricos, en el rendimiento hídrico de las microcuencas anidadas de las subcuencas de los ríos Machángara, Tomebamba y Yanuncay. Para las cuencas estudiadas, los parámetros morfométricos que describieron la mayor parte de la variabilidad del rendimiento hídrico fueron: altitud, área, coeficiente de compacidad, pendiente media de la cuenca, tiempo de concentración y densidad de drenaje; en este mismo sentido, los indicadores de rendimiento hídrico más representativos fueron: coeficiente de escorrentía, caudal máximo, evapotranspiración real, percentil 65; mientras que los indicadores de regulación hídrica fueron: porcentaje de caudal base, relación Q_{90}/Q_{10} y pendiente de curva de duración de caudal. La variabilidad observada en la generación de escorrentía también puede explicarse debido a la cobertura vegetal y el uso del suelo.

Palabras claves: Coeficiente de escorrentía, precipitación, morfometría, indicadores hidrológicos, cobertura y uso de suelo.



ABSTRACT

The basins of the tropical Andes comprise a variety of ecosystems, among which are Andean forests and paramo areas. The importance of these Andean ecosystems lies in the provision of environmental services. Particularly, the water supply in the Paute river basin, located in the southeastern foothills of the Ecuadorian Andes, depends on the state of conservation of the ecosystems that form its watersheds. On the other hand, the hydrological response of the mountain basins can also be controlled by physiographic factors such as soil type, vegetation cover and morphometric characteristics. In this context, the present study aims to increase the information on the role played the characteristics of the landscape on the hydrological functioning of Andean ecosystems. To reach the objective, the effects of the variability of the physical parameters and morphometric parameters in the hydric yield of the nested micro-basins of the sub-basins of the Machángara, Tomebamba and Yanuncay rivers. For the basins studied, the morphometric parameters that described most of the variability of water yield were: altitude, area, compactness coefficient, average slope of the basin, concentration time and drainage density; in this sense, the most representative water performance indicators were: runoff coefficient, maximum flow, real evapotranspiration, 65th percentile; while the indicators of water regulation were: the percentages of base flow relationship Q_{90}/Q_{10} , and the slope of the flow duration curve. The variability observed in the generation of runoff can also be explained due to the vegetation cover and the use of the soil.

Key words: Coefficient of runoff, precipitation, morphometry, hydrological indicators, coverage and land use.



TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	2
ABSTRACT.....	3
INTRODUCCIÓN	13
1.1 Antecedentes	13
1.2 Justificación.....	14
1.3 Objetivos	16
2. MARCO TEÓRICO.....	16
2.1 Rendimiento hídrico.....	16
2.2 Comportamiento hidrológico de los ecosistemas andinos	19
3. METODOLOGÍA	23
3.1 DESCRIPCIÓN DE ZONA DE ESTUDIO.....	23
3.2 MATERIALES	26
3.2.1 Información hidrológica.....	26
3.2.2 Información cartográfica	28
3.3 MÉTODOS	28
3.3.1 Parámetros fisiográficos.....	28
3.3.2 Control de calidad de datos	37
3.3.3 Balance hídrico.....	37
3.3.4 Indicadores hidrológicos	40
3.3.5 Separación de flujos con el software R	42
3.3.6 Correlación entre las variables	43
4. RESULTADOS.....	43
4.1 INTERPRETACIÓN FISIAGRÁFICA	43
4.1.1 Cobertura vegetal	44
4.1.2 Suelos	45
4.1.3 Morfometría	46
4.2 ÍNDICES HIDROLÓGICOS	48
4.2.1 Precipitación.....	48
4.2.2 Caudal	55
4.2.3 Balance hídrico.....	57
4.2.4 Curvas de duración de Caudal (FDC)	59



4.2.5 Separación de flujos	61
4.3 CORRELACIONES	63
5. DISCUSIÓN	65
5.1 RENDIMIENTO HÍDRICO	65
5.1.1 Precipitación.....	65
5.1.2 Coeficiente de escorrentía	66
5.1.3 Evapotranspiración.....	68
5.1.4 Caudales altos.....	68
5.2 REGULACIÓN HÍDRICA	69
5.2.1 Caudal Base.....	70
5.2.2 Pendiente de curva de descarga (Pmed FDC) y relación Q90/Q10.....	71
5.2.3 Caudal máximo	72
6. CONCLUSIÓN	73
7. RECOMENDACIONES	75
8. BIBLIOGRAFÍA.....	77
9. ANEXOS.....	82
Anexo 1. Parámetros morfométricos de la subcuenca del río Tomebamba	83
Anexo 2. Parámetros morfométricos de las subcuencas de Yanuncay y Machángara.....	84
Anexo 3. Mapa cobertura y uso de suelo en las microcuencas de estudio.....	85
Anexo 4. Tipo de suelo en las microcuencas de estudio	86
Anexo 5. Curvas hipsométricas y frecuencia de altitudes de las microcuencas de estudio.....	87
Anexo 6. Gráficas de separación de flujo de las microcuencas de estudio	91
Anexo 7. Correlaciones totales.....	94



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de zona de estudio.	24
Figura 2. Régimen de precipitación mensual grupo R1	50
Figura 3. Régimen de precipitación mensual grupo R2	51
Figura 4. Relación del índice de estacionalidad vs altura	54
Figura 5. Relación caudal-precipitación de la microcuenca YA1 (primera microcuenca alta de Yanuncay)	56
Figura 6. Relación caudal-precipitación de la microcuenca TM2 (segunda microcuenca media de Tomebamba).	56
Figura 7. Relación caudal precipitación de la microcuenca TB1 (primera microcuenca baja de Tomebamba),	57
Figura 8. Curvas de duración de caudales de las microcuencas de estudio: (a) Subcuencas Yanuncay, Tomebamba, Machángara; (b) Microcuencas anidadas en Tomebamba; (c) Microcuencas anidadas en Yanuncay.	60
Figura 9. Separación de flujos de TM2 (segunda microcuenca media de Tomebamba).....	63

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Principales características morfométricas de microcuencas de estudio	25
Tabla 2. Identificación de las estaciones empleadas en el estudio.	26
Tabla 3. Dimensiones de las cuencas hidrográficas	30
Tabla 4. Clasificación de las cuencas según el índice de compacidad	31
Tabla 5. Valores para relieve o topografía del terreno	34
Tabla 6. Valores interpretativos de densidad de drenaje.....	35
Tabla 7. Clases de tiempo de concentración	36
Tabla 8. Indicadores hidrológicos para la caracterización hidrológica básica de las microcuencas de estudio.	41
Tabla 9. Porcentaje de cobertura vegetal de microcuencas de estudio.....	44
Tabla 10. Correlación R^2 entre cobertura y altitud.....	45
Tabla 11. Porcentaje de tipo de suelos de microcuencas de estudio	45
Tabla 12. Correlación tipo de suelo y cobertura vegetal	46
Tabla 13. Interpretación Morfométrica	47
Tabla 14. Indicadores de precipitación.....	48
Tabla 15. Régimen de precipitación.....	52
Tabla 16. Indicadores de caudal.....	55
Tabla 17. Balance hídrico diario de las microcuencas de estudio	58
Tabla 18. Indicadores hidrológicos (caudales altos)	61
Tabla 19. Separación de flujos	62
Tabla 20. Correlaciones entre índices hidrológicos y características morfométricas y biofísicas	64



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio
Institucional

Katherine Isabel Peláez Palacios en calidad de autora y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación “Análisis del rendimiento hídrico en cuencas de alta montaña en los Andes Ecuatorianos”, de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, noviembre 2018.

Katherine Isabel Peláez Palacios

C.I: 0105778211



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio
Institucional

Katherine Daniela Belesaca Zhunio, en calidad de autor/a y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación “Análisis del rendimiento hídrico en cuencas de alta montaña en los Andes Ecuatorianos”, de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, noviembre 2018

Katherine Daniela Belesaca Zhunio

C.I: 0106822745



Cláusula de Propiedad intelectual

Katherine Isabel Peláez Palacios, autora del trabajo de titulación “Análisis del rendimiento hídrico en cuencas de alta montaña en los Andes Ecuatorianos”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

Cuenca, noviembre 2018.

Katherine Isabel Peláez Palacios

C.I: 0105778211



Cláusula de Propiedad intelectual

Katherine Daniela Belesaca Zhunio, autor/a del trabajo de titulación "Análisis del rendimiento hídrico en cuencas de alta montaña en los Andes Ecuatorianos", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

Cuenca, noviembre 2018.

Katherine Daniela Belesaca Zhunio

C.I: 0106822745



DEDICATORIA

A Dios quien con su amor, fidelidad y guía es y será pilar fundamental en mi vida.

A mis padres por la paciencia, amor y el apoyo incondicional que me han brindado en todo el trayecto de mi vida académica.

A mi hermana, abuelitas y amigos Sandra, Javier y Darwin por todas experiencias compartidas que han enriquecido mi alma.

Muchas Gracias.

Katherine D. Belesaca Zhunio

A Dios quien me ha dado la fortaleza y sabiduría para alcanzar esta etapa académica.

A mis padres, suegros y hermanas por su apoyo incondicional durante todo el transcurso de mi carrera universitaria.

De manera especial a mi esposo e hija por su amor, apoyo y paciencia; quienes son un pilar fundamental en mi vida y mi motivo de seguir adelante.

Muchas Gracias.

Katherine I. Peláez Palacios.



AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestra gratitud al Ing. Edison Timbe, por dirigir acertadamente y dar soporte académico a la investigación realizada.

Agradecemos también a la Empresa Pública Municipal de Telecomunicaciones, Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Cuenca (ETAPA EP), por brindarnos la información necesaria para realizar el presente estudio y de manera especial al Ing. Mario Guallpa, por el aporte directo de conocimientos y por todo el tiempo y paciencia invertidos durante la realización del mismo.

Katherine Belesaca y Katherine Peláez



INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Los Andes Tropicales constituyen la región biogeográfica de mayor diversidad biológica de la Tierra, a pesar de ocupar apenas el 1% de su superficie. Las cuencas de los Andes tropicales comprenden una variedad de ecosistemas, entre estos se encuentran los bosques andinos, los pastizales alpinos tropicales de los Andes septentrionales, comúnmente conocidos como páramos, y punas (Myers et al., 2000; Tobón, 2009). La importancia de estos ecosistemas andinos radica en la provisión de servicios ambientales de sus cuencas hidrológicas tales como: la conservación de la biodiversidad, secuestro de carbono, regulación del ciclo hidrológico, provisión de agua de calidad para las poblaciones río abajo, refugio a la fauna silvestre, así como resiliencia frente a la variabilidad de la precipitación, desempeñando un rol importante en la mitigación y adaptación al cambio climático (Céleri and Feyen, 2009; Crespo et al., 2014; Mosquera et al., 2015; Ochoa et al., 2016).

El páramo es el proveedor más importante de agua dulce para las ciudades del norte de los Andes, por ejemplo: Bogotá, Cali, Cuenca, Quito, por lo que dependen del rendimiento hídrico de los páramos para usos domésticos, agricultura, energía hidroeléctrica y muchos otros propósitos. Por ejemplo, aproximadamente el 90% del recurso hídrico que ocupan las ciudades de Quito y Bogotá provienen de este ecosistema (Buytaert et al., 2006a; Crespo et al., 2014). Por otro lado, el alto acrecentamiento de zonas pobladas influye directamente en el incremento de demanda de agua. Solo en Ecuador más de tres millones de personas se benefician directamente del agua proveniente del páramo (Buytaert et al., 2006b).

Las actividades del hombre sobre ecosistemas andinos afectan directa o indirectamente a los servicios y sus funciones, especialmente a los servicios hidrológicos ambientales (Llambí et al., 2012). En nuestro país, acciones antrópicas tales como la deforestación, forestación, avance de la frontera agrícola, quema, pastoreo en áreas inadecuadas o sobrepastoreo, construcción desordenada de infraestructura vial, entre otras, afectan a varios componentes



del ciclo hidrológico, incluyendo la evapotranspiración, infiltración y escorrentía superficial (Molina et al., 2012). Estas acciones antrópicas tomaron mayor fuerza a partir de la época colonial con la expulsión de los aborígenes hacia la zona altas y que, contemporáneamente, ha tomado mayor impulso después de la reforma agraria a partir de los años sesenta (Quichimbo et al., 2012). Desde entonces surgieron las iniciativas de conservación y preservación de estos ecosistemas, un ejemplo de ello es la conformación de empresas públicas para el manejo ambiental.

En el año de 1968 se constituyó la Empresa Municipal de Teléfonos, Agua Potable y Alcantarillado (ETAPA EP), la cual, a través de la Sub Gerencia de Gestión Ambiental, ha desplegado sus esfuerzos a fin de proporcionar a tiempo, y en forma continua, la información hidrometeorológica de las cuencas hidrográficas que aportan agua para la ciudad de Cuenca. En este contexto, el presente estudio analiza datos hidrometeorológicos proporcionados por ETAPA EP, con el propósito de cuantificar el rendimiento hídrico de varias microcuencas anidadas a la cuenca alta del río Paute.

1.2 Justificación

La cuenca del río Paute, ubicada al Sur de los Andes Ecuatorianos, está constituida principalmente por los ecosistemas de páramo y bosque montano alto (Guallpa, 2015; Celleri et al., 2007). Las zonas de páramo son las principales proveedoras de agua (Buytaert et al., 2006b) mientras que los bosques son considerados como reguladores hídricos, debido a que actúan como una esponja que retiene agua durante los periodos lluviosos y la libera en época de sequía (Bruijnzeel, 2004). La importancia de los dos ecosistemas radica en mantener flujos de aguas superficiales durante todo el año (Molina et al., 2007), beneficiando directamente a los usuarios del agua río abajo o para su uso en proyectos hidroeléctricos o de riego (Wouter Buytaert et al., 2007).

La cantidad y calidad del recurso hídrico depende del cuidado de la cuenca hídrica, esto involucra a las actividades humanas que en ella se realizan (Barrera et al., 2010). Según



Vanacker et al. (2003), el cambio de cobertura y uso de tierra son consideradas como las principales actividades antrópicas que afectan a los diversos componentes del ciclo hidrológico. También, Ochoa et al. (2016) mencionan que para determinar la variabilidad de los componentes del ciclo hidrológico se debe considerar la magnitud de los impactos del uso de la tierra, junto con la vegetación original y de reemplazo. En este sentido, el estado hidrológico de los ríos depende del estado de degradación o pérdida de los ecosistemas que forman sus cuencas hidrográficas. Por ejemplo, la pérdida de la capacidad de regulación de la cuenca limita la posibilidad de controlar eventos máximos de precipitaciones y, consecuentemente, de posibles inundaciones; esto demuestra la importancia de proteger y conservar los ecosistemas Andinos. Por otro lado, la respuesta hidrológica de las cuencas montañosas puede también estar controlada por parámetros fisiográficos tales como el tipo y uso de suelo, cobertura vegetal, características morfométricas (Jiménez, 2005; Madrey, 1970; Molina et al., 2007; Nahar et al., 2004) y/o el clima (Tomer and Schilling, 2009).

Por lo expuesto, se han motivado iniciativas de implementación de esquemas para protección y conservación de cuencas altoandinas, por ejemplo, ETAPA EP, en la ciudad de Cuenca, gestiona íntegramente el recurso hídrico mediante el establecimiento programas de manejo y conservación de áreas protegidas privadas municipales, y la compra y gestión de tierras, o el pago por servicios ambientales, en las microcuencas de los ríos Tomebamba, Machángara, Yanuncay y Tarqui. Para que cada uno de estos programas de manejo tenga buenos resultados y sea sustentable, es necesario que estén fundamentados en un profundo entendimiento y conocimiento científico de los principales procesos hidrológicos de las zonas y ecosistemas a los que están dirigidos. En este sentido, Crespo et al. (2014) y Martínez et al. (2017) destacan que a pesar de la importancia, tanto socioeconómica como ambiental, las cuencas hidrográficas Andinas han sido poco estudiadas.

En este contexto, el presente estudio pretende incrementar la información sobre el papel que desempeñan los impactos de las actividades humanas (e.g. Vanacker et al., 2003) y las características del paisaje, en el funcionamiento hidrológico de los ecosistemas andinos (Molina et al., 2012; Mosquera et al., 2015). Para alcanzar el objetivo se analizó los efectos



de la variabilidad de los parámetros físicos (tipo, uso y cobertura vegetal de los suelos) y morfométricos (forma, altitud, red de drenaje) en el rendimiento hídrico de las microcuencas anidadas de las subcuencas de los ríos Machángara, Tomebamba y Yanuncay.

Los resultados obtenidos en este estudio servirán de guía para la toma de decisiones en la gestión de los recursos hídricos de la cuenca alta del río Paute, en la protección y conservación de los bosques andinos y páramos, contribuyendo a la mejora tanto de la calidad del medio ambiente como de la calidad y cantidad de los cuerpos hídricos.

1.3 Objetivos

Objetivo general

- Determinar el rendimiento hidrológico y su relación con parámetros biofísicos y morfométricos en las microcuencas altas del río Paute.

Objetivos específicos

- Estimar el rendimiento hídrico de las microcuencas a través de un balance hidrológico.
- Estimar indicadores hidrológicos de rendimiento y regulación hídrica de las microcuencas.
- Contrastar el rendimiento hidrológico de las microcuencas con sus parámetros morfométricos (forma, red de drenaje, altitud) y biofísicos (tipo de suelo, uso y/o cobertura de los suelos).

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Rendimiento hídrico

Las áreas montañosas juegan un papel importante al proveer agua líquida a las poblaciones aledañas y principalmente a las que habitan aguas abajo. De manera análoga, los territorios llanos y sedimentarios devuelven casi la totalidad de la precipitación que reciben a la



atmósfera por transpiración o evaporación directa (Jobbágy et al., 2008). Es decir, los sectores montañosos con altas pendientes, o rocosos, como el ecosistema de páramo, suelen impedir este consumo evaporativo total, favoreciendo la alimentación de cursos de agua, tanto por escurrimiento como por drenaje profundo (Jobbágy et al., 2011). Particularmente, en este estudio nos referiremos al aporte superficial, también denominado como rendimiento hídrico, el cual se define como la fracción de la precipitación que abandona las cuencas montañosas en forma líquida, expresado como la cantidad de agua por unidad de superficie, en un intervalo de tiempo dado ($l/s/km^2$), o como escorrentía por unidad de área (coeficiente de escorrentía específico); mientras más alto el valor del coeficiente de escorrentía, mayor rendimiento posee una cuenca (su valor máximo es 1). La variación del coeficiente de escorrentía implica aumento o disminución de los procesos de precipitación, caudal y evapotranspiración (Célleri et al., 2004). Esta variación depende del clima, de la configuración topográfica y geológica de las cuencas y, particularmente, de las condiciones fisiográficas (Viramontes et al., 2007) tales como pendiente, área, cobertura vegetal o tipo de suelo (Guzmán & León, 2012; Jackson et al., 2009; Martínez de Azagra, 2006).

La estimación de la oferta hídrica superficial de una cuenca hidrográfica, para un determinado periodo de tiempo, se calcula por medio de un balance hidrológico (Célleri et al., 2013; Llambí et al., 2012), también conocido como balance hídrico. El concepto de balance hídrico se deriva del principio físico de continuidad o conservación de la masa en el que el agua no desaparece ni se produce, sino que fluye y cambia de estado debido a los procesos hidrológicos. Por lo tanto, su cálculo es a través del balance de entradas y salidas de agua dentro de una cuenca hidrográfica. Además, el balance hídrico genera información útil para el manejo de los recursos naturales donde, por medio de indicadores hidrológicos, permite conocer y comparar la producción de agua (Coello et al., 2008).

Los estudios de balance hídrico pueden estimarse para cualquier tamaño de cuenca de estudio. Por ejemplo, la zona de estudio se puede dividir en microcuencas, siendo estas unidades las más adecuadas para la planificación de acciones para su manejo debido a que se mide y analizan directamente los resultados, estableciendo un vínculo directo con la toma de



decisiones sobre el uso del territorio frente al impacto de diferentes coberturas y usos del suelo en el rendimiento hídrico (Verdugo, 2017).

En el balance hidrológico, la precipitación es comúnmente la entrada principal de agua hacia las cuencas. La precipitación en estado sólido o líquido cae de la atmósfera a la superficie terrestre en forma de lluvia, llovizna, granizo y nieve, para su formación se requiere la elevación de una masa de agua en la atmósfera, de tal manera que se enfríe y parte de su humedad se condense. Los mecanismos para la elevación de masas de aire definen el tipo de precipitación, principalmente: frontal, orográfica y convectiva (Chow et al., 1994). La precipitación se caracteriza por su alta variabilidad espaciotemporal (Chen et al., 2014), información acerca de esta variabilidad es requerida para la mayoría de aplicaciones meteorológicas, hidrológicas y ecológicas (Céleri et al., 2007), tales como modelos numéricos de clima y de lluvia-escorrentía (Chen et al., 2014).

Las salidas del balance hidrológico constituyen la evapotranspiración y la escorrentía. La evapotranspiración es la combinación de dos procesos separados en donde se pierde agua, por un lado, de la superficie del suelo y, por otro, por la evaporación y la transpiración del cultivo. El proceso de evaporación convierte agua líquida en vapor de agua, mientras que la transpiración es el fenómeno biológico por el que las plantas toman agua del suelo a través de sus raíces, una pequeña parte es para su nutrición y el resto lo transpiran. Resulta difícil medir estos dos procesos por separado y, en la mayor parte de los casos, lo que interesa es la cantidad total de agua que se pierde a la atmósfera, por esto, estos dos factores generalmente se calculan conjuntamente bajo el concepto mixto de evapotranspiración. Existen tres tipos de evapotranspiración: potencial, real y de referencia. La evapotranspiración Real (ETR) considera el agua disponible en el suelo y las condiciones ambientales en las cuales se desarrolla un determinado cultivo, ya que en la práctica los cultivos se desarrollan en condiciones de humedad muy lejanas de las óptimas. Análogamente, para un caso más teórico de condiciones óptimas, se desarrolla el concepto de evapotranspiración de Referencia (ET_o), es un parámetro relacionado con el clima que expresa el poder evaporante de la atmósfera,



independientemente del tipo de desarrollo de cultivo y de las prácticas de manejo (Allen et al., 2006).

El escurrimiento es la parte de la precipitación que aparece en las corrientes fluviales superficiales, perennes, intermitentes o efímeras y que regresa al mar o a los cuerpos de agua interiores. De acuerdo con Chow (1964) el escurrimiento se puede dividir en: escurrimiento superficial o escorrentía, que es la parte del agua que escurre sobre el suelo y, después, por los cauces de los ríos, suele referirse al volumen de las precipitaciones que caen sobre una cuenca menos la retención superficial y la infiltración. El escurrimiento subsuperficial es la parte del agua que se desliza a través de los horizontes superiores del suelo hacia las corrientes. Por otro lado, el escurrimiento subterráneo es aquél que, debido a una profunda percolación del agua infiltrada en el suelo, se lleva a cabo en los mantos subterráneos y descarga a las corrientes fluviales.

2.2 Comportamiento hidrológico de los ecosistemas andinos

Las cuencas de los Andes tropicales comprenden una variedad de ecosistemas, entre estos se encuentran los bosques andinos, los páramos, y las punas (Tobón, 2009). Los bosques presentan formaciones vegetales únicas en el mundo, tanto por su composición florística como por las particularidades evolutivas que han desembocado en altos niveles de endemismo y diversidad biológica. La precipitación que regularmente reciben los bosques andinos son entradas de agua por la intercepción de la niebla que pasa entre el dosel y las ramas y de la lluvia transportada por el viento (Tobón, 2009). La precipitación de bosque es capturada por una capa gruesa de musgo en el suelo y la libera lentamente durante los períodos sin lluvia, además, la presencia de bosque en una cuenca hidrográfica disminuye la escorrentía como consecuencia de las demandas de agua por las plantas y su intercepción de la lluvia (Cantú, 2005). En este sentido, al comparar el consumo total de agua de los bosques con el de la vegetación corta, como los matorrales y las praderas, el consumo de los bosques es mayor debido a que los bosques generalmente tienen un mayor índice de área foliar y



rugosidad, además de un sistema de raíces más profundo y mejor desarrollado, lo que resulta en una mayor evapotranspiración (Farley et al., 2005).

Otro ecosistema importante es el páramo conformado por humedales alpino neotropicales, siendo Ecuador el que abarca la mayor área de páramo, seguido por Colombia, Venezuela y Perú (Cuesta and Becerra, 2009). En Ecuador el páramo se localiza en la región alto andina entre el límite superior del bosque (aproximadamente 3,500 m de altitud) y las nieves perpetuas (aproximadamente 5,000 m), conformado por planicies y valles accidentados de origen glacial, con una gran variedad de lagunas, pantanos y praderas húmedas. Su precipitación oscila entre 600 a 4,000 mm año⁻¹ (Tobón, 2009) y se caracteriza por eventos frecuentes y de bajo volumen (llovizna) (Buytaert et al., 2006b). La escorrentía superficial en el páramo es poco común, produciéndose solamente cuando el suelo está completamente saturado. En este sentido, los suelos de páramo generalmente están constituidos por Andosoles e Histosoles, los cuales poseen una capacidad alta de retención de agua, y, en menor grado, por Inceptisoles, Entisoles, Mollisoles. La alta capacidad de retención de agua de los suelos de páramo, reducen los riesgos de inundación en las zonas río abajo y, durante los períodos secos, mantiene un flujo base sostenido durante todo el año (Iñiguez et al., 2016).

Las cuencas andinas, a pesar de compartir muchas de las características principales de las cadenas montañosas, varían con la latitud y están sujetas a varias influencias climáticas, tanto por el Océano Pacífico, como por la cuenca del Amazonas (Padrón et al., 2015). Esta gran variabilidad que se presenta en las propiedades biofísicas, dificulta la generalización de los resultados de un sitio de investigación hacia otras zonas, desafiando también las predicciones hidrológicas regionales (Célleri et al., 2007; Ochoa et al., 2016), es así que la variabilidad tiene efecto sobre las precipitaciones (Célleri et al., 2007). Por ejemplo Buytaert et al. (2006b) estudiaron la variabilidad de la precipitación en la zona montañosa occidental de los Andes al sur del Ecuador en la cuenca del río Paute, donde sus páramos cubren una área de 35,000 km², con un rango amplio altitudinal de más de 1,500 msnm y con precipitaciones anuales que pueden variar desde 800 hasta sobre los 3,000 mm. Dicho estudio concluye que a pequeña escala la precipitación está influenciada por el viento y a su vez este está



determinado por las fuertes pendientes y accidentada topografía. En cambio, a una mayor escala espacial, la precipitación en el páramo está influenciada por efectos altitudinales y latitudinales.

De la combinación de diferentes características fisiográficas, gradientes altitudinales y condiciones climáticas especiales de los Andes, resultan cuencas hidrográficas con una multitud de zonas ecológicas que brindan características únicas en su hidrología superficial, influenciadas altamente por su cobertura vegetal (Buytaert et al., 2006b; Célleri et al., 2007). En este sentido Farley et al. (2005) evidencian que el rendimiento hídrico varía de acuerdo al tipo de vegetación y su estado de madurez, esto ha propiciado varios análisis del efecto del cambio de cobertura y uso de suelo. Por ejemplo Buytaert et al. (2007) compararon la dinámica de lluvia-escorrentía de las cuencas de páramo con las de las cuencas alteradas por cultivo o forestación, concluyendo que para las cuencas de páramo la escorrentía total representaba entre el 53% y 73% de la precipitación, mientras que para las cuencas forestadas representó solo el 19%, y, para las cuencas cultivadas, fue similar a la de las cuencas de páramo, exceptuando que los caudales bajos (flujo base) fueron dramáticamente menores. De la misma manera en Farley et al. (2005) compararon el rendimiento hídrico entre una cuenca cultivada y una natural, encontrando que sus rendimientos hídricos son muy similares, pero el análisis de las curvas de duración del flujo sugiere una respuesta más rápida y una mayor pérdida de flujo base en la cuenca cultivada, esto es, una pérdida de la capacidad de regulación hídrica de la misma. También, Llambí et al. (2012) encontraron que las microcuencas de páramo presentan un mayor rendimiento hídrico (60-70%) que las cuencas ubicadas en zonas bajas, esto se debe a la baja evapotranspiración por las características particulares que posee la vegetación de páramo, ocasionando un gran excedente de agua que alimenta los ríos que descienden hacia las regiones costeras y a la cuenca Amazónica (Buytaert et al., 2010). En el mismo sentido, Juen et al. (2007), en sus cuencas de estudio, encontraron que la evapotranspiración sobre la cuenca cultivada fue aproximadamente de entre 20 y 40% menor en comparación de la cuenca de pino.



El efecto de la cobertura vegetal sobre la oferta hídrica también se debe a que la cobertura vegetal brinda un soporte adecuado a eventos extremos y regulación en épocas de verano (Coello et al., 2008) ya que actúa protegiendo el suelo contra el impacto de las gotas de lluvia, reduce su capacidad erosiva, mejora la agregación del suelo al incorporar materia orgánica al suelo y reduce la velocidad de flujo terrestre aumentando la infiltración. Este efecto de la cobertura fue analizado en el estudio de Molina et al. (2007) que tuvo como propósito estudiar el impacto humano en los procesos de generación de escorrentía de la cuenca hidrográfica de Jadán, en el Sur de los Andes ecuatorianos, concluyendo que la ausencia de una cubierta de vegetación protectora hace que la respuesta de escorrentía sea rápida y los coeficientes de escorrentía altos. Particularmente, tierras con cubierta vegetal de cultivo, o con pastizales, se caracterizan por bajos coeficientes de escorrentía (generalmente de alrededor de 4% de la precipitación) y escurrimiento lento debido a que su suelo posee gran capacidad de infiltración. Mientras que las tierras degradadas y abandonadas muestran una gran variación, para el mencionado estudio, fue de 48% de la precipitación, en pocos minutos después de inicio del evento de lluvia.

El rendimiento hídrico de los páramos sur-ecuatorianos, a más de la afección del cultivo y la forestación con especies exóticas, tiene la influencia de sus características fisiográficas. En cuanto a la influencia del tipo de suelo en la oferta hídrica, Mosquera et al. (2015) realizaron un estudio en la cuenca de páramo de Zhurucay, ubicada al sur del Ecuador, y analizaron la influencia del tipo de suelo en el rendimiento hídrico. El mencionado estudio encontró que el rendimiento hídrico es más alto en las microcuencas que tienen un menor porcentaje de suelos Andosoles y mayor cobertura de humedales, entonces, la generación de escorrentía, relativamente más alta en zonas de humedales, se evidencia por la saturación continua de estos suelos. Por otro lado la influencia de las características fisiográficas, esencialmente la topografía, afecta esta capacidad de amortiguación de los suelos, debido a que un paisaje irregular contiene muchas concavidades y depresiones locales donde se desarrollan zonas de estancamiento de agua y lagos pequeños (Perrin et al., 2001). Así mismo, el estudio de Mosquera et al. (2015) analizó la topografía, encontrando que microcuencas con porcentajes más altos de pendientes pronunciadas generan mayores flujos bajos.

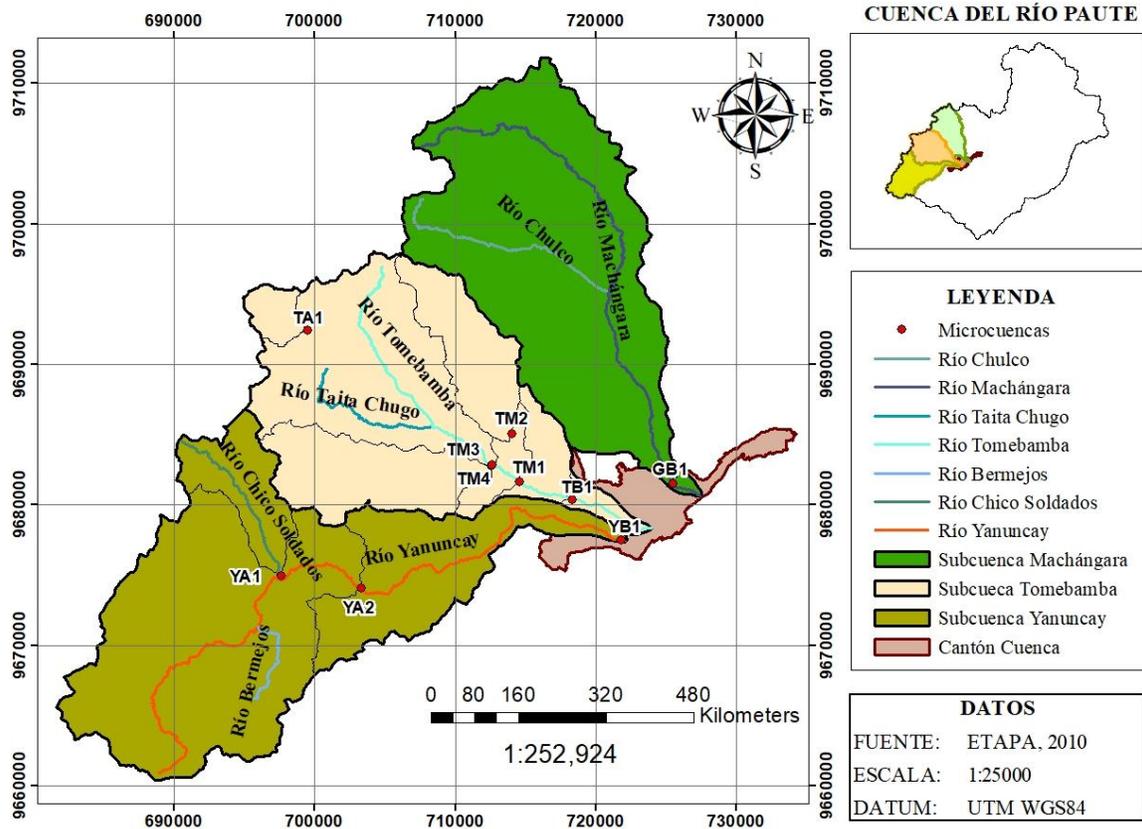


3. METODOLOGÍA

3.1 DESCRIPCIÓN DE ZONA DE ESTUDIO

La cuenca del río Paute está ubicada al Sur de los Andes Ecuatorianos, su superficie es de 5,069 km² y se encuentra formada por 19 subcuencas con áreas que varían entre 50 a 950 km² (Domínguez, 2013). Las microcuencas del estudio pertenecen a las subcuencas altas de Machángara, Tomebamba y Yanuncay (Figura 1), cuyas superficies son de 324.95, 331.25 y 416.27 km², respectivamente, con elevaciones desde 2,540 a 4,420 msnm y están constituidas principalmente por páramo (3,500 – 4,420 msnm) y bosque montano (2,800 – 3,500 msnm) (Guallpa, 2015). Posee un clima frío semi-húmedo, influenciado por el régimen de la Costa del Pacífico al Oeste y por las masas de aire provenientes del Atlántico al Este (Vuille et al., 2000). De acuerdo a INAMHI la precipitación media anual está entre 900 a 1,600 mm, calculada en base a un período de datos comprendido entre 1964-2008, con un 10% de las lluvias con una intensidad mayor a 10 mm h⁻¹ (Buytaert et al., 2006b). Existe una temperatura media mensual 6°C y una humedad relativa promedio mensual de 90% (Iñiguez et al., 2008). La radiación solar y la temperatura a lo largo del año son relativamente constantes, mientras que las variaciones diarias son bien marcadas y extremas.

MAPA DE UBICACIÓN DE ZONA DE ESTUDIO



YB1=subcuenca Yanuncay, TB1 = subcuenca Tomebamba, GB1= subcuenca Machángara, YA1= primera microcuenca alta de Yanuncay, YA2 = segunda microcuenca alta de Yanuncay, TA1= primera microcuenca alta de Tomebamba, TM1= primera microcuenca media de Tomebamba, TM2 = segunda microcuenca media de Tomebamba, TM3 = tercera microcuenca media de Tomebamba, TM4 = cuarta microcuenca media de Tomebamba.

Figura 1. Ubicación de zona de estudio.

En la figura 1 se diferencian a las 3 subcuencas principales: Yanuncay (YB1), Tomebamba (TB1) y Machángara (GB1) y 7 microcuencas anidadas. YB1 anida YA1 y YA2, mientras que TB1 anida a TM1-TM4. En conjunto a las subcuencas y microcuencas anidadas en ellas, serán consideradas como 10 microcuencas de estudio, con tamaños que varían desde 13 km² (TA1 ubicada en la parte noroeste de la subcuenca Tomebamba) a 414 km² (toda la subcuenca de Yanuncay). La Tabla 1 resume las principales características morfométricas de cada una de las microcuencas de estudio.



Tabla 1. Principales características morfométricas de microcuencas de estudio

Microcuencas	Cmin (msnm)	Cmax (msnm)	S (km ²)	Pm (km)	Pmed (%)	Dd (km ² /km)	Tc (h)
TA1	3800	4420	13.2	16.37	19.5	1.83	1.41
YA1	3240	4340	45.76	40.68	22.07	1.16	1.14
TM2	2935	4340	53.67	40.67	22.82	1.23	1.66
TM3	2760	4180	73.05	49.72	19.37	1.2	0.98
TM4	2760	4420	230.36	78.18	21.67	1.22	1.85
TM1	2700	4420	299.61	80.86	21.78	1.23	0.34
YA2	3000	4340	308.73	98.38	13.75	1.25	0.78
TB1	2600	4420	321.22	86.47	21.09	1.26	2.97
GB1	2476	4420	322.18	96.83	20.24	1.31	2.02
YB1	2540	4340	414.82	135.3	15.3	1.3	2.02

YB1=subcuena Yanuncay, TB1 = subcuena Tomebamba, GB1= subcuena Machángara, YA1= primera microcuena alta de Yanuncay, YA2 = segunda microcuena alta de Yanuncay, TA1= primera microcuena alta de Tomebamba, TM1= primera microcuena media de Tomebamba, TM2 = segunda microcuena media de Tomebamba, TM3 = tercera microcuena media de Tomebamba, TM4 = cuarta microcuena media de Tomebamba. Cmin=cota mínima; Cmax=cota máxima; S=área; Pm=perímetro; Pmed=pendiente media de la cuenca; Dd=densidad de drenaje, Tc=tiempo de concentración.

Las microcuencas de estudio están constituidas principalmente por páramo y bosque montano alto andino y, en menor porcentaje, por pasto, cultivos, lagunas, parches de polylepis, bosque de pino, bosque de eucalipto, asentamientos humanos e infraestructura. El detalle del porcentaje de las coberturas de cada microcuena se presenta en la Tabla 9 y el mapa de cobertura vegetal en el Anexo 3.

Los principales tipos de suelos del área de estudio son los Andisoles y en asociación a estos en pequeñas cantidades, están presentes los Inceptisoles, Entisoles, Mollisoles y Vertisoles. Los suelos de esta zona pertenecen a la cordillera occidental y están desarrollados sobre sedimentos del Cretáceo y del Mioceno temprano, sobre los cuales se han acumulado cenizas volcánicas provenientes de los volcanes Sangay y Tungurahua, y por la distancia a ellos estos son menos profundos que los del Norte del país y altamente meteorizados (Buytaert et al., 2006a, 2005; W. Buytaert et al., 2007). El clima húmedo-frío, la baja presión atmosférica y la geomorfología de la zona accidentada con valles profundos y empinados hasta llanuras casi planas son responsables para la formación de estos suelos con características particulares como son alto contenido de materia orgánica, baja densidad aparente, elevada capacidad de retención de agua, pH bajo y disponibilidad baja de fósforo (Buytaert, 2004; FAO, 2001;



Poulenard, 2000). El detalle del porcentaje de los tipos de suelo por microcuenca se presenta en la Tabla 11 y el mapa elaborado de tipos de suelos en el Anexo 4.

3.2 MATERIALES

3.2.1 Información hidrológica

ETAPA EP puso a disposición del presente análisis, una base de datos hidrometeorológicos de 47 estaciones. De estas, 13 fueron descartadas por el alto porcentaje de vacíos presentes en sus registros. De las 34 estaciones disponibles son 15 meteorológicas, 9 pluviométricas, 7 limnimétricas, 3 limnimétricas y pluviométricas (Tabla 2). El periodo de monitoreo de las 34 estaciones varía, 6 de ellas tienen un registro histórico desde el 1997 y 28 fueron implementadas en el 2014. El período común de datos entre las estaciones seleccionadas es del 2015 al 2017, período que fue seleccionado para el presente estudio. La resolución temporal de la base de datos proporcionada fue de 5 minutos, la cual fue agregada a un nivel diario, resolución temporal común para estudios hidrológicos de balance y rendimiento hídrico. La agregación de los datos se hizo mediante un Script-Agregación-Promedio, elaborado por Ochoa & Buytaert (2014). Posteriormente a la agregación se obtuvo el porcentaje de datos diarios faltantes (Tabla 2).

Tabla 2. Identificación de las estaciones empleadas en el estudio.

Tipo	Sitio	X	Y	Z	Periodo datos		% Vacíos diarios
Hidrológica	LLAN	725487	9681506	2476	1/1/2015	31/12/2017	2.55
Hidrológica	AJM	712593	9682804	2780	1/1/2015	31/12/2017	4.20
Hidrológica	DJM	712659	9682808	2775	1/1/2015	31/12/2017	9.22
Hidrológica	CUL	714066	9685043	2938	1/1/2015	31/12/2017	13.50
Hidrológica	BAL	718313	9680375	2599	1/1/2015	31/12/2017	0.00
Hidrológica	SOLJ	697615	9674943	3143	1/1/2015	31/12/2017	20.53
Hidrológica	AJT	721828	9677485	2520	1/1/2015	31/12/2017	2.55
Limni+Pluvio	PAT	699536	9692436	3795	1/1/2015	31/12/2017	14.78
Limni+Pluvio	MAT	714618	9681633	2693	1/1/2015	31/12/2017	1.00
Limni+Pluvio	PUC	703349	9674079	3000	14/1/2016	31/12/2017	1.67
Pluviógrafo	CHANE	718613	9703587	3485	1/1/2015	10/3/2017	0.00
Pluviógrafo	RIC	726027	9684215	2600	1/1/2015	31/12/2017	0.46



Pluviógrafo	CHI	705700	9688898	3310	1/1/2015	6/4/2017	0.00
Pluviógrafo	SOLE	695451	9674348	3538	1/1/2015	3/1/2017	0.00
Pluviógrafo	HUI	714747	9678318	2773	1/1/2015	31/12/2017	8.76
Pluviógrafo	POR	712681	9653063	3174	1/1/2015	18/10/2016	0.00
Pluviógrafo	VAL	726538	9674218	2683	1/1/2015	31/12/2017	9.67
Pluviógrafo	NAR	716123	9675876	2728	1/1/2015	31/12/2017	5.20
Pluviógrafo	CHAU	732240	9682775	2521	1/1/2015	31/12/2017	13.13
Meteorológica	CHUL	720482	9701699	3213	1/1/2015	18/10/2016	0.00
Meteorológica	CHANT	715089	9706315	3851	1/1/2016	31/12/2017	4.64
Meteorológica	LAB	714224	9698186	3434	20/3/2015	15/5/2017	2.92
Meteorológica	CHUL	720890	9695100	2979	1/1/2015	4/5/2017	0.00
Meteorológica	TIX	723026	9686691	2708	1/1/2015	31/12/2017	0.00
Meteorológica	MAM	699520	9687482	3592	1/1/2015	31/12/2017	12.04
Meteorológica	LLA	705563	9685489	3154	1/1/2016	3/6/2017	8.83
Meteorológica	SAY	714719	9683783	2847	1/1/2015	31/12/2017	1.64
Meteorológica	CEB	720230	9680898	2652	1/1/2015	31/12/2017	0.00
Meteorológica	UCU	728722	9681876	2425	1/1/2015	31/12/2017	0.64
Meteorológica	CAN	688622	9671795	3700	1/1/2015	17/1/2017	0.00
Meteorológica	VEN	692346	9681395	3592	1/1/2015	31/12/2017	3.01
Meteorológica	IZH	693422	9677234	3748	1/1/2015	6/12/2017	0.00
Meteorológica	SOLP	696891	9674608	3269	1/1/2015	1/1/2015	19.95
Meteorológica	PUCA	703349	9674079	3000	14/1/2016	31/12/2017	1.39

LLAN=Llantera, AJM=Río Mazán A.J., DJM=D.J. Mazán, CUL=Culebrillas, BAL= Quinta Balzay, SOLJ=Soldados A.J. Yanuncay, AJT=Yanuncay A.J. Tarqui, PAT=Patoquinoas, MAT=Matadero en Sayausí, PUC=Yanuncay en Pucán, CHANE=Chanlud Empresa Eléctrica, RIC=Ricaurte, CHI=Piscícola en Chirimachay, SOLE=Soldados ETAPA (Cancán), HUI=Huizhil, POR=Portete, VAL=El Valle, NAR=Narancay, CHAU=Challuabamba, CHUL=Machángara DJ Chulco, CHANT=Chanlud ETAPA, LAB=El Labrado, CHUL=Saucay (MachangaraDjChulco), TIX=Tixán en PTAP, MAM=Mamamag Camping, LLA=Llaviucu Estación Científica, SAY= Sayausí en PTAP, CEB=Cebollar en PTAP, UCU=Ucubamba PTAR, CAN=Cancán Refugio, VEN=Ventanas, IZH=Izhcayrumi cabecera, SOLP=Soldados en PTAR, PUCA=Yanuncay en Pucán.

Los pluviógrafos utilizados son de cubeta basculante con una resolución de pulso de 0.2 mm. Por otro lado, los niveles de los ríos se miden mediante sensores ultrasónicos, transductores de presión y, a través de campañas de aforos de caudales, se construye una curva de descarga nivel-caudal, para transformar los niveles de agua a caudales. Las estaciones meteorológicas se usan para registrar la velocidad y dirección del viento (anemómetro), radiación solar (piranómetro), y sensores para determinar temperatura, humedad relativa y presión barométrica, con los que se estima la evapotranspiración de referencia (Guallpa, 2014).



3.2.2 Información cartográfica

La información cartográfica base fue provista mediante archivos tipo *shape file (*.shp)* de topografía y de la configuración de los ríos de las 3 subcuencas de la cuenca alta de río Paute. Esta información fue provista por el departamento de GIS de ETAPA EP a escala 1:25,000. La cobertura y uso de suelo fue provista por el mismo departamento, pero a escala de 1:5,000 con la digitalización de ortofotos del 2010. El tipo de suelo se obtuvo del portal SIGTIERRAS a escala 1:25,000 con información base del 2015. La información cartográfica recolectada fue procesada para la caracterización de parámetros fisiográficos de las microcuencas en el software ArcGIS 10.5 en el sistema de coordenadas planas UTM WGS 1984 zona 17 S.

3.3 MÉTODOS

Para el objetivo de determinar el rendimiento hídrico de las microcuencas se inició con la recopilación y validación los datos meteorológicos, pluviométricos y limnimétricos del periodo 2015-2017. Con estos valores promedios diarios se determinó el balance hídrico existente y se comparó la diversidad de comportamiento hídrico mediante el cálculo de indicadores hidrológicos. Además, con el propósito de determinar la relación que existe entre el rendimiento hídrico y las características fisiográficas propias del terreno, se procesó información cartográfica, mediante el programa computacional ArcGis 10.5, 2017. Por último, se determinó la correlación entre estos parámetros analizados.

3.3.1 Parámetros fisiográficos

Los parámetros fisiográficos se subdividen en morfométricos y físicos. Los parámetros morfométricos de una cuenca hidrográfica proporcionan una descripción física espacial a través de parámetros de forma, relieve y red de drenaje (Gaspari et al., 2012). Su estudio ayuda a determinar el movimiento y posibilidad de aprovechamiento hídrico debido a que condicionan la velocidad y el tiempo de recorrido del flujo natural del agua hacia la salida de



la cuenca. Por otro lado, los factores físicos se refieren a la estructura del terreno tales como: uso y cobertura del suelo, tipo de suelo y topografía (Maderey, 2005).

La caracterización morfométrica parte de la delimitación del aporte de agua hacia una estación hidrológica (delimitación de microcuencas). La delimitación de microcuencas fue hecha a partir de una Red de Triangulación Irregular (TIN), el cual a su vez fue producto del Modelo Digital de Terreno (MDT) de 25 m de resolución. El TIN trabaja con la topografía de la microcuenca simulando la dirección de la corriente superficial a través de la herramienta Arctoolbox – Spatial Analyst Tools – Hidrology, del software ArcGIS 10.5. Para más detalle ver en Delgado & Samaniego (2016) y Geraldi et al. (2010).

Para el análisis comparativo de parámetros físicos entre las microcuencas de estudio, se determinaron las clases de uso y de cobertura vegetal y de tipo de suelo para cada una de ellas, mediante el análisis de información cartográfica con software ArcGIS 10.5. Para mejor interpretación de los mismos, se elaboraron mapas temáticos de cobertura y tipo de suelo de cada microcuenca (Anexos 4 y 5).

Los parámetros morfométricos de superficie, forma, altitud y de red de drenaje de las microcuencas se calcularon con el software ArcGIS mediante sus herramientas hidromorfométricas y mediante cálculos matemáticos en Excel (Guallpa, 2015). En la siguiente sección se definen los parámetros morfométricos caracterizados.

a) **Superficie:** En términos de escorrentía, las cuencas pequeñas son más sensibles al uso del suelo y a las precipitaciones de gran intensidad porque abarcan zonas de poca extensión.

Área (S): Proyección horizontal de toda la superficie de drenaje de un sistema de escorrentía directa o indirecta a un mismo cauce natural, delimitada por la divisoria de aguas. Las cuencas, por su tamaño, pueden clasificarse en cuencas grandes, intermedias y cuencas pequeñas. Haciendo referencia a Chow et al. (1996) una cuenca pequeña puede ser definida como aquella que es sensible a lluvias de alta intensidad, de corta duración y en la cual



predominan las características físicas del suelo con respecto al cauce. Por esta definición, el tamaño de nuestras cuencas se define en función de la Tabla 3.

Tabla 3. Dimensiones de las cuencas hidrográficas

Tamaño de la cuenca (km ²)	Descripción
< 25	Muy pequeña
25 – 250	Pequeña
250 – 500	Intermedia – pequeña
500 – 2500	Intermedia – grande
2500 – 5000	Grande
>5000	Muy grande

Fuente: (Campos, 1992)

Perímetro (Pm): Longitud de la línea envolvente de la cuenca a lo largo de la divisoria de aguas topográficas, su magnitud puede ser diferente aun cuando su área sea igual a otra.

Centro de Gravedad (C.G.): Punto central de la cuenca atendiendo exclusivamente a la forma del perímetro. Su localización viene dada por el valor medio de las coordenadas x, y, z de la superficie de la cuenca.

Cota máxima y mínima: Selección de las cotas máxima y mínima dentro del contorno de la cuenca.

b) Forma. - Determina el tipo de flujo que se tendrá a la salida de la cuenca, en forma general, las cuencas alargadas presentan flujos más uniformes que las cuencas compactas.

Coefficiente de compacidad o coeficiente de Gravelious (Ck): Cociente adimensional entre el perímetro de la cuenca (P) y el perímetro de un círculo equivalente (Pc). Este coeficiente tiene como límite inferior la unidad. El grado de cercanía a la unidad muestra la tendencia a concentrar fuertes volúmenes de agua de escurrimiento y, conforme crece su valor, indicará una mayor distorsión en su forma, es decir, se vuelve alargada o asimétrica y disminuye las probabilidades de inundación (Tabla 4, ecuación 1).



$$Ck = \frac{P}{Pc} = \frac{Pm}{2\sqrt{\pi \cdot S}} \quad (1)$$

Fuente : (Gravelius, 1914)

Donde:

Ck= coeficiente de compacidad.

Pm= perímetro de la cuenca en km.

Pc= perímetro de una circunferencia.

S= área de la cuenca en km².

Tabla 4. Clasificación de las cuencas según el índice de compacidad

Clase de forma	Índice de compacidad	Forma de la Cuenca
Clase I	1.0 a 1.25	Casi redonda a oval / redonda
Clase II	1.26 a 1.50	Oval – redonda a oval oblonga
Clase II	1.5 a más de 2	Oval – oblonga a rectangular-oblonga

Fuente: (Campos, 1992)

Rectángulo equivalente: Transformación geométrica de la cuenca en un rectángulo de igual perímetro y área. Para su cálculo se convierte las curvas de nivel en rectas paralelas a los lados menores. Este parámetro permite comparar las cuencas hidrográficas desde el punto de vista de la influencia de sus características sobre el escurrimiento (Ecuación 2 y 3).

$$L = \frac{P}{4} + \sqrt{\left(\frac{P}{4}\right)^2 - S} \quad (2)$$

$$l = \frac{P}{4} - \sqrt{\left(\frac{P}{4}\right)^2 - S} \quad (3)$$

P= perímetro de la cuenca en km.

S= área de la cuenca en km².

L= lado mayor del rectángulo en km.

l = lado menor del rectángulo en km.



Factor de forma (Kf): Relación entre el ancho promedio y la longitud de la cuenca. El escurrimiento de una cuenca de forma casi circular (Kf cercano a 1) será diferente a las de otras de formas estrechas y alargadas de la misma área (Ecuación 4).

$$Kf = \frac{S}{L^2} \quad (4)$$

Fuente : (Horton, 1945)

S= área de la cuenca en km².

L= longitud mayor de rectángulo equivalente o longitud de la cuenca en km.

Longitud del cauce principal (Lp): Distancia horizontal que recorre el río entre el punto de desagüe aguas abajo y el punto situado a mayor distancia topográfica aguas arriba.

Longitud de la cuenca (Lc) o longitud axial: Distancia horizontal del río principal entre un punto aguas abajo (estación de aforo) y otro punto situado a mayor distancia topográfica aguas arriba, donde la tendencia general del río principal corta la línea de contorno de la cuenca (Centro de Altos Estudios en Geomática, 2017).

Relación de Elongación (Re): Cociente adimensional entre el diámetro (D) de un círculo que tiene igual área (A) que la cuenca y la longitud más grande de la misma (Lc). La relación de elongación está fuertemente relacionada con el relieve de la cuenca, de manera que los valores cercanos a la unidad son típicos de regiones con relieve suave o bajo, en cambio, si Re varía de 0.5 a 0.8, está asociado a la existencia de fuertes relieves y pendientes pronunciadas del terreno (Ecuación 5).

$$Re = \frac{D}{Lc} = \frac{1.1284\sqrt{S}}{Lc} \quad (5)$$

Fuente: (Schumm, 1956)



Donde:

Re= relación de elongación

D= diámetro de un círculo de la misma área de la cuenca en km.

S= área de la cuenca en km².

Lc = longitud de la cuenca en km.

c) **Altitud.** - Se relaciona con la temperatura y forma de precipitación (velocidad de fusión), que influyen en la rapidez de escorrentía.

Curva hipsométrica: Define el relieve de una cuenca, así como representa gráficamente la relación entre las elevaciones del terreno y las superficies acumuladas por debajo o por encima de dicha elevación.

Elevación media de la cuenca (Hms): Altura media de la cuenca o altura de la carga hipotética potencial que influye sobre los volúmenes de exceso de lluvia considerándose como si estuviera uniformemente distribuidas sobre la superficie (Ecuación 6) (Centro de Altos Estudios en Geomática, 2017).

$$Hms = \frac{\sum hi * Si}{S} \quad (6)$$

Fuente: Centro de Altos Estudios en Geomática, 2017

Donde:

Hms = elevación media de la cuenca, msnm.

Si = área parcial cuenca en km².

Hi = altitud de cada área parcial cuenca, msnm.

S = área total de la cuenca en km².



Altura más frecuente (Hmf): Determinado a través del polígono de frecuencias complementario a la curva de hipsométrica presente en el Anexo 5 (Centro de Altos Estudios en Geomática, 2017).

Elevación de frecuencia media de la cuenca (Hmd): Altitud de la cuenca a la cual el 50% del área se encuentra por debajo y el otro 50% por encima.

Pendiente media de la cuenca (Pmed): Igual a la longitud total de las curvas de nivel dentro de ella multiplicada por el desnivel constante entre ellas y dividida para el área de la cuenca (Ecuación 7).

$$Pmed = \frac{DL}{S} \quad (7)$$

Donde:

Pmed = pendiente promedio de la cuenca (%).

D = intervalo o desnivel constante entre las curvas de nivel en km.

L = longitud total de las curvas de nivel, en km.

S = área de la cuenca en km².

Según la pendiente media de la cuenca el terreno se puede clasificar en:

Tabla 5. Valores para relieve o topografía del terreno

Rango de pendientes (%)	Tipo de terreno
<5	Plano
5 – 12	Ligeramente ondulado
12 – 18	Ondulado
18- 24	Fuertemente ondulado
24 – 32	Escarpado
32 – 44	Fuertemente escarpado
>44	Montañoso

Fuente: (Aranda, 1996)

c) Características de la red de drenaje



Orden de corrientes (Oc): Refleja el grado de ramificación dentro de la cuenca. La clasificación de Horton (1945) divide el orden de las corrientes en tres tipos, el primer orden lo constituye aquellas que no tiene afluentes, segundo orden a las corrientes que sólo tienen ramificaciones o tributarios de primer orden, el tercero con dos o más tributarios de orden 2 o menor y así sucesivamente. Entonces, mientras más alto es el orden de drenaje del cauce principal de la cuenca, más desarrollado es su sistema de drenaje, tiene mejores condiciones para la infiltración y consecuentemente mayor capacidad de retención.

Densidad de drenaje (Dd): Coeficiente entre la longitud total de los cauces dividida entre el área total de drenaje. Este parámetro expresa el equilibrio entre el poder erosivo del caudal y la resistencia del suelo y rocas de la superficie (Tabla 6, Ecuación 8).

$$Dd = \frac{Lh}{S} \quad (8)$$

Fuente : (Horton, 1945)

Donde:

Dd = densidad de drenaje.

Lh = longitud de la red hídrica, en km.

S = área de la cuenca, en km²

Tabla 6. Valores interpretativos de densidad de drenaje

Densidad de drenaje (km/km ²)	Categoría	La interpretación ambiental de la cuenca
<1.5	Baja	Baja la escorrentía y aumenta la infiltración
1.5 – 2.5	Medio	Tendencia media de escorrentía
2.5 – 3.0	Alta	Alta tendencia a fluir y a inundaciones
>3.0	Muy alta	Alta tendencia a la escorrentía y a la erosión

Fuente : (Horton, 1945)

Longitud de la red hídrica (Lh): Es la longitud total de toda la red de drenaje, se obtiene de la suma de las longitudes de todos los órdenes de corrientes para cada cuenca.



Frecuencia de corriente (Fc): Relación entre el número de cauces y el área total de la cuenca, se expresa en número de cauces por unidad de área (Ecuación 9).

$$F_c = \frac{N \text{ de corrientes}}{S} \quad (9)$$

Donde:

Fc = frecuencia de corriente.

N = número de corrientes.

S= área de la cuenca en km².

Pendiente promedio de la red hídrica (Pr): Indicador del grado de respuesta hidrológica de una cuenca, sus valores bajos indican que las cuencas pueden responder mejor ante precipitaciones extremas, favoreciendo la infiltración y disminuyendo el transporte de sedimentos como consecuencia de la erosión.

Tiempo de concentración (Tc): Tiempo que tarda en llegar una gota de agua de lluvia desde el extremo hidráulicamente más alejado de la cuenca a la sección de salida, se calculó con la fórmula de Giandotti (Ecuación 10, Tabla 7).

$$T_c = \frac{4\sqrt{S} + 1.5L_p}{0.8\sqrt{Hms}} \quad (10)$$

Donde:

Tc = tiempo de concentración en horas.

Lp = longitud del cauce principal, en km.

S = área de la cuenca en km²

Hms = elevación media de la cuenca

Tabla 7. Clases de tiempo de concentración

Rango de Tc (min)	Clase
-------------------	-------



0 – 41.6	Rápido
41.7 – 83.2	Moderado
83.3 – 125.1	Lento

Fuente: (Fuentes, 2004)

3.3.2 Control de calidad de datos

Una evaluación precisa del balance hídrico está estrechamente ligada con la cantidad y calidad de la información disponible, por ello, es necesario el estricto control de calidad de datos hidrometeorológicos. En este sentido se hace un control de calidad a los datos de precipitación, meteorológicos y caudales proporcionados por ETAPA EP (Tabla 2), basados en el “Protocolo de control de calidad de datos hidrometeorológicos de la red de ETAPA EP” (Gualpa, 2014). En cual consiste en identificar los datos con anomalías e incoherencias, validando la información entregada por ETAPA EP por medio de diferentes técnicas como chequeo visual, identificación de datos erróneos, datos faltantes, análisis de picos, correlaciones entre estaciones y curvas de doble masa. Posteriormente, para complementar la carencia de datos que existen durante su registro, se aplica la método de regresión lineal (UNESCO, 1981) y no otras técnicas más complejas como regresión lineal múltiple o técnicas geostatísticas, ya que, como argumentaron Célleri et al. (2007), para las características de los datos disponibles, una regresión lineal simple proporciona resultados similares y además, para estos casos, el poder de las técnicas más complejas no se explota plenamente.

3.3.3 Balance hídrico

La determinación del balance hídrico conlleva mediciones de los términos de la ecuación general de balance, la cual considera como entradas de agua a la precipitación y, como sus salidas, al caudal, infiltración, almacenamiento y la evapotranspiración. Sin embargo, es posible despreciar algunas mediciones de la ecuación del balance. Por ejemplo debido a que en el páramo existen suelos pocos profundos y lechos de roca compactas podemos descartar a la infiltración profunda (Buytaert et al., 2006b). En cuanto a las fluctuaciones en el



almacenamiento interno de captación, estas podrían ser consideradas significativas solamente para periodos cortos de tiempo, como meses (W. Buytaert et al., 2007). Para el presente estudio, el balance es diario, por lo que la variación interna de almacenamiento es asumida como insignificante (Álvarez et al., 2008). Finalmente, luego de realizar las mencionadas simplificaciones, la ecuación general del balance hídrico se resume como precipitación igual al caudal más la evapotranspiración (ecuación 11).

La determinación del balance hídrico nos permite realizar un cálculo indirecto de cualquier componente desconocido del mismo. Este estudio el balance hídrico nos permitió estimar la evapotranspiración real (Crespo et al., 2011).

$$P= Q+ ETR \quad (11)$$

Donde:

P=Precipitación (mm año⁻¹)

Q=Caudal (mm año⁻¹)

ETR=Evapotranspiración real (mm año⁻¹)

Precipitación

Para estimar la precipitación, existe el método simple y directo de los Polígonos de Thiessen. Su ejecución requiere únicamente de información pluviométrica y la ubicación espacial de las estaciones, con lo cual, el cálculo de la aportación de cada estación pluviométrica consiste en asignar el valor del punto de medición más cercano a la ubicación interpolada, dando como resultado un patrón poligonal (Goovaerts, 2000; Haan, 2002; Rudden, 1998). Luego, al dividir el área parcial del polígono entre el área total de la microcuenca, se obtiene el factor de ponderación que se multiplica por la lámina de lluvia registrada en la estación correspondiente (UNESCO, 2006). Los estudios de estimación de precipitación de Pizarro et al. (2003) y (Buytaert et al., 2006b), realizados en la Cordillera de los Andes, usan y recomiendan este método.



Para determinar la precipitación de las zonas de estudio se utilizó datos diarios y la delimitación de los polígonos de Thiessen se realizó mediante el uso del software ArcGis 10.5.

Caudal

A los datos de nivel (cm) procedentes de las estaciones hidrológicas se les realizó un previo control de calidad mencionado en el apartado 3.2.2. Posteriormente, los niveles fueron convertidos a caudales aplicando la ecuación proveniente de los aforos realizados para cada punto de descarga, obteniendo así el caudal en m^3/s . Para una mejor comprensión y comparación con los caudales de las otras microcuencas, estos caudales fueron transformados en caudales específicos, es decir en milímetros por unidad de área de la microcuenca que cierra en ese punto de descarga. Finalmente se procedió al relleno de datos.

Evapotranspiración

En 1948, Penman combinó el balance energético con el método de la transferencia de masa y derivó una ecuación para calcular la evaporación de una superficie abierta de agua a partir de datos climáticos estándar de horas sol, temperatura, humedad atmosférica y velocidad de viento. Posteriormente, este método evolucionó a Penman-Monteith, debido a que se incorporó la resistencia de la superficie de la cubierta vegetal. Actualmente la FAO (Food and Agriculture Organization) creó el método de Penman-Monteith FAO, considerado como único método estándar que tiene una alta probabilidad de predecir correctamente la ETo en una amplia gama de ubicaciones, climas y que, explícitamente, incorpora tanto parámetros fisiológicos y aerodinámicos. Este método plantea la definición del cultivo de referencia como un cultivo hipotético con una altura asumida de 0.12 m, con una resistencia superficial de $70 s m^{-1}$ y un albedo de 0.23. Estos valores, representan a la evapotranspiración de una superficie extensa de pasto verde de altura uniforme, creciendo activamente y adecuadamente regado. Por lo tanto la ecuación que derivó la FAO (Ecuación 11), es la que se utilizó para determinar ETo.



$$ET_o = \frac{0.48\Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)} \quad (11)$$

Donde:

ET_o = evapotranspiración de referencia [mm d^{-1}];

R_n = radiación neta en la superficie del cultivo [$\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$];

G = densidad del flujo de calor en el suelo [$\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$];

T = temperatura media del aire [$^{\circ}\text{C}$];

U_2 = velocidad del viento [m s^{-1}];

E_s = presión de vapor de saturación [kPa];

E_a = presión de vapor [kPa];

$e_s - e_a$ = déficit de presión de vapor de saturación [kPa];

Δ = pendiente de la curva de presión de vapor [$\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$];

Γ = constante psicrométrica [$\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$]

La evapotranspiración real o del cultivo (ET_R) es también conocida como ET_c se calcula multiplicando la evapotranspiración de referencia (ET_o) por el coeficiente de cultivo (K_c). Los efectos de las características que distinguen al cultivo del pasto están incorporadas en el coeficiente del cultivo (K_c) (Allen et al., 2006). Los valores de K_c se obtuvieron de “Mapeo dinámico de la evapotranspiración, utilizando un modelo basado en el balance de energía sobre una cuenca andina de páramo en el sur de Ecuador” realizado por Carrillo et al. (2016), en el cual, el coeficiente de cultivo K_c de pajonal igual a 0.9 para cuencas andinas que poseen páramo.

3.3.4 Indicadores hidrológicos

Para analizar el comportamiento hidrológico se determinaron diferentes índices hidrológicos, tomando como base los índices de la Iniciativa Regional de Monitoreo Hidrológico de



Ecosistemas Andinos - iMHEA. (Ochoa et al., 2012). Los indicadores hidrológicos seleccionados fueron los relacionados con el rendimiento hídrico (Tabla 8).

Tabla 8. Indicadores hidrológicos para la caracterización hidrológica básica de las microcuencas de estudio.

Indicador	Definición / indica	Método de cálculo
Caudal mínimo	El caudal más bajo registrado en un periodo dado.	El caudal más bajo registrado en una serie de tiempo.
Caudal máximo	El caudal más alto registrado en un periodo dado.	El caudal más alto registrado en una serie de tiempo.
Caudal o volumen medio anual y diario	Valor promedio de los datos de caudal para el respectivo periodo. Indica la oferta promedio diaria, anual o mensual de agua.	Valor promedio de los datos de caudal diario para el respectivo periodo.
Caudal promedio a largo plazo	El promedio del caudal que sale de la cuenca para el periodo completo de datos o un periodo largo definido.	Valor promedio de los datos de caudal diario del registro completo.
Percentil 5 de caudal (Q95)	La magnitud de caudal que es igualada o excedida el 95% del tiempo. Es representativo de los caudales bajos o caudales base.	Se identifica a partir del análisis para la curva de duración de caudal.
Percentil 90 de caudal (Q10)	La magnitud de caudal que es igualada o excedida el 10% del tiempo.	El valor de Q10 se toma del análisis para la curva de duración de caudal.
Percentil 50 de caudal (Q50)	La magnitud de caudal que es igualada o excedida el 50% del tiempo.	Se obtienen mediante el análisis de la curva de duración de caudal.
Percentil 35 de caudal (Q35)	La magnitud de caudal que es igualada o excedida el 35% del tiempo.	Se obtienen mediante el análisis de la curva de duración de caudal.
Forma y pendiente de la curva de duración de descarga (FDC)	Curva que muestra el porcentaje de tiempo durante el cual el caudal de una corriente es igual o mayor que los valores dados. Este gráfico captura y permite ver el régimen de flujo completo de un periodo de tiempo seleccionado.	Los datos de caudal son ordenados por magnitud y luego se aplica probabilidad de excedencia a cada valor. Se puede usar la función percentil en una hoja de cálculo. La pendiente de FCD se calcula a partir del percentil de caudal Q33 y Q66.
Coefficiente de escorrentía (RC)	Relación entre la cantidad de agua total que sale de la cuenca sobre la altura de precipitación que ingreso en ella, durante un periodo de tiempo dado, es decir el rendimiento hidrológico total de la cuenca.	Se calcula mediante la división del caudal para la precipitación, considerando usar datos de años hidrológicos 'enteros'.
Precipitación mensual/diaria	Altura total de precipitación que cae sobre la cuenca durante el transcurso de cada mes.	Aplicación de Polígonos de Thiessen para generar una media ponderada.
Promedio de caudal del mes más seco	El caudal promedio de la salida de la cuenca durante el mes con el menor volumen de salida de la cuenca (mes más crítico del periodo de sequía).	Caudal promedio de los datos de caudal diario para el mes con el menor volumen de salida de la cuenca.
Precipitación del mes más seco	La altura de precipitación total del mes con menores ingresos de lluvia en el año.	Suma de las alturas de precipitación registradas en cada mes, y selección del mes con el menor valor.



Índice de estacionalidad (SI)	La relación entre las desviaciones de precipitación acumuladas de cada mes frente a un valor esperado. Indica la estacionalidad del régimen de precipitación de una cuenca	SI = (1/precipitación anual) * Suma de valores absolutos (precipitación mensual – precipitación esperada). La precipitación esperada es el valor de la precipitación si el reparto fuera homogéneo, es decir, la precipitación anual dividida para doce meses. Para normalizar a valores entre 0 y 1 dividirlo por 1.8333.
--------------------------------------	--	---

Fuente: Parámetros e Indicadores Hidrológicos para Ecosistemas Andinos – Iniciativa MHEA (Ochoa et al., 2012).

3.3.5 Separación de flujos con el software R

El presente estudio empleó el método de separación del flujo base con el filtro de Lyne & Hollick (1979) para identificar y aislar el flujo rápido en el hidrograma de flujo de corriente original. El procedimiento estándar es proporcionado en Ladson, Brown, Neal, & Nathan (2013), en el cual se refleja 30 días a la serie de flujo original al principio y al final de la serie de tiempo con el propósito de obtener una respuesta de flujo rápido más realista sin errores. Seguidamente se aplica tres veces (3 pases, valor recomendado a disponer de datos diarios) las ecuaciones 12 y 13 a la serie de flujo original y duplicados.

Las ecuaciones básicas del filtro son:

$$q_f(i) = \alpha * q_f(i - 1) + \frac{(1+\alpha)}{2} [q(i) - q(i - 1)] \text{ para } q_f(i) > 0 \quad (12)$$

$$q_b(i) = q(i) - q_f(i) \quad (13)$$

Donde:

$q_f(i)$ =respuesta de flujo rápido en el i^{th} instante de muestreo.

$q_f(i - 1)$ =flujo rápido en el paso de tiempo anterior.

$q(i - 1)$ =flujo original en el paso de tiempo anterior.

$q(i)$ =flujo original en el i^{th} instante de muestreo.

$q_b(i)$ =flujo base en el i^{th} instante de muestreo.



α (*alfa*)=parámetro de filtro que permite modificar la forma de la separación.

El valor del parámetro alfa aplicado en el filtro influirá en la naturaleza de la atenuación del hidrograma del flujo, en este sentido el procedimiento estándar de Ladson et al. (2013) sugiere 0.98, mismo valor que también fue validado en el estudio de (Zhang et al., 2017) al evaluar exhaustivamente el filtro de Lyne y Hollick frente a separación de hidrogramas basada en trazadores para cinco cuencas del este de Australia.

Finalmente, Ladson et al. (2013) también describen cuándo se debe restringir el flujo base para que no exceda el flujo original o se vuelva menor que cero. Para la ejecución de este procedimiento se utilizó el código en el software R promocionado por los mismos autores en su sitio web, <https://tonyladson.wordpress.com/2013/10/01/a-standard-approach-to-baseflow-separation-using-the-lyne-and-hollick-filter/>. así como lo hicieron en su estudio Teutschbein et al. (2016).

3.3.6 Correlación entre las variables

Para las microcuencas de estudio se utilizó regresión lineal mediante el coeficiente de determinación (R^2), para establecer la relación entre las diferentes características de paisaje (morfometría y cobertura vegetal) y la respuesta hidrológica (indicadores hidrológicos). R^2 mide el grado de la covariancia entre las variables relacionadas linealmente en un rango entre 0-1 (e.g., Oñate-Valdivieso et al., 2017). Para explicar la relación entre parámetros físicos e hidrológicos se consideró solamente a los coeficientes de correlación mayores a 0.5 (Cabrera, 2009).

4. RESULTADOS

4.1 INTERPRETACIÓN FISIOGRAFICA



4.1.1 Cobertura vegetal

Como se puede ver en la Tabla 9, las 10 microcuencas de estudio poseen al páramo como cobertura principal, ocupando en promedio 77% del área de cada una de ellas. Las microcuencas con mayor porcentaje de páramo son TA1, YA1 y YA2. En cuanto a la cobertura de bosque andino, es la cobertura que en promedio ocupa el 8% de sus áreas; sin embargo, solo en 6 de las 10 microcuencas es considerada como la segunda cobertura principal, excepto en YA1 y TA1 que poseen a la cobertura cuerpos de agua; y YB1 y GB1 a la cobertura de pasto-cultivo. El tercer lugar de predominancia de cobertura, encontramos a la cobertura de pasto-cultivo (en promedio ocupa el 6% de las áreas) tendencia clara solo en 5 microcuencas (TM4, TM1, TM2, TB1, YA2).

Tabla 9. Porcentaje de cobertura vegetal de microcuencas de estudio

	TM4	TM3	TM1	TM2	TB1	TA1	YA1	YB1	YA2	GB1
Páramo	78.37	79.92	73.83	71.17	69.71	86.95	85.20	73.93	88.91	61.57
Bosque Andino	8.77	9.36	11.02	16.56	11.36	0.00	4.26	7.77	2.99	11.40
Pasto-cultivo	5.23	3.22	7.76	6.63	10.86	0.00	2.30	9.04	2.98	15.36
Parches Polylepis	3.22	4.38	3.16	3.83	2.95	2.62	0.00	0.00	0.00	2.63
Cuerpos de agua	2.79	2.21	2.33	0.92	2.20	7.45	5.13	1.16	1.40	1.16
Eucalipto-Pino	0.92	0.92	1.13	0.00	1.65	0.00	0.00	3.91	2.33	3.90
Infraestructura*	0.70	0.00	0.76	0.90	1.27	2.98	3.11	4.20	1.39	3.97

YB1=subcuena Yanuncay, TB1 = subcuena Tomebamba, GB1= subcuena Machángara, YA1= primera microcuena alta de Yanuncay, YA2 = segunda microcuena alta de Yanuncay, TA1= primera microcuena alta de Tomebamba, TM1= primera microcuena media de Tomebamba, TM2 = segunda microcuena media de Tomebamba, TM3 = tercera microcuena media de Tomebamba, TM4 = cuarta microcuena media de Tomebamba. Infraestructura=Población-Degradación-Vía. Fuente: (ETAPA, 2010).

Las coberturas como cuerpos de agua, parches de polylepis, bosque de pino, bosque de eucalipto, infraestructura; se encuentran en menor porcentaje. Particularmente YB1 Y GB1 poseen el mayor porcentaje de infraestructura y de eucalipto-pino. En cambio, TA1 es la única microcuena que carece de coberturas como bosque andino, pasto-cultivo y eucalipto-pino. A excepción del páramo y bosque andino, las coberturas de eucalipto-pino y pasto-cultivo tienen tendencia a incrementar, conforme incrementan el área de las microcuencas. El



incremento, tomando juntas a las anteriores coberturas nombradas, es de 4.14% hasta un máximo del 19.26 % del total de las áreas de las microcuencas.

Otro aspecto que se encontró es la correlación entre la cobertura vegetal con la altitud (Tabla 10), donde se describe que a mayores altitudes existe mayor porcentaje de páramo y a menores se encuentra coberturas como bosque andino, eucalipto-pino y pasto-cultivo. Esta relación influye en las correlaciones posteriores entre variables de paisaje con las hídricas, mostradas en la Tabla 20, donde se retomará su análisis.

Tabla 10. Correlación R^2 entre cobertura y altitud

Cobertura	Altitud (msnm)
Páramo	0.54
Bosque	-0.52
Eucalipto-Pino	-0.40
Pasto-Cultivo	-0.57

4.1.2 Suelos

Según el área que ocupa el suelo en las microcuencas, se tiene a los Andisoles como más representativos (Tabla 11), ocupan en promedio 81% de sus respectivas áreas. Seguido por el tipo de suelo *no aplicable*, denominando así a suelos que debido a la escala espacial de la información proporcionada no logran ser caracterizados como una tipología como tal. El tercer tipo de suelo predominante se encuentran los Inceptisols y Mollisols (representando el 2 % de las áreas de las microcuencas) y en menor porcentaje a Entisols. Por último, se tiene a la cobertura de Misceláneos que en promedio ocupa 0.22 % de total de sus áreas.

Tabla 11. Porcentaje de tipo de suelos de microcuencas de estudio

	TM4	TM3	TM1	TM2	TB1	TA1	YA1	YB1	YA2	GB1
Andisols	83.57	87.68	79.53	65.47	75.88	93.87	90.57	84.54	87.38	63.76
No aplicable	10.56	8.64	14.31	33.24	14.09	6.13	5.22	9.68	10.84	19.40
Inceptisols	3.90	1.01	3.99	0.53	5.34	0.00	0.00	1.61	0.66	4.13
Entisols	0.94	2.12	0.88	0.00	1.21	0.00	3.11	0.93	0.96	0.70
Mollisols	0.66	0.55	1.04	0.75	3.25	0.00	0.00	3.12	0.00	12.01
Misceláneos	0.33	0.00	0.25	0.00	0.23	0.00	1.09	0.12	0.16	0.00



No Aplicable= suelos no caracterizados. Fuente: (SIGTIERRAS, 2015)

El alto porcentaje de suelos de tipo *no aplicable*, es un impedimento para la interpretación clara de los tipos de suelos caracterizan a las microcuencas de estudio. Sin embargo, basados en Llambí et al. (2012) que mencionan que la vegetación puede ser un buen indicador del tipo de suelo, se correlacionó al tipo de suelo de cada microcuenca con su porcentaje de cobertura vegetal (Tabla 12).

Tabla 12. Correlación tipo de suelo y cobertura vegetal

	Andisols	Inceptisols	Mollisols	Entisols	No aplicable	Misceláneos
Páramo	0.78	-0.47	-0.62	0.07	0.39	0.11
Pasto-cultivo	-0.66	0.56	0.74	0.04	0.22	0.07
Eucalipto-Pino	0.10	0.15	0.51	0.02	0.00	-0.10
Bosque Andino	-0.72	0.23	0.12	0.04	0.67	0.07
Parches Polylepis	-0.15	0.11	0.00	-0.09	0.18	-0.25
Cuerpos de agua	0.43	-0.15	-0.15	0.02	-0.34	0.12
Infraestructura	0.00	-0.02	0.27	0.00	0.04	0.02

Coefficientes resaltados en negrita representan correlaciones relevantes con R^2 mayor a 0.5. No Aplicable= suelos no caracterizados. Fuente: elaboración propia

De la tabla anterior, se deduce que el tipo de suelo Andisols es coincidente con la cobertura de páramo, los Inceptisols revelan correlación entre pasto-cultivo y bosque andino y Mollisols para pasto-cultivo y eucalipto-pino. Para Entisols, *No Aplicable* y Misceláneos no hay correlación relevante con ninguna cobertura. Los resultados de las correlaciones relevantes están en concordancia con los estudios de Ibañez et al. (2011) y Quichimbo et al. (2012).

4.1.3 Morfometría

En total fueron calculados 19 parámetros morfométricos y 6 de estos fueron interpretados para cada microcuenca (Tabla 13). La interpretación está en base a la sección 3.3.1 del apartado de métodos (Parámetros fisiográficos) y según las Tablas 1 y de la 4 a 8. Los parámetros que no están presentados en esta sección, y que apoyan a la interpretación, se presentan en los Anexos 1 y 2.



Tabla 13. Interpretación Morfométrica

Microcuenca	Cmin (msnm)	S	Ck	Re	Dd	Pmed	Tc
TA1	Alta	Muy pequeña	Oval – redonda a oval oblonga	Fuerte	Media	Fuertemente ondulado	Rápido
TM4	Alta	Pequeña	Oval – redonda a oval oblonga	Fuerte	Baja	Fuertemente ondulado	Lento
TM3	Media	Pequeña	Oval – oblonga a rectangular- oblonga	Fuerte	Baja	Fuertemente ondulado	Moderado
TM2	Media	Pequeña	Oval – oblonga a rectangular- oblonga	Fuerte	Baja	Fuertemente ondulado	Moderado
YA1	Media	Pequeña	Oval – oblonga a rectangular- oblonga	Fuerte	Baja	Fuertemente ondulado	Moderado
TB1	Media	Intermedia	Oval – redonda a oval oblonga	Fuerte	Baja	Fuertemente ondulado	Lento
TM1	Alta	Intermedia	Oval – redonda a oval oblonga	Fuerte	Baja	Fuertemente ondulado	Lento
GB1	Baja	Intermedia	Oval – oblonga a rectangular- oblonga	Fuerte	Baja	Fuertemente ondulado	Lento
YB1	Baja	Intermedia	Oval – oblonga a rectangular- oblonga	Fuerte	Baja	Ondulado	Lento
YA2	Baja	Intermedia	Oval – oblonga a rectangular- oblonga	Fuerte	Baja	Ondulado	Lento

Cmin= cota mínima, S=área, Ck=coeficiente de compacidad, Re=relación de elongación, Dd=densidad de drenaje, Pmed=pendiente media de la cuenca, Tc=tiempo de concentración

Referente al tamaño de las microcuencas, varían desde 13 a 414 km², caracterizándolas como cuencas pequeñas a intermedias. En cuanto al coeficiente de compacidad (Ck) o forma de la cuenca, las microcuencas TM4 TM1 TB1 y TA1 son consideradas oval–redondas con un promedio de tiempo de concentración (Tc) de 1.31 h, así mismo, en el resto de las microcuencas, son de forma oblonga-rectangular con Tc de 1.65 h. Lo que, a su vez, es un Tc tipo moderado para cuencas oval–redondas y lento para las cuencas oblonga-rectangulares.

Según las cotas mínimas de las microcuencas de estudio, se clasificó a las microcuencas en: altas, medias y bajas, con altitudes en promedio de 3,346 msnm 2,879 msnm y de 2,538 msnm respectivamente.



Por otro lado, el valor de sus pendientes caracteriza a las microcuencas de estudio con relieve de tipo ondulado a fuertemente ondulado, valor en concordancia con la relación de elongación que tienen valores 0.57 a 0.86 (relieve fuerte). Sin embargo, el fuerte relieve es contrarrestado por los valores mínimos de densidad de drenaje, lo cuales están asociados a regiones con materiales de suelo poco erosionables, bajo cubierta de vegetación, lo cual aumenta la infiltración.

4.2 ÍNDICES HIDROLÓGICOS

4.2.1 Precipitación

Con la finalidad de identificar la variabilidad de precipitación presente en cada microcuenca, se calculó los índices de precipitación (Tabla 14), además se estableció un régimen de precipitación mensual representada en las Figuras 2 y 3.

Tabla 14. Indicadores de precipitación

Microcuenca	Precipitación mensual (mm mes ⁻¹)	Precipitación del mes más seco (mm mes ⁻¹)
TA1	64.55	sep-15 20.35
TB1	86.11	sep-15 28.64
TM1	87.22	ago-16 25.31
TM2	94.38	sep-15 33.07
TM3	85.65	ago-16 20.82
TM4	86.39	ago-16 23.55
GB1	101.54	ago-16 39.44
YA1	77.58	ago-16 21.16
YA2	71.79	ago-15 16.58
YB1	68.01	ago-15 15.29

YB1=subcuenca Yanuncay, TB1 = subcuenca Tomebamba, GB1= subcuenca Machángara, YA1= primera microcuenca alta de Yanuncay, YA2 = segunda microcuenca alta de Yanuncay, TA1= primera microcuenca alta de Tomebamba, TM1= primera microcuenca media de Tomebamba, TM2 = segunda microcuenca media de Tomebamba, TM3 = tercera microcuenca media de Tomebamba, TM4 = cuarta microcuenca media de Tomebamba. Fuente: propia.

Al analizar la precipitación mensual por subcuenca, se identificó que la subcuenca del río Tomebamba posee una precipitación mensual promedio de 84.05 mm, en la cual, la microcuenca TM2 con 94.38 mm mes⁻¹ presenta el mayor valor de precipitación. En la



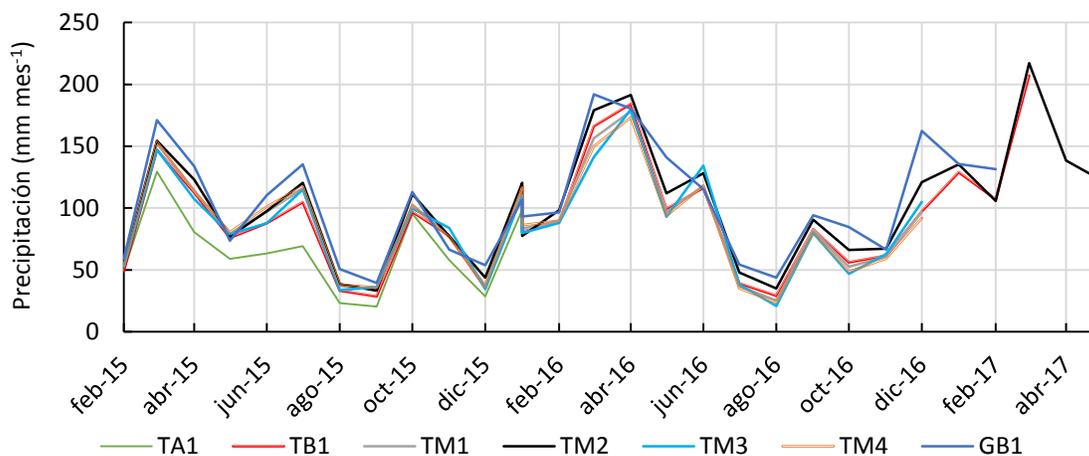
subcuenca del río Yanuncay, la precipitación mensual promedio fue de $72.46 \text{ mm mes}^{-1}$, siendo YA1 su microcuenca anidada con mayor precipitación mensual ($77.58 \text{ mm mes}^{-1}$). Por último, la subcuenca del río Machángara posee una precipitación mensual de $101.54 \text{ mm mes}^{-1}$. Por lo tanto, mensualmente en la subcuenca del Machángara llueve 28% más que Yanuncay y 17% más que Tomebamba.

Para las microcuencas TB1, TM2, TA1 la menor precipitación ocurre en septiembre del 2015. Para YA2, YB1 la menor precipitación ocurre en agosto del 2015. Para las microcuencas TM1, TM3, TM4, GB1, YA1 el mes más seco corresponde a agosto del 2016. Generalizando, se concluye que para estas microcuencas alto andinas los meses secos corresponden a agosto y septiembre.

Régimen de precipitación mensual

Las microcuencas de estudio fueron agrupadas según la tendencia del régimen de precipitación mensual. Al grupo R1 pertenecen las microcuencas TA1, TM1, TM2, TM3, TM4 y GB1, y al grupo R2: YA1, YA2, YB1.

En la Figura 2, en el grupo R1 se observa el régimen de precipitación para las microcuencas pertenecientes a la subcuenca del río Tomebamba (TA1, TM1, TM2, TM3 y TM4) y del río Machángara (GB1). El patrón de precipitación está definido por fuertes lluvias en marzo 2015, marzo a abril del 2016 y marzo del 2017. También se observa una precipitación constante pero menos intensa durante el resto de periodo. La época de menor precipitación tiene lugar en septiembre 2015 y agosto del 2016. Por lo tanto, los meses secos y lluviosos coinciden para este grupo de microcuencas. Comparado entre los años de estudio, 2015 fue un año seco.



TB1 = subcuena Tomebamba, GB1= subcuena Machángara, TA1= primera microcuena alta de Tomebamba, TM1= primera microcuena media de Tomebamba, TM2 = segunda microcuena media de Tomebamba, TM3 = tercera microcuena media de Tomebamba, TM4 = cuarta microcuena media de Tomebamba.

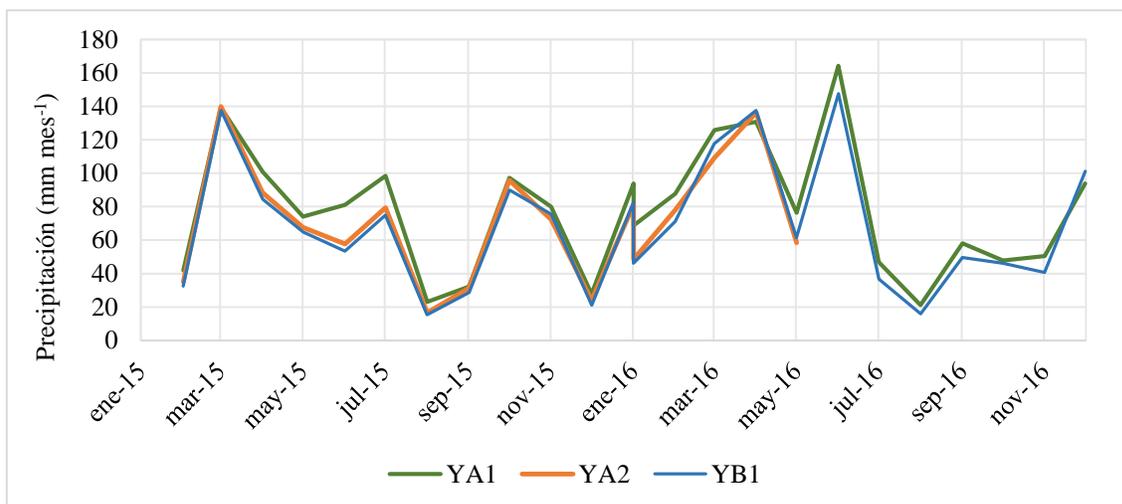
Figura 2. Régimen de precipitación mensual grupo R1

En la parte alta (4,079.06 msnm) de la subcuena del río Tomebamba se encuentra TA1 con el menor valor de precipitación ($68.65 \text{ mm mes}^{-1}$), al contrario, la de mayor cantidad de lluvia cayó sobre GB1 con $103.57 \text{ mm mes}^{-1}$ ubicada en la parte baja de la subcuena del Machángara a 3,751.98 msnm, seguida por TM2, ubicada en la parte media de la subcuena del Tomebamba (3,818.76 msnm). Como se puede identificar, en las elevaciones aproximadas de entre 3,700 y 3,800 msnm llueve más que a una altura de 4,000 msnm.

En cuanto a las microcuenas anidadas en la subcuena media del Tomebamba, su precipitación es parecida, variando con 1 a 2 mm mes^{-1} , exceptuando TM2 cuya diferencia es de 7 a 9 mm mes^{-1} con respecto a las otras microcuenas, esto probablemente se debe a que esta microcuena posee la mayor pendiente (22.82%). Dichos valores muestran que la distribución espacial de la precipitación en la subcuena es prácticamente homogénea debido a que no existen diferencias representativas en la cantidad de lluvia precipitada.



Entre las microcuencas del Grupo R1, se puede identificar que TA1 posee la menor precipitación ($20.35 \text{ mm mes}^{-1}$) correspondiente al mes más seco, esto probablemente se debe a que está localizado en la mayor altura (4079.06 msnm).



YB1=subcuena Yanuncay, YA1= primera microcuena alta de Yanuncay, YA2 = segunda microcuena alta de Yanuncay.

Figura 3. Régimen de precipitación mensual grupo R2

En la Figura 3, en el grupo R2 se observa que el régimen de precipitación de las microcuencas pertenecientes a la subcuena del río Yanuncay (YA1, YA2 y YB1) está definido por fuertes lluvias en marzo 2015, abril y junio del 2016. A su vez existe una precipitación constante pero menos intensa durante el resto de periodo, mientras que la época de menor precipitación tiene lugar en agosto del año 2015 y 2016. Comparado entre los años de estudio, en el 2015 existió una menor precipitación.

En cuanto a precipitación mensual, la subcuena YB1 con altitud de $3,795 \text{ msnm}$ presenta menor valor de lluvia ($68.01 \text{ mm mes}^{-1}$) en comparación con la precipitación de YA1 con $77.58 \text{ mm mes}^{-1}$ ubicada en la parte alta ($3,959 \text{ msnm}$) de la misma subcuena. Además, YB1 posee el menor valor de precipitación para el mes seco con 15.29 mm para el mes de agosto del 2015. A este grupo de microcuencas se identifica que a elevaciones de $3,700 \text{ msnm}$ la precipitación es menor que en cuencas ubicadas a $3,900 \text{ msnm}$.



Comparando los dos grupos R1 y R2, los meses lluviosos coinciden para marzo y abril y el mes con menor precipitación ocurre en agosto.

Análisis de estacionalidad

Para el análisis de estacionalidad de la precipitación en las microcuencas de estudio, se empleó el Índice de Estacionalidad (SI, por sus siglas en inglés) desarrollado por Walsh y Lawler. Este índice fue calculado con los datos de precipitación de los años 2015 y 2016 de las estaciones pluviométricas y meteorológicas (Tabla 11).

Según Célleri et al. (2007) para obtener la variabilidad de precipitación se necesita información de al menos 30 años de datos. El periodo de datos de nuestro estudio es corto para hacer predicciones sobre la estacionalidad de la lluvia, por lo que el SI obtenido para los diferentes pluviómetros determina su variabilidad en la gradiente altitudinal.

La distribución de la precipitación puede variar desde una distribución uniforme a lo largo del año hasta una concentración en pocos meses. En este sentido, el índice fue calculado para 17 estaciones con información pluviométrica, que resultaron ser representativas de la variación altitudinal del área de estudio.

Tabla 15. Régimen de precipitación

Altitud (msnm)	Estaciones	SI	Régimen de precipitaciones
3851	CHANE	0.35	Propagación de precipitaciones durante el año, pero con una estación de lluvia definida
3795	PAT	0.39	
3592	VEN	0.39	
3485	CHANT	0.35	
3434	LAB	0.38	
3310	CHI	0.39	
3538	CAN	0.48	
3748	IZH	0.42	
3269	SOLP	0.50	
3174	POR	0.57	

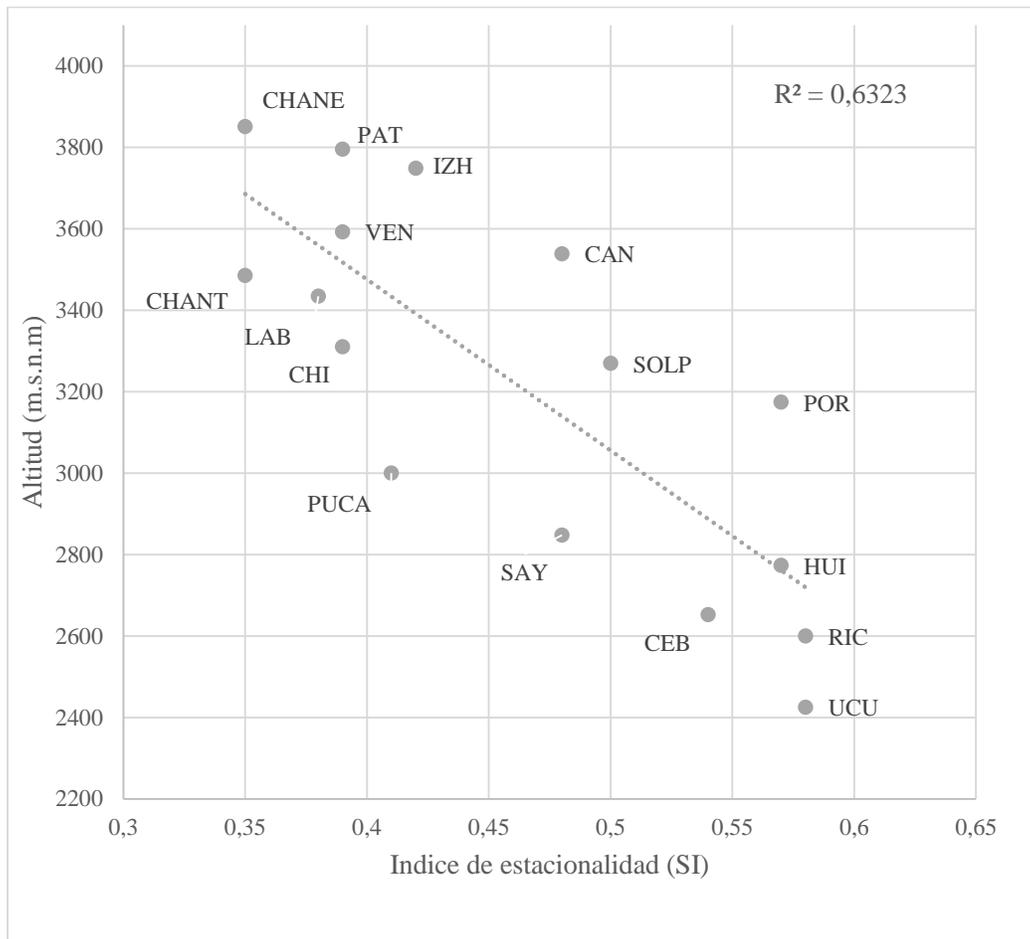


3000	PUCA	0.41	
2847	SAY	0.48	No estacional con una corta estación seca
2773	HUI	0.57	
2652	CEB	0.54	
2600	RIC	0.58	
2425	UCU	0.58	

SI= índice de estacionalidad. CHANE=Chanlud Empresa Eléctrica, PAT=Patoquinoas, VEN=Ventanas, CHANT=Chanlud ETAPA, LAB=El Labrado, CHI=Piscícola en Chirimachay, CAN=Cancán Refugio, IZH=Izhcayrrumi cabecera, SOLP=Soldados en PTAR, POR=Portete, PUCA=Yanuncay en Pucán, SAY= Sayausí en PTAP, HUI=Huizhil, CEB=Cebollar en PTAP, RIC=Ricaurte, UCU=Ucubamba.

Existen tres tipos de régimen de precipitación para todas las estaciones de estudio (Tabla 15). Las estaciones con valores de SI (0.35-0.39) nos indican que existe una propagación de precipitaciones durante el año, pero con una estación de lluvia definida en los meses marzo-abril para los dos años (2015 y 2016). El grupo con SI entre 0.41 y 0.58 está conformado por 60% de las estaciones que posee un régimen no estacional con una corta estación seca en agosto a octubre del 2015 y 2016.

El índice de estacionalidad (SI) de las estaciones que miden precipitación presenta una relación inversa con altura ($R^2 = 0.65$) representada en la Figura 4.



SI= índice de estacionalidad. CHANE=Estación Chanlud Empresa Eléctrica, PAT=Patoquinoas, IZH=Izhcayrumi cabecera, VEN=Ventanas, CHANT=Chanlud ETAPA, LAB=El Labrado, CAN=Cancán Refugio, CHI=Piscícola en Chirimachay, SOLP=Soldados en PTAR, POR=Portete, PUCA=Yanuncay en Pucán, SAY= Sayausí en PTAP, HUI=Huizhil, CEB=Cebollar en PTAP, RIC=Ricaurte, UCU=Ucubamba.

Figura 4. Relación del índice de estacionalidad vs altura

La estación CHANE ubicada a una altura de 3,485 msnm posee un SI de 0,35 y UCU localizada en la elevación más baja 2,425 msnm posee un mayor valor de SI (0,58). Por lo tanto, tal como lo señalan Célleri et al. (2007) la estacionalidad es menos pronunciada a elevaciones mayores, es decir, mientras se va ganando altura SI disminuye su valor.



Los resultados de la tesis de Condo & Juela (2017) nos indica un SI de 0.40 y 0.28 para las estaciones de CHI y PAT ubicadas en la subcuenca del Tomebamba, valores coincidentes con nuestros resultados.

4.2.2 Caudal

Los caudales de la Tabla 16 fueron determinados con la finalidad de identificar la cantidad de recurso hídrico que sale de las microcuencas y su respuesta a eventos extremos. Para mejor interpretación de los resultados, se establecieron tres rangos de caudales (alto, medio, bajo). Estos caudales están expresados en mm d^{-1} , debido a que nos permiten comparar el caudal de las distintas microcuencas siendo sus superficies distintas.

Tabla 16. Indicadores de caudal

	Microcuenca	Q máximo (mm d^{-1})	Q mínimo (mm d^{-1})	Q medio mes más seco (mm d^{-1})
Q máximo Alto	YA1	14.66	0.17	0.62
	TM3	13.3	0.3	0.61
	GB1	12.67	0.27	0.81
Q máximo medio	TM2	11.56	0.21	0.71
	TM1	11.54	0.2	0.67
	YB1	10.89	0.19	0.29
	TM4	10.45	0.21	0.58
Q máximo Bajo	TB1	10.3	0.28	0.65
	TA1	9.63	0.25	0.54
	YA2	9.56	0.21	0.49

Q=caudal, YB1=subcuenca Yanuncay, TB1 = subcuenca Tomebamba, GB1= subcuenca Machángara, YA1= primera microcuenca alta de Yanuncay, YA2 = segunda microcuenca alta de Yanuncay, TA1= primera microcuenca alta de Tomebamba, TM1= primera microcuenca media de Tomebamba, TM2 = segunda microcuenca media de Tomebamba, TM3 = tercera microcuenca media de Tomebamba, TM4 = cuarta microcuenca media de Tomebamba.

Entre los caudales máximos de rango alto, la microcuenca YA1 ubicada en la parte alta de la subcuenca del río Yanuncay, posee el caudal máximo diario más elevado (14.66 mm d^{-1}) correspondiente al mes junio del 2016. Así como, en este mismo mes se presentó el mayor caudal ($130.90 \text{ mm mes}^{-1}$) para esta microcuenca, como consecuencia de ser el mes más lluvioso de toda la serie de datos, con una precipitación de $164.24 \text{ mm mes}^{-1}$ (Figura 5).

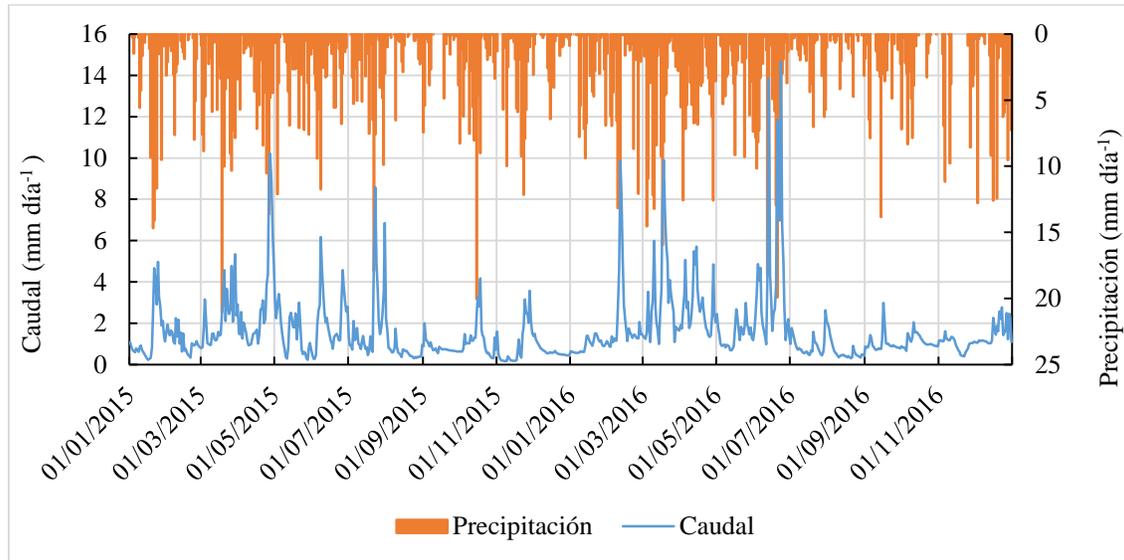


Figura 5. Relación caudal-precipitación de la microcuenca YAI (primera microcuenca alta de Yanuncay)

Entre los caudales máximos con valores intermedios, la microcuenca con mayor caudal máximo (11.56 mm d^{-1}) es TM2 ubicada en la parte media de la subcuenca del Tomebamba. Este Q_{\max} es parte del mayor caudal mensual ($121.5 \text{ mm mes}^{-1}$) en marzo del 2016 y proviene de la mayor precipitación mensual ($198.99 \text{ mm mes}^{-1}$) (Figura 6).

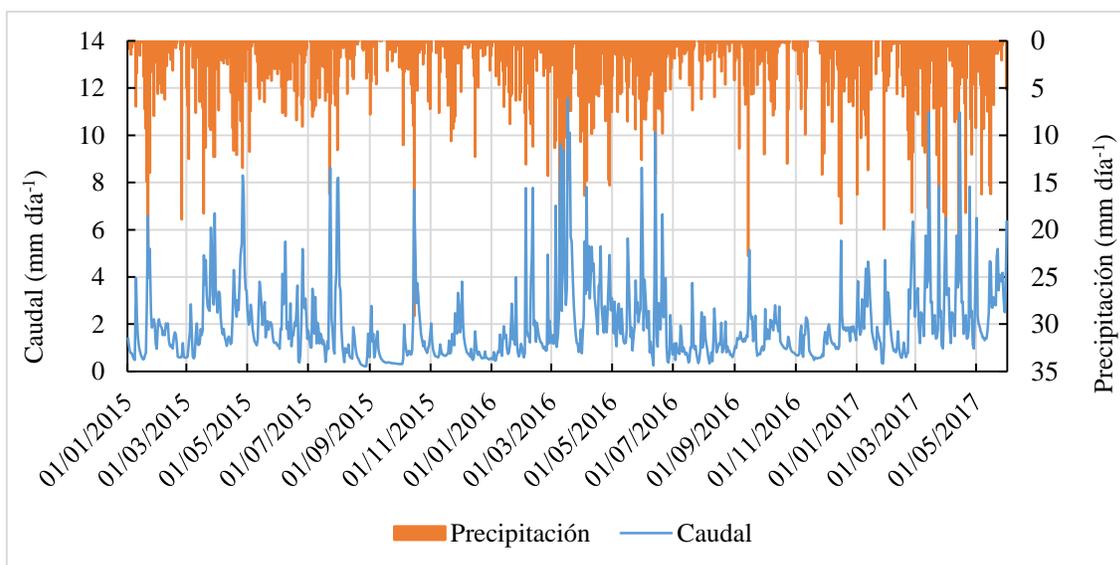


Figura 6. Relación caudal-precipitación de la microcuenca TM2 (segunda microcuenca media de Tomebamba).

Entre los caudales máximos con los valores más bajos, la microcuenca con mayor caudal máximo (10.3 mm d^{-1}) es TB1 ubicada en la parte baja de la subcuenca del Tomebamba. Este Q_{max} es parte del mayor caudal mensual ($102.23 \text{ mm mes}^{-1}$) en marzo del 2017 y proviene de la mayor precipitación mensual ($207.21 \text{ mm mes}^{-1}$) (Figura 7).

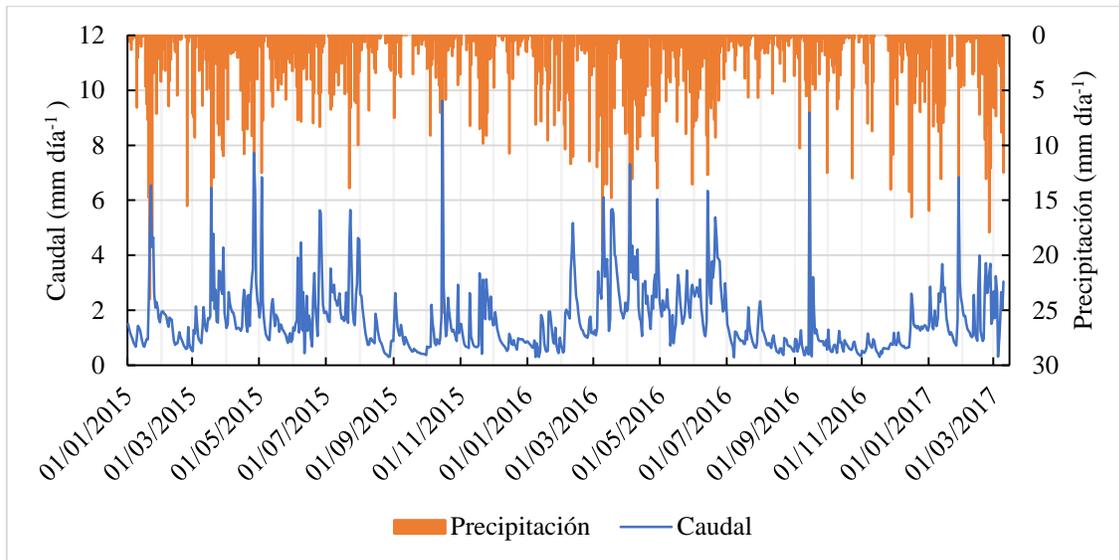


Figura 7. Relación caudal precipitación de la microcuenca TB1 (primera microcuenca baja de Tomebamba),

Para el análisis del indicador del caudal medio del mes más seco, se toma de referencia a las tres subcuencas. Las microcuencas anidadas en YB1 presentan en promedio el menor valor (0.47 mm mes^{-1}), seguida las microcuencas de TB1 con 0.63 mm mes^{-1} y con el mayor valor de caudal medio para GB1 (0.81 mm mes^{-1}). Concluyendo, YB1 es la subcuenca menos regulada tanto por el hecho de que su caudal disminuye notoriamente en comparación a las otras subcuencas y porque históricamente ha presentado repentinas crecidas del río Yanuncay Vallejo (2014).

4.2.3 Balance hídrico



Se determinó el balance hídrico diario para cada microcuenca con el propósito de conocer la cantidad de precipitación que se convierte en caudal y las pérdidas que se dan en el mismo balance (Tabla 17).

Tabla 17. Balance hídrico diario de las microcuencas de estudio

Microcuenca	Periodo del balance	P (mmd ⁻¹)	Q (mmd ⁻¹)	P - Q (mmd ⁻¹)	ETo (mm d ⁻¹)	Etr (mm d ⁻¹)	RC	
Grupo 1	GB1	01/01/2015-10/03/2017	3.45	1.76	1.7	1.65	1.48	0.53
	TB1	01/01/2015 - 31/03/17	3.06	1.78	1.28	1.62	1.46	0.54
	TM1	01/01/2015-31/12/2016	2.86	1.72	1.14	1.62	1.46	0.62
	TM2	01/01/2015 - 31/05/2017	3.38	1.98	1.4	1.63	1.47	0.61
	TM3	01/01/2015-31/12/2016	2.81	1.9	0.91	1.64	1.48	0.70
	TM4	01/01/2015-31/12/2016	2.84	1.68	1.15	1.61	1.45	0.62
	YB1	01/01/2015 - 31/12/2016	1.98	1.17	0.81	1.39	1.25	0.59
Grupo 2	YA1	01/01/2015-31/12/2016	2.55	1.62	0.93	1.56	1.41	0.68
	YA2	01/01/2015 - 31/5/2016	2.36	1.6	0.76	1.68	1.51	0.71
	TA1	01/01/2015-31/12/2015	2.12	1.40	0.72	1.45	1.30	0.71

P=precipitación, Q=caudal, Eto=evapotranspiración de referencia, Etr=evapotranspiración real, RC=coeficiente de escorrentía. YB1=subcuenca Yanuncay, TB1 = subcuenca Tomebamba, GB1= subcuenca Machángara, YA1= primera microcuenca alta de Yanuncay, YA2 = segunda microcuenca alta de Yanuncay, TA1= primera microcuenca alta de Tomebamba, TM1= primera microcuenca media de Tomebamba, TM2 = segunda microcuenca media de Tomebamba, TM3 = tercera microcuenca media de Tomebamba, TM4 = cuarta microcuenca media de Tomebamba.

La evapotranspiración y a la escorrentía son consideradas como salidas o pérdidas del balance. El porcentaje de coeficiente de escorrentía (porcentaje de descarga) de estas microcuencas se encuentran entre 52.8% al 71.0% (RC = 0.53 – 0.71) de la precipitación media, mientras que la evapotranspiración real que varía entre 1.25 y 1.51 mm d⁻¹ (Tabla 17).

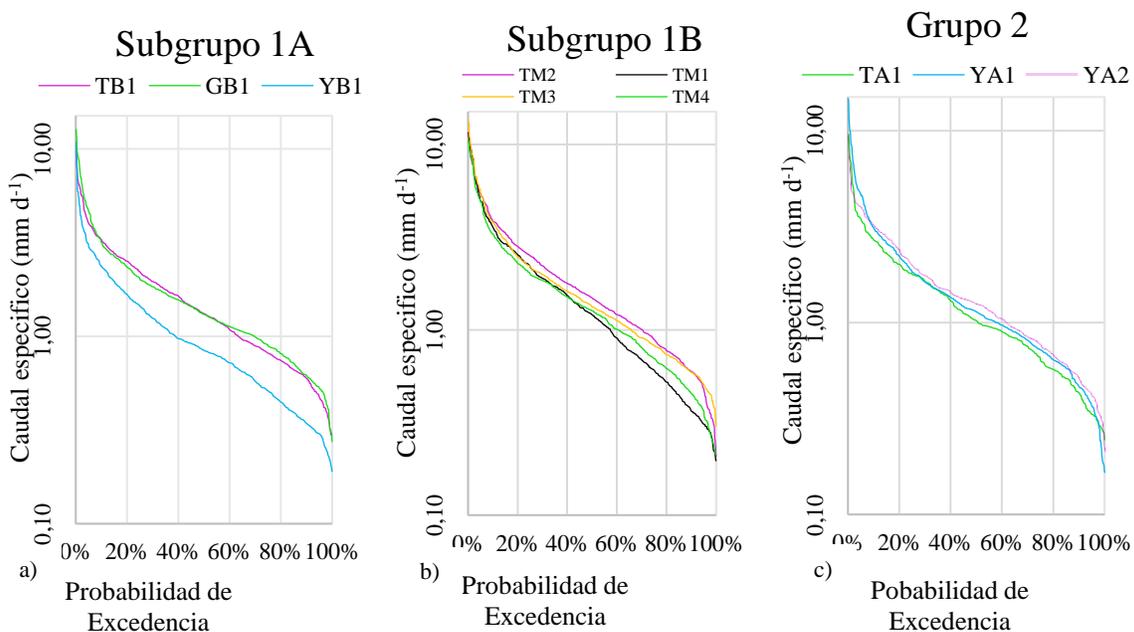
La evapotranspiración se le relaciona con el tipo de cobertura principalmente (Bosch & Hewlett, 1982). Esta relación permitió diferenciar a las microcuencas separándolas en 2 grupos (Tabla 17): Grupo 1 (TM1, TM2, TM3, TM4, TB1, GB1, YB1) posee en promedio, 72% de páramo, 21% entre coberturas de bosque alto andino, pino, eucalipto y 1.44 mm d⁻¹ de evapotranspiración. En cambio, el Grupo 2 (YA1, YA2, TA1), posee en promedio mayor porcentaje de páramo (87%), 5% de bosque y 1.41 mm d⁻¹ de evapotranspiración. Generalmente, el coeficiente de escorrentía (RC) posee una relación inversa con la evapotranspiración (Buytaert et al., 2006c), esto se evidencia en nuestros resultados, ya que

el Grupo 1 posee un RC de 0.70, en comparación con el Grupo 2 con una mayor evapotranspiración y un menor RC de 0.61.

En general, la diferencia entre caudal y precipitación de la subcuenca del Machángara (GB1) fue de 1.7 mm d^{-1} , este valor es mayor a la diferencia del Tomebamba (TB1) con 1.1 mm d^{-1} y del Yanuncay (YB1) con 0.83 mm d^{-1} . Esto nos indica que existen mayores pérdidas en la subcuenca del Machángara en comparación a Yanuncay. El menor valor de evapotranspiración por parte de YB1 sea probablemente por el mayor porcentaje de páramo (73.93%), en comparación a las otras dos subcuencas.

4.2.4 Curvas de duración de Caudal (FDC)

La forma de las curvas de duración de caudales (FDC) de la Figura 8 refleja la respuesta hidrológica específica que tienen las microcuencas de la presente investigación. FDC considera en el eje x a la probabilidad de excedencia y el eje y el flujo total expresado en milímetros.



YB1=subcuenca Yanuncay, TB1 = subcuenca Tomebamba, GB1=subcuenca Machángara, YA1= primera microcuenca alta de Yanuncay, YA2 = segunda microcuenca alta de Yanuncay, TA1= primera microcuenca alta de Tomebamba, TM1=



primera microcuenca media de Tomebamba, TM2 = segunda microcuenca media de Tomebamba, TM3 = tercera microcuenca media de Tomebamba, TM4 = cuarta microcuenca media de Tomebamba.

Figura 8. Curvas de duración de caudales de las microcuencas de estudio: (a) Subcuencas Yanuncay, Tomebamba, Machángara; (b) Microcuencas anidadas en Tomebamba; (c) Microcuencas anidadas en Yanuncay.

Para la mejor interpretación de los resultados las microcuencas se dividieron en grupos, los mismos que se retoma los grupos de la sección 4.2.3, con la particularidad que al grupo 1 se los subdivide en dos subgrupos. Por lo tanto, el subgrupo 1A (YB1, GB1, TB1), subgrupo 1B (TM2, TM1, TM3, TM4) y grupo 2 (TA1, YA1, YA2). El subgrupo 1A contiene a las FDC de las tres subcuencas principales (Tomebamba, Yanuncay, Machángara), y el subgrupo 1B y 2 son microcuencas anidadas en Tomebamba y en Yanuncay, respectivamente, a excepción de la microcuenca TA1 que pertenece a Tomebamba.

Las FDC de las microcuencas del subgrupo 1B y del grupo 2 se diferencian por su forma, particularmente debido a la pendiente de las FDC. En este sentido existe una menor regulación explicada por una mayor pendiente FDC y esta a su vez vinculada con una mayor pendiente de la cuenca. Esta estrecha relación entre estas variables se utilizó para agrupar a microcuencas con mayor y menor pendiente, tal y como lo hizo Crespo et al. (2011). Por lo que, las microcuencas del subgrupo 1B tiene en promedio pendientes medias de 21.41% y pendientes de FDC de 142.79%, atribuyéndolas la forma de las curvas más pronunciadas respecto a las microcuencas del grupo 2, las mismas que poseen en promedio pendientes media de 18.4 % y las pendientes de FDC de 133.97%.

En las curvas de duración de caudales de la Figura 8 se distinguen tres tramos definidos como: caudales altos aquellos con valores de caudal de excedencia entre Q_{max} y Q_{10} , caudales moderados entre Q_{10} y Q_{90} ; y flujos bajos aquellos por encima Q_{90} (Cisneros et al., 2007). A partir de estos caudales característicos mostrados en la Tabla 18 y las relaciones entre éstos presentados en la Tabla 18, se puede realizar comparaciones entre las microcuencas de estudio:



Tabla 18. Indicadores hidrológicos (caudales altos)

	Microcuenca	Pmed (%)	Pmed FDC (%)	Q10 (mm)	Q50 (mm)	Q90 (mm)
Subgrupo 1A	YB1	15.30	135.22	2.35	0.84	0.34
	GB1	20.24	126.33	3.15	1.31	0.62
	TB1	21.09	140.75	3.23	1.32	0.60
	TM4	21.67	141.13	3.27	1.27	0.45
Subgrupo 1B	TM3	19.37	138.73	3.77	1.33	0.59
	TM2	22.82	139.00	3.84	1.48	0.60
	TM1	21.78	152.32	3.55	1.20	0.36
	YA1	22.07	132.34	3.11	1.14	0.46
Grupo 2	YA2	13.75	131.67	3.24	1.26	0.51
	TA1	19.50	137.90	2.69	1.02	0.43

Pmed =Pendiente media de la cuenca; Pmed FDC=porcentaje de la pendiente de curva de descarga. YB1=subcuenca Yanuncay, TB1 = subcuenca Tomebamba, GB1= subcuenca Machángara, YA1= primera microcuenca alta de Yanuncay, YA2 = segunda microcuenca alta de Yanuncay, TA1= primera microcuenca alta de Tomebamba, TM1= primera microcuenca media de Tomebamba, TM2 = segunda microcuenca media de Tomebamba, TM3 = tercera microcuenca media de Tomebamba, TM4 = cuarta microcuenca media de Tomebamba.

Los caudales específicos altos dependen de la cantidad de precipitación, del exceso de infiltración y exceso de saturación del suelo (Buytaert et al., 2006a). En este sentido, se observa en la Figura 7 (Subgrupo 1A), la forma de FDC de la subcuenca YB1 muestra menores flujos altos que los de GB1 y TB1, lo cual se lo atribuye a que la precipitación de YB1 fue 1.22 mm d^{-1} menos que GB1 y 0.83 mm menos que TB1 (Tabla 17). Mientras que la variación entre el volumen de GB1 y TB1 se mantienen muy similares entre sí (mismo régimen de precipitación, sección 4.2.1). En cuanto a las microcuencas del subgrupo 1B, estas tienen en promedio 2.84 mm d^{-1} de precipitación, a excepción de la microcuenca TM2 con 3.84 mm , se puede observar su FDC está por encima de las demás, con lo cual se tiene flujos altos mayores. Para el grupo 2, TA1 tiene el menor Q10 y Q50, ya que su precipitación es menor al de las otras dos del grupo.

4.2.5 Separación de flujos

Tras la aplicación del modelo de filtrado digital para la separación de flujos se establecieron los porcentajes de caudal base y superficial de cada microcuenca mostrados en la Tabla 19. A manera de ejemplo se muestra en la Figura 9 la representación gráfica de la separación



flujos de una de las microcuencas, las demás gráficas de las otras microcuencas se presentan en el Anexo 6.

Tabla 19. Separación de flujos

Grupos	Microcuenca	Q90/Q10	Caudal Base (%)	Caudal superficial (%)
Subgrupo 1A	YB1	0.15	71.98	28.02
	GB1	0.20	75.24	24.76
	TB1	0.18	74.33	25.67
Subgrupo 1B	TM4	0.14	71.38	28.62
	TM3	0.16	73.36	26.64
	TM2	0.16	72.25	27.75
	TM1	0.10	70.28	29.72
Subgrupo 2	YA1	0.15	72.06	27.94
	YA2	0.16	72.62	27.38
	TA1	0.16	69.59	30.41

YB1=subcuenca Yanuncay, TB1 = subcuenca Tomebamba, GB1= subcuenca Machángara, YA1= primera microcuenca alta de Yanuncay, YA2 = segunda microcuenca alta de Yanuncay, TA1= primera microcuenca alta de Tomebamba, TM1= primera microcuenca media de Tomebamba, TM2 = segunda microcuenca media de Tomebamba, TM3 = tercera microcuenca media de Tomebamba, TM4 = cuarta microcuenca media de Tomebamba. Fuente: propia

Los valores de caudales específicos bajos dependen de la regulación, la misma que puede ser analizada como una relación entre Q90 y Q10.

La relación Q90/Q10 indica el rango en que varían los caudales mínimos de los caudales máximos. Mientras más cercano a 0 este valor significa que hay un mayor rango de variación entre caudales. Por lo tanto, como se puede observar la Tabla 19, en el subgrupo 1A la cuenca YB1 tiene valor más cercano a cero con un porcentaje de caudal base menor (71%), explicando su menor capacidad de regulación respecto a GB1 y TB1 que tienen valores más altos de esta relación y de caudal base. Las características menos estables de escurrimiento de YB1 con respecto a TB1 se las puede atribuir principalmente que tiene 4% menos de bosque nativo en referencia a TB1 y GB1. Además, YB1 en comparación al resto de las zonas de estudio, y después de GB1, es la subcuenca con mayor porcentaje de coberturas alteradas (4% de cobertura de Eucalipto y Pino y 4% entre vías, población y degradación).

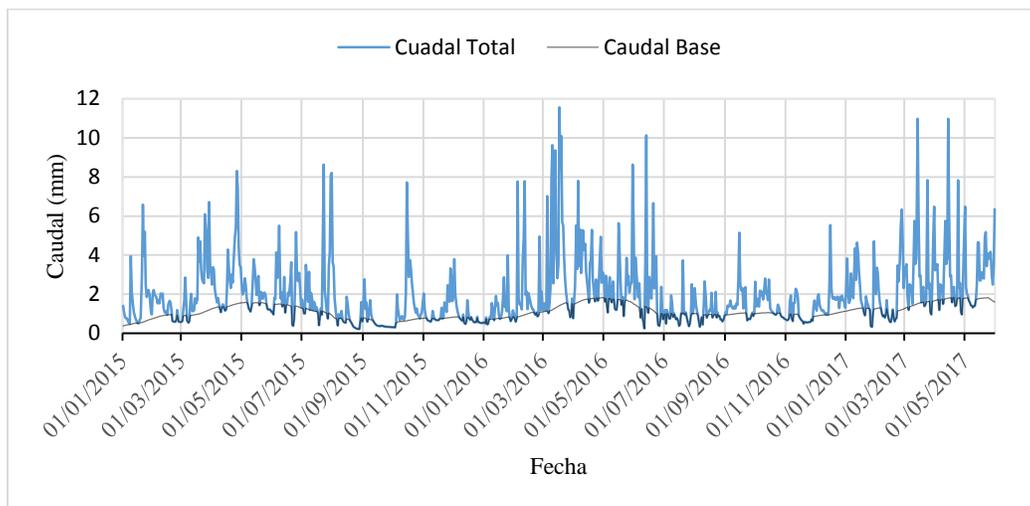


Figura 9. Separación de flujos de TM2 (segunda microcuenca media de Tomebamba)

De las microcuencas del subgrupo 1B, TM3 es la más regulada con un valor Q_{90}/Q_{10} de 0.16, con el menor valor de la pendiente FDC (138%) y con el mayor porcentaje de caudal base (73%), lo cual puede ser atribuido al ser la microcuenca menos alterada del grupo. Además, las microcuencas del subgrupo B tienen como segunda cobertura predominante después del páramo al bosque andino, por lo que la pérdida de regulación se puede atribuir principalmente al incremento de pasto y cultivo. En este sentido, para TM2, TM4 y TM1 el valor de la relación Q_{90}/Q_{10} varía de 0.16, 0.14, y 0.10 mm, con porcentaje de pendiente FDC de 139, 141 y 152.32 %; y con porcentaje de caudales base de 72%, 71% y 70% respectivamente, con variación del 1% de pasto y cultivo entre ellas.

El grupo 2 formado por microcuencas con su cobertura dominante es páramo (85 al 89% de cobertura de páramo). Entre ellas la variación de Q_{90}/Q_{10} no es representativa. Sin embargo, la variación de la pendiente FDC de 132 y 131 % con % Q_{base} de 72% y 73% para YA1 y YA2 respectivamente. En cambio, para TA1 posee 137% de pendiente FDC, con 70% de caudal base, con lo cual deducimos su menor capacidad de regulación de entre este subgrupo.

4.3 CORRELACIONES



La regresión lineal (R^2) entre las características de paisaje (morfometría y cobertura vegetal) y la respuesta hidrológica (indicadores hidrológicos) de las microcuencas y las subcuencas se muestran en la Tabla 20. Los coeficientes de correlación resaltados en negrita de esta tabla representan a las correlaciones R^2 superiores a 0.50, y los valores inferiores a éste, son considerados no relevantes y se presentan en el Anexo 2.

Previamente a la correlación se aplicó la estadística de los datos a través del software R, mediante la verificación de la normalidad de los datos con la prueba de Shapiro-Wilk y posteriormente la significancia estadística con la prueba ANOVA a los valores de la Tabla 20. De la prueba de Shapiro-Wilk resultó una normalidad para todos los datos y de la prueba de significancia ANOVA resultó estadísticamente significantes las correlaciones entre coeficiente de escorrentía con altitud y páramo; precipitación con bosque andino y pendiente de red hídrica. Las correlaciones no significantes probablemente se deban al corto de periodo de análisis de datos (3 años) y a la baja amplitud de variación entre los promedios de los mismos.

Tabla 20. Correlaciones entre índices hidrológicos y características morfométricas y biofísicas

	RC	P	Q10	Q35	Pmed FDC
S	-0.62	0.00	-0.11	-0.11	0.12
Ck	0.00	0.03	-0.52	-0.69	-0.55
Z	0.36	-0.37	-0.07	0.04	0.02
Cmin	0.52	-0.30	-0.03	-0.02	0.00
Pmed	0.00	0.36	0.25	0.54	0.15
Pr	-0.23	0.59	0.31	0.42	0.23
Dd	-0.48	0.00	-0.59	-0.32	-0.39
Tc	-0.58	0.00	-0.13	-0.18	0.02
Páramo	0.77	-0.62	0.02	0.11	0.00
Eucalipto_Pino	-0.36	0.00	-0.60	-0.43	0.18
Pasto_Cultivo	-0.77	0.31	-0.07	0.00	0.02
Bosque Andino	-0.19	0.75	0.22	0.50	0.12

S=área; Ck=coeficiente de compacidad; Z=altitud; Cmin= cota mínima; Pmed=pendiente media de la cuenca, Pr=pendiente de red hídrica; Dd=densidad de drenaje; Tc=tiempo de concentración; RC= coeficiente de escorrentía; P=precipitación; Q10= caudal de percentil 90; Q35=caudal de percentil 65; Pmed FDC= porcentaje de la pendiente de curva de descarga. Coeficientes resaltados en negrita representan valores de correlaciones relevantes. Coeficientes resaltados en gris representan valores estadísticamente significativos.

De las correlaciones presentadas en la Tabla 20, existen excepciones respecto a las microcuencas incluidas. Para las correlaciones con el coeficiente de escorrentía (RC) fueron



excluidas las microcuencas YA2 debido al corto periodo de datos de precipitación y a GB1 por ser una microcuena regulada por obras civiles. De las correlaciones que confieren a la densidad de drenaje (Dd) se excluyeron a TA1 y YA1 ya que al ser las microcuencas con mayor porcentaje de cuerpos de agua existe estrecha relación con la Dd, en contraste a las demás microcuencas que un valor mayor de Dd es atribuido a un mayor porcentaje de cobertura de pasto-cultivo y eucalipto-pino. Además, para las correlaciones en las que interviene eucalipto_pino, pasto_cultivo y bosque andino, se omiten las microcuencas con la ausencia de las mismas. Por último, para las relaciones con el coeficiente de compacidad (Ck) se consideraron solamente a las microcuencas caracterizadas como oval-alargadas, debido a que el grupo de oval – redondas tiene un rango de amplitud de valores de Ck muy corto, lo que provoca distorsión de las correlaciones.

5. DISCUSIÓN

5.1 RENDIMIENTO HÍDRICO

Los parámetros morfométricos que describen la mayor parte de la variabilidad del rendimiento hídrico de estas microcuencas son: altitud, área(S), coeficiente de compacidad (Ck), tiempo de concentración (Tc). Por otro lado, los indicadores de rendimiento hídrico más representativos son: precipitación, coeficiente de esorrentía (RC), evapotranspiración real (Etr) y caudales altos (caudal máximo, percentil 65 o Q35).

5.1.1 Precipitación

El clima de las microcuencas de estudio está influenciado por el régimen del Pacífico que llega del oeste y las masas de aire continentales del lado Amazónico que provienen del Atlántico (Vuille et al., 2000). Como resultado de la influencia de estos dos regímenes, la precipitación anual resultante es ligeramente bimodal (con una estación más seca entre julio a septiembre y otra menos seca en diciembre), meses coincidentes del estudio de Buytaert et al. (2005). En general se observa una precipitación constante pero menos intensa durante el



resto de periodo. La precipitación registrada anualmente en las microcuencas de estudio varían entre 775 y 1,218 mm año⁻¹, valores similares con el estudio realizado por Célleri et al. (2007) en la cuenca de Paute, con el valor más bajo de 660 mm en el centro de la cuenca y 1,400 mm para elevaciones mayores de 3,000 m.

La variabilidad de la lluvia de la cuenca de río Paute está determinada a gran escala por un efecto altitudinal y latitudinal y a pequeña escala la precipitación está influenciada por el viento, fuertes pendientes y accidentada topografía Buytaert et al. (2006b). Esto se evidencia en la relación existente entre la pendiente de la red hídrica y la precipitación con R^2 de 0.60, mostrando que la lluvia incrementa con la pendiente. Además, se encontró que relación entre el bosque andino y la precipitación, presentando un coeficiente de correlación R^2 de 0.75, ello es atribuible debido a que los bosques en laderas de montaña pueden interceptar cantidades considerables de agua de las nubes que provienen de altitudes inferiores y con ello más nubes están disponibles para la precipitación orográfica (De Bièvre et al., 2006).

El estudio de Célleri et al. (2007) demuestra que para esta región se tiene influencia de la combinación de la orografía compleja y la alta variabilidad de la precipitación espacial. En este sentido, para el presente estudio tampoco fue posible definir una relación única entre la precipitación media anual y la elevación para toda la subcuenca. Sin embargo, el análisis de estacionalidad reveló una relación lineal positiva entre el índice de estacionalidad y la altura con R^2 de 0.65 (Figura 4), es decir se evidencia que la estacionalidad es menos pronunciada en las elevaciones 3,300 a 3,800 msnm, lo que confirma que en las cuencas de páramo la lluvia está distribuida durante todo el año de una forma bastante uniforme, siendo esta la principal fuente de agua para las cuencas andinas (Buytaert et al., 2006a).

5.1.2 Coeficiente de escorrentía

Los valores de coeficiente de escorrentía (RC) para las microcuencas de estudio se encuentran entre 0.53 y 0.71, en concordancia con estudios de Crespo et al. (2011) y



Mosquera et al. (2015). Varios factores, incluidos el tipo de suelo y vegetación, contribuyen a la generación de escurrimiento relativamente alta de los paisajes de páramo.

En general, encontramos que cuanto mayor es el porcentaje de páramo que cubre a las microcuencas, mayor es el coeficiente de escorrentía. Eso se evidencia en la Tabla 20, ya que existe correlación positiva para páramo ($R^2 = 0.77$) y negativa para pino-eucalipto, pasto-cultivo. Por lo tanto, se muestra la mayor producción hídrica del páramo respecto a las demás coberturas.

La producción hídrica (RC) por parte del ecosistema páramo muestra también relación con el tamaño de las microcuencas, como lo evidencia la Tabla 20 con la correlación inversa ente el coeficiente de escorrentía y área ($R^2 = - 0.62$), ello puede deberse a que las microcuencas de estudio de mayor tamaño son las que poseen mayor porcentaje de coberturas como pasto-cultivo y pino-eucalipto, siendo estas coberturas características de un rendimiento hídrico menor al de coberturas como bosque andino y páramo. Como se demuestra en la sección 4.1.1, las coberturas de eucalipto-pino y pasto-cultivo incrementan desde un 4.14 % hasta un máximo del 19.25% del área de microcuenca total. Lo cual también tiene estrecha relación con la influencia de la altitud sobre el rendimiento hídrico (Tabla 20), con la correlación positiva entre Cmin y RC ($R^2 = 0.52$), esto se explica ya que como se citó en la Tabla 10, a mayores altitudes existe mayor porcentaje de cobertura de páramo y por ende mayor rendimiento hídrico.

Existe una relación directa entre el tamaño de microcuencas (Tabla 13) y los valores RC de la Tabla 17, y en adición con la relación inversa ente RC y tiempo de concentración (Tc) mostradas en la Tabla 20. Por lo tanto, se deduce que: microcuencas de tamaño intermedio, en promedio poseen RC de 0.61 en un tiempo de concentración (Tc) de tipo lento (2 h), en cambio microcuencas de tamaño pequeño, con promedio de RC de 0.65 en un Tc de tipo moderado (1 h). Los estudios Cammeraat (2002) y Cerdan et al. (2004) corroboran este hecho mencionando que esto sucede particularmente en las cuencas alteradas.



5.1.3 Evapotranspiración

El estudio de Llambí et al. (2012) mencionan que las cuencas de páramo presentan un mayor rendimiento hídrico (60-70%) que las cuencas ubicadas en zonas bajas, esto se debe a la baja evapotranspiración y las características particulares que posee la vegetación paramera, ocasionando un gran excedente de agua que alimenta los ríos que descienden hacia las regiones costeras y a la cuenca Amazónica (Buytaert et al., 2010). En nuestro caso de estudio esto sucede con las microcuencas del grupo 1 y 2 se diferencian por el porcentaje de páramo en ellas, no obstante, también varían por el porcentaje de pino-eucalipto (Tabla 9). El grupo 1 presenta 1.78% de pino-eucalipto, en cambio, el grupo 2 posee 0.78%. Por lo tanto, la menor evapotranspiración real (Etr) del grupo 2 mostrados en la Tabla 17 (1.41 mm d^{-1}), muestra el menor consumo de agua por parte del páramo, en comparación al grupo 1 (1.44 mm d^{-1}) con predominancia de cobertura de pino-eucalipto. Las mayores pérdidas por evapotranspiración de pino para la zona sur andina ha sido bien documentado en Hedberg (1992), Buytaert et al. (2010) y Llambí et al. (2012).

Las mayores pérdidas por evapotranspiración de pino también se evidencian en las correlaciones entre caudales altos y moderados (Q35, Q10) con la cobertura vegetal (Tabla 20). Existe correlación negativa entre Q10 y cobertura de eucalipto-pino y positiva entre Q35 y cobertura de bosque. En este sentido según Buytaert et al. (2008) mencionan que los bosques nativos tienen un consumo de agua más bajo que las plantaciones de pino, debido a que no hay diversidad de vegetación y es probable que los pinos tengan menor eficiencia del uso del agua debida a una menor adaptación metabólica.

5.1.4 Caudales altos

El caudal alto Q35 posee correlación positiva con la pendiente media de la cuenca (Tabla 20), es decir fueron registrados flujos más altos a partir de las microcuencas que tienen los porcentajes de pendientes más pronunciadas. Por lo que, microcuencas con pendientes promedio de 22% poseen valores de Q35 de 1.72 mm d^{-1} , a diferencia de las microcuencas con promedio de porcentaje 18% y con Q35 de 1.52 mm d^{-1} . Por lo tanto como menciona



Molina et al. (2007), la pendiente junto con la combinación de lluvias permanentes y suelos delgados hace que el flujo superficial sea a menudo un componente importante de la generación de escorrentía en estos entornos.

Con respecto a la relación de la pendiente con la generación de caudales altos, Llambí et al. (2012) mencionan que la pendiente influye en el desarrollo de los suelos, debido a que en mayores pendientes los suelos son más delgados, consecuencia principalmente a que en una superficie inclinada actúa la fuerza de la gravedad sobre el material formador del suelo, lo que favorece el arrastre de materiales hacia las partes bajas y el agua tiene menos oportunidades para infiltrarse al interior del suelo. Así mismo, mientras menor es la pendiente, el agua puede acumularse más fácilmente, lo que permite que el suelo posea una mayor humedad y mayor profundidad.

Además, Q35 posee correlación inversa con Ck (coeficiente de compacidad) ($R^2 = -0.69$). Es decir, a mayor Ck (distorsión de la forma de la cuenca a tendencia alargada), menor producción de caudales altos; e indirectamente mayor Tc (tendencia a concentrar menos volumen de escurrimiento disminuyendo probabilidad de inundaciones). Ejemplo de un menor valor de caudales altos por la influencia de la forma de la cuenca se muestra al retomar la sección 4.1.3, en la caracterización de las microcuencas de estudio (Tabla 13) y con los valores de Q35 de la Tabla 18 se deduce: Tc de tipo moderado (1.31 h) para microcuencas con forma redonda-oval resultan con un Q35 promedio de 1.66 mm d⁻¹ y para las microcuencas de forma rectangular-oblonga Tc es de tipo lento (1.65 h) y con un promedio de Q35 de 1.59 mm d⁻¹.

5.2 REGULACIÓN HÍDRICA

Los parámetros morfométricos que describen la mayor parte de la variabilidad de la regulación hídrica de estas microcuencas son: altitud, coeficiente de compacidad (Ck), pendiente media de la cuenca, tiempo de concentración (Tc), relación de elongación y densidad de drenaje (Dd). Por otro lado, los indicadores de regulación hídrica más



representativos: porcentaje de caudal base (% Qbase) y porcentaje de la pendiente de curva de duración de caudal (FDC), relación Q90/Q10 y caudal máximo (Qmax).

5.2.1 Caudal Base

Los valores de porcentaje de caudal base de las microcuencas de estudio varían de 69.59% a 75.24% del total del flujo, en concordancia con Crespo et al. (2011).

La regulación hídrica de las microcuencas es influenciada principalmente por cobertura vegetal y los suelos; tal y como lo evidencia De Bièvre et al. (2006). La microcuenca YB1 es un ejemplo de la influencia de la cobertura vegetal en la regulación hídrica, esta subcuenca resultó ser la menos regulada de las microcuencas, registrando el mayor porcentaje (después de GB1) de coberturas alteradas (4% eucalipto-pino y 4% infraestructura).

En cuanto a la influencia de los suelos, Farley et al. (2004) mencionan que la conversión de pajonales a plantaciones de pinos en suelos volcánicos reduce significativamente la capacidad de retención de agua de los Andosoles. Lamentablemente para el presente estudio no pueden ser correlacionados los tipos de suelos con los indicadores hidrológicos, esto debido a que la información proporcionada no tiene la resolución espacial adecuada, a pesar de ello en la Tabla 12 se muestra estrecha relación entre coberturas de páramo con Andosoles y coberturas de pasto-cultivo, eucalipto-pino y bosque andino con Inceptisoles y Entisoles.

El efecto del cambio de uso de suelo, puede ser considerado en la relación inversa mostrada en la Tabla 20 entre la densidad de drenaje (Dd) y caudal alto (Q10). Esto se explica a que con excepción de las microcuencas TA1 y YA1, un valor mayor de densidad de drenaje (Dd) se atribuye a microcuencas con mayor porcentaje de cobertura de pasto-cultivo y eucalipto-pino. En teoría, una alta Dd puede acelerar la respuesta hidrológica (a través de una mayor ruta de escorrentía), sin embargo, la correlación negativa ($R^2 = -0.59$) entre Dd y Q10, evidencian que la alta densidad de drenaje está ralentizando la escorrentía (mejor drenaje del suelo, mayor infiltración). Este principio fue evidenciado en Buytaert et al. (2005) ya que



demuestra la buena infiltración ($2-200 \text{ mm h}^{-1}$) y alta capacidad de almacenamiento de agua (hasta más de 40% en volumen) de los suelos característicos de esta zona sur andina.

Por último, la subcuenca de Machángara (GB1) posee el mayor porcentaje de caudal base (Tabla 19), de RC y el valor más alto para Q_{90}/Q_{10} , con lo cual se explica su alta capacidad de regulación. Sin embargo, su cobertura en comparación con las otras subcuencas de estudio es muy alterada, al tener un mayor porcentaje de cultivo y pasto (15%), el 4% de eucalipto-pino y el menor porcentaje el páramo (64%), esto también se muestra con el mayor valor de evapotranspiración (1.7 mm d^{-1}). Por lo tanto, estas características de caudal base pueden deberse a que el almacenamiento de agua está siendo regulado por las represas Chanlud y El Labrado a cargo de ELEAUSTRO, que tiene como responsabilidad garantizar un caudal ecológico en su curso, disminuir los picos de las crecidas y asegurar la vida de todos los organismos asociados al río y de la población asentada a sus orillas (Borrero, 2015).

5.2.2 Pendiente de curva de descarga (Pmed FDC) y relación Q_{90}/Q_{10}

Buytaert et al. (2007); Cisneros et al., (2007); Crespo et al. (2010) mencionan que un aumento en la pendiente de la curva de duración de caudal (Pmed FDC) y reducción de la relación Q_{90}/Q_{10} , significa disminución en la capacidad de amortiguamiento del suelo. Ejemplo de ello se tiene a las microcuencas GB1, TB1, TM3, YA2 y TM2 que poseen en promedio 135 % de pendiente de la curva FDC, 0.17 de relación Q_{90}/Q_{10} y 74% de caudal base. En cambio, microcuencas YA1, YB1, TM4 y TM1 poseen en promedio 140 % de pendiente de la curva FDC, 0.14 de relación Q_{90}/Q_{10} con 71% de caudal base.

En cuanto a la relación con los parámetros morfométricos y la capacidad de regulación, en la Tabla 20 se muestra la relación inversa entre Pmed FDC y C_k ($R^2 = -0.55$). En otras palabras, a mayor C_k (forma alargada de la cuenca), menor valor de pendiente de FDC (mayor regulación). Evidencia de ello, también se puede referir a la interpretación morfométrica (Tabla 13) y a los porcentajes de caudal base (Tabla 19) deduciendo lo siguiente: microcuencas de forma redonda-oval poseen en promedio 72 % de caudal base, un T_c de tipo



moderado (1.28 h) y 143% de pendiente FDC. Así también, el promedio de caudal base para las microcuencas de forma rectangular-oblonga es de 73% con T_c de tipo lento (1.75 h) y 133% de pendiente FDC.

La influencia de la forma de la cuenca y la saturación de la misma, sobre el rendimiento y la regulación hídrica se muestra en las microcuencas TA1 y YA1:

TA1 y YA1 poseen altos porcentajes de páramo, con pendiente de tipo fuertemente ondulado, ubicadas en las elevaciones más altas y con los valores más altos de porcentaje de cuerpos de agua (5 y 7%). A pesar de sus semejanzas, valores RC y %Qbase varían entre sí. La microcuenca TA1 tiene 3% más de escorrentía y 2% menos de caudal base que YA1. Esta diferencia se le atribuye principalmente a que esta microcuenca es de forma oval redonda, de tamaño caracterizado como muy pequeña (13 km²), con alta densidad de drenaje de 1.83 km km⁻² (7% de coberturas de cuerpos de agua), con tiempo de concentración de tipo rápido y con mayor porcentaje de pendiente FDC (137%). Mientras que, YA1 de tamaño pequeño (45 km²), de forma alargada, tiene una menor Dd (1.16 km km⁻²), posee 5% de cuerpos de agua, con un tiempo de concentración de tipo moderado y con menor pendiente FDC (132 %). Por lo tanto, al igual que en el estudio de Mosquera et al. (2015), se justifica el alto rendimiento y menor regulación de TA1 debido a un mayor porcentaje coberturas saturadas y con ello el aumento de la cantidad de descarga específica, ya que la capacidad de almacenamiento disponible disminuye con el aumento del áreas saturadas.

5.2.3 Caudal máximo

Martínez et al. (2017) indican que la pérdida de la capacidad de regulación de la cuenca limita la posibilidad de controlar eventos máximos de precipitaciones y, consecuentemente de posibles inundaciones. Evidencia de esto es la subcuenca de Yanuncay (YB1), que a pesar de poseer la menor precipitación anual promedio de 845.58 mm año⁻¹, en comparación con el río Tomebamba (1,008.61 mm año⁻¹) y Machángara (1,218.43 mm año⁻¹), históricamente han registrado repentinas crecidas del río Yanuncay, llegando a desbordarse e inundar zonas



aledañas según Vallejo (2014). Además, considerando que su caudal disminuye notoriamente en épocas secas, a un valor medio de 0.47 mm mes^{-1} . Por otro lado la menor variación entre caudales máximos y mínimos explican una mejor regulación, como es el caso de YA2, microcuenca con alto porcentaje de páramo (89%) y caudal máximo de 9.56 mm d^{-1} y mínimo de 0.21 mm d^{-1} , demuestra que las cuencas de páramo poseen los caudales más estables a lo largo del año (Martínez et al., 2017).

6. CONCLUSIÓN

El análisis de rendimiento hidrológico y su relación con parámetros biofísicos y morfométricos en las microcuencas altas del río Paute condujo a las siguientes conclusiones:

Para las microcuencas estudiadas, los parámetros morfométricos que describieron la mayor parte de la variabilidad del rendimiento hídrico fueron: altitud, área, coeficiente de compacidad, pendiente media de la cuenca, pendiente de la red hídrica, tiempo de concentración y densidad de drenaje; en este mismo sentido, los indicadores de rendimiento hídrico más representativos fueron: precipitación, coeficiente de escorrentía, caudal máximo, evapotranspiración real, percentil 65 (Q35) y percentil 90 (Q10); mientras que los indicadores de regulación hídrica fueron: porcentaje de caudal base, relación $Q90/Q10$ y pendiente de curva de duración de caudal. Además, la variabilidad observada en la generación de escorrentía también se explicó por una combinación de la cobertura vegetal y el uso del suelo.

Las microcuencas de estudio varían con la altitud y esta tiene efecto sobre las precipitaciones. El efecto de la altitud sobre la precipitación no se muestra claramente como una relación lineal, ya que la precipitación está determinada por accidentada topografía y particularmente por la pendiente media de la cuenca y pendiente de la red hídrica. Sin embargo, el análisis de estacionalidad de la precipitación presenta una relación inversa con altura, lo cual evidencia valores de índice de estacionalidad menos pronunciados a mayores elevaciones.



La producción hídrica tiene relación inversa con el tamaño de las microcuencas debido a que coberturas de eucalipto-pino y pasto-cultivo se incrementan con el área de cuenca, y con ello, disminuye la producción de agua. Esto principalmente debido a bajo consumo evaporativo del páramo en comparación a los demás tipos de coberturas. Por lo tanto, altos valores del índice de rendimiento hídrico fueron atribuidos a microcuencas con mayor porcentaje de páramo. Es así que al páramo se lo reconoce como la principal fuente de agua para las cuencas andinas.

La producción hídrica representada por flujos altos (Q35), tiene influencia de la topografía accidentada de las microcuencas, es así que se registran mayores flujos altos en presencia de porcentajes de pendientes más pronunciadas. Otro parámetro importante es la forma de la cuenca, esta influye en la producción y regulación hídrica. En este sentido, las microcuencas más alargadas son menos propensas a acumular volúmenes altos de escorrentía en tiempos de concentración cortos, y con tendencia a generar mayor caudal base.

El flujo base sostenido de las cuencas analizadas es atribuible a los tipos de suelos presentes en las mismas. En este contexto encontramos estrecha relación entre coberturas de páramo con Andosoles y a coberturas de pasto-cultivo, eucalipto-pino y bosque andino con Inceptisoles y Entisoles. Sin embargo, coberturas de pasto-cultivo, eucalipto-pino y bosque andino tienen menor porcentaje en comparación el páramo, por lo que el efecto del cambio de uso de suelo no es tan relevante en la pérdida de la capacidad de regulación de las microcuencas. Evidencia de ello, al incrementarse la densidad de drenaje se ralentiza la escorrentía debido a su mejor drenaje del suelo y mayor infiltración de los Andosoles, suelos predominantes de la zona sur andina. Además, los Andosoles tienen una porosidad muy alta, y cuando existen precipitaciones fuertes, la mayoría del agua circula directamente hacia el subsuelo, lo que justificaría los altos porcentajes de caudal base obtenidos en las 10 microcuencas.

En cuanto a los índices representativos de la regulación hídrica, las microcuencas con mayor porcentaje de pendiente de la curva de descarga (FDC) y menor valor de relación Q90/Q10



poseen mayor capacidad de regulación y por ende mayor porcentaje de caudal base. Sin embargo, si se llegase a perder la capacidad de regulación de la cuenca, se limita la posibilidad de controlar eventos máximos de precipitaciones y, consecuentemente, de posibles inundaciones. La cuenca de Yanuncay es un ejemplo de ello, esta subcuenca tiene un gran porcentaje de coberturas alteradas y que, a pesar de poseer la menor precipitación anual en comparación con el río Tomebamba y Machángara, históricamente ha registrado repentinas crecidas del río Yanuncay.

Finalmente, al identificar las principales características de paisaje que influyen en la generación de escurrimiento en las microcuencas altas de la cuenca de Paute, nuestro estudio contribuye de manera importante al esfuerzo por preservar y manejar de manera sostenible los ecosistemas de páramo y bosque andino, que son críticos para las necesidades de suministro constante de agua de la región.

7. RECOMENDACIONES

El control de calidad de datos realizado en la sección 3.2.2 reveló la necesidad de mejorar el monitoreo de la red de estaciones pluviométricas, meteorológicas y especialmente hidrológicas, así como incrementar la densidad de estaciones, con el objetivo de obtener datos más reales y mejorar la comprensión del ciclo de agua de las cuencas de montañas para, en investigaciones futuras, poder abordar vínculos entre la variabilidad a gran escala (por ejemplo, Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), la interpretación de las causas dinámicas de la estructura / variación de la precipitación, evapotranspiración y escorrentía a escala regional.

El índice de estacionalidad determinado indica únicamente la variación de precipitación para el periodo de estudio, sin embargo, para determinar diferentes regímenes de precipitación que se desarrollan en las subcuencas analizadas, es necesario continuar con mediciones de este índice durante los siguientes años, esto es, por lo menos contar con un registro de 30 años (Célleri et al., 2007).



La escala información cartográfica de tipos de suelo en este estudio (1:25,000) no fue la más apropiada debido al nivel de detalle de la esta y con la existencia de la clase “no aplicable”. Por esto, para realizar un mejor análisis de la influencia de los tipos de suelos en la hidrología de las microcuencas es necesario una escala espacial con mayor detalle y con una mejor descripción de los tipos de suelos.

El análisis de rendimiento hidrológico y su relación con parámetros biofísicos y morfométricos en las microcuencas altas del río Paute, mostró una dependencia de la variable de altitud, debido a la estrecha relación que tiene esta con la cobertura vegetal. Por lo que para un mejor análisis y entendimiento de la relación entre las variables se recomienda descartarla en estudios futuros.

En cuanto al método de filtrado de Lyne-Hollick es un método de filtrado digital recursivo ampliamente utilizado (Ladson et al., 2013; Tan et al., 2009), sin embargo este filtro tiene sus limitaciones debido a que simplemente filtra las señales de alta frecuencia, que carece de cualquier base física (Ladson et al., 2013; Nathan & McMahon, 1990). Para superar estas limitaciones los resultados del estudio en Zhang et al. (2017) sugieren que los métodos de filtrado digital funcionan mejor cuando la constante de recesión es estimada para cada cuenca por el método Automatic Baseflow Identification Technique (ABIT), creado por Cheng et al. (2016) y basado en la implementación de algoritmos. Si se requiere aún más precisión Teutschbein et al. (2015) sugieren que siempre que sea posible α debe calibrarse en función de los experimentos de trazadores.

Sin embargo, la aplicación de ABIT o de los métodos basados en trazadores consumen más recursos por lo que pueden ser considerados para futuros estudios con el fin de mejorar el conocimiento sobre la hidrología Andina.



8. BIBLIOGRAFÍA

- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., Smith, M., 2006. Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. food & agriculture org.
- A]lvarez, o., vélez, j., poveda, g., 2008. xxiii Congreso latinoamericano de hidráulica cartagena de indias colombia, septiembre 2008 incertidumbre asociada con el balance hídrico de largo plazo 15.
- Aranda, s., 1996. Desarrollo metodológico para la evaluación del riesgo de erosión hídrica en el área mediterránea utilizando técnicas de teledetección y GIS 259.
- Barrera, v., Alwang, j., Cruz, e., 2010. Experiencias de manejo integrado de recursos naturales en la subcuenca del río Chimbo, Ecuador.
- Borrero, A., 2015. Histórico consejo de la cuenca del Machángara.
- Bruijnzeel, L., 2004. Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the trees? Agriculture, Ecosystems & Environment, Environmental Services and Land Use Change: Bridging the Gap between Policy and Research in Southeast Asia 104, 185–228. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2004.01.015>
- Buytaert, W., 2004. Properties of the soils of the south Ecuadorian páramo and the impact of land use changes on their hydrology | Titel. Leuven : Katholieke Universiteit Leuven.
- Buytaert, W., Célleri, R., De Bièvre, B., Cisneros, F., 2010. Hidrología del páramo andino: propiedades, importancia y vulnerabilidad.
- Buytaert, W., Célleri, R., De Bièvre, B., Cisneros, F., Wyseure, G., Deckers, J., Hofstede, R., 2006a. Human impact on the hydrology of the Andean páramos. Earth-Science Reviews 79, 53–72. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.06.002>
- Buytaert, W., Célleri, R., Willems, P., De Bièvre, B., Wyseure, G., 2006b. Spatial and temporal rainfall variability in mountainous areas: A case study from the south Ecuadorian Andes. Journal of Hydrology 329, 413–421. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.02.031>
- Buytaert, W., De Bièvre, B., Célleri, R., Cisneros, F., Wyseure, G., Deckers, S., 2008. Comment on “Human impacts on headwater fluvial systems in the northern and central Andes” (Carol P. Harden, Geomorphology 79, 249–263). Geomorphology 96, 239–242. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.04.003>
- Buytaert, W., De Bièvre, B., Iñiguez, V., 2007. The effects of afforestation and cultivation on water yield in the Andean páramo. Forest Ecology and Management. <https://doi.org/doi.org/10.1016/j.foreco.2007.06.035>
- Buytaert, Wouter, Iñiguez, V., Bièvre, B.D., 2007. The effects of afforestation and cultivation on water yield in the Andean páramo. Forest Ecology and Management, Planted Forests and Water 251, 22–30. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.06.035>
- Buytaert, W., Iñiguez, V., Célleri, R., De Bièvre, B., Wyseure, G., Deckers, J., 2006c. Analysis of the Water Balance of Small Páramo Catchments in South Ecuador, in: Krecek, J., Haigh, M. (Eds.), Environmental Role of Wetlands in Headwaters. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 271–281. https://doi.org/10.1007/1-4020-4228-0_24
- Buytaert, W., Wyseure, G., De Bièvre, B., Deckers, J., 2005. The effect of land-use changes on the hydrological behaviour of Histic Andosols in south Ecuador. Hydrological Processes 19, 3985–3997. <https://doi.org/10.1002/hyp.5867>
- Cabrera, E., 2009. EL COEFICIENTE DE CORRELACION DE LOS RANGOS DE SPEARMAN CARACTERIZACION.



- Cammeraat, L., 2002. A review of two strongly contrasting geomorphological systems within the context of scale. *Earth Surface Processes and Landforms* 27, 1201–1222. <https://doi.org/10.1002/esp.421>
- Campos, A., 1992. *Proceso del Ciclo Hidrológico*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. San Luis Potosí, México, pp. 22–23.
- Cantú, I., 2005. Pérdidas por intercepción de la lluvia en tres especies de matorral submontano. Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Célleri, R., De Bièvre, B., Iñiguez, V., 2004. Efectos de la cobertura vegetal en la regulación hidrológica de microcuencas de Páramo.
- Célleri, R., De Bièvre, B., Ochoa, B., Villacis, M., 2013. Guía metodológica para el monitoreo hidrológico de ecosistemas Andinos.
- Célleri, R., Feyen, J., 2009. The Hydrology of Tropical Andean Ecosystems: Importance, Knowledge Status, and Perspectives. *Mountain Research and Development* 29, 350–355. <https://doi.org/10.1659/mrd.00007>
- Célleri, R., Willems, P., Buytaert, W., Feyen, J., 2007. Space–time rainfall variability in the Paute basin, Ecuadorian Andes. *Hydrol. Process.* 21, 3316–3327. <https://doi.org/10.1002/hyp.6575>
- Centro de Altos Estudios en Geomática, 2017. *Sistemas de información geográfica aplicado al manejo y gestión de cuencas*.
- Cerdan, O., Bissonnais, Y., Govers, G., Lecomte, V., van Oost, K., Couturier, A., King, C., Dubreuil, N., 2004. Scale effect on runoff from experimental plots to catchments in agricultural areas in Normandy. *Journal of Hydrology* 299, 4–14. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.02.017>
- Chen, Y., Liu, H., An, J., Görsdorf, U., Berger, F.H., 2014. A Field Experiment on the Small-Scale Variability of Rainfall Based on a Network of Micro Rain Radars and Rain Gauges. *J. Appl. Meteor. Climatol.* 54, 243–255. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-13-0210.1>
- Cheng, L., Zhang, L., Brutsaert, W., 2016. Automated Selection of Pure Base Flows from Regular Daily Streamflow Data: Objective Algorithm. *Journal of Hydrologic Engineering* 21, 06016008. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001427](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001427)
- Chow, V., 1964. *Handbook of applied hydrology; a compendium of water-resources technology*, in: *Handbook of Applied Hydrology; a Compendium of Water-Resources Technology*.
- Chow, V., Maidment, D., Mays, L., 1996. *Hidrología aplicada*. McGraw Hill.
- Chow, V., Maidment, D., Saldarriaga, J., Santos, G., 1994. *Hidrología Aplicada - [WWW Document]*. Scribd. URL <https://es.scribd.com/document/119943892/Hidrologia-Aplicada-Ven-Te-Chow> (accessed 4.21.18).
- Cisneros, F., Coello, C., Crespo, P., De Bièvre, B., Feyen, J., 2007. Análisis de curvas de duración general para determinar el grado de degradación de cuencas hidrográficas. In *Proceedings of the International Congress on Development, Environment and Natural Resources: Multi-level and Multi-scale Sustainability* 11–13.
- Coello, C., Cisneros, F., Feyen, J., 2008. Efecto de la cobertura vegetal en la respuesta hidrológica de cuencas hidrográficas.
- Condo, A., Juella, M., 2017. Análisis del comportamiento hidrológico y estado actual del recurso hídrico en las cuencas del río Tomebamba y Yanuncay durante el año 2015.
- Crespo, P., Célleri, R., Buytaert, W., Feyen, J., Iñiguez, V., Borja, P., De Bièvre, B., 2010. Land use change impacts on the hydrology of wet Andean páramo ecosystems. IAHS-AISH Publication.



- Crespo, P., Célleri, R., Buytaert, W., Ochoa, B., Cárdenas, I., Iñiguez, V., Borja, P., De Bièvre, B., 2014. Impactos del cambio de uso de la tierra sobre la hidrología de los páramos húmedos andinos.
- Crespo, P.J., Feyen, J., Buytaert, W., Bücker, A., Breuer, L., Frede, H., Ramírez, M., 2011. Identifying controls of the rainfall–runoff response of small catchments in the tropical Andes (Ecuador). *Journal of Hydrology* 407, 164–174. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.07.021>
- Cuesta, F., Becerra, M., 2009. Atlas de los Andes del norte y centro. Secretaría General de la Comunidad Andina, Lima, Peru.
- De Bièvre, B., Iñiguez, V., Buytaert, W., 2006. Hidrología del páramo. Importancia, propiedades y vulnerabilidad. *Investigaciones Biofísicas en el Páramo*.
- Delgado, O., Samaniego, P., 2016. Manual de Prácticas Extensión Hidrology.
- Domínguez, C., 2013. Evaluación de la gestión territorial de la cuenca del río Paute, estrategias y líneas de acción para superarlas.
- FAO, 2001. Lecture notes on the major soils of the world. *World Soil Resources Reports*.
- Farley, K., Jobbágy, E., Jackson, R., 2005. Effects of afforestation on water yield: a global synthesis with implications for policy, *Global Change Biology*. Wiley Online Library.
- Farley, K., Kelly, E., Hofstede, R., 2004. Soil organic carbon and water retention after conversion of grasslands to pine plantations in the Ecuadorian Andes. *Ecosystems* 7, 729–739.
- Fuentes, J., 2004. Analisis morfométrico de cuencas, caso de estudio el parque nacional Pico de Tancirato .
- Gaspari, F., Rodríguez, A., Senisterra, G., Denegri, G., Besteiro, S., Delgado, M., 2012. Caracterización morfométrica de la cuenca alta del río Sauce Grande, Buenos Aires, Argentina. *Morphometric characterization of the upper watershed of the Sauce Grande river, Buenos Aires, Argentina* 4.
- Geraldi, A., Piccolo, M., Gerardo, M., 2010. Delimitación y estudio de cuencas hidrográficas con modelos hidrológicos. *Investigaciones geográficas* 215–226.
- Goovaerts, P., 2000. Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall. *Journal of Hydrology* 228, 113–129. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00144-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00144-X)
- Gravelius, H., 1914. *Flusskunde: Grundriss des gesamten Gewässerkunde*. Goschenesche Verlagshandlung, Berlin. SI Munguía y AM Campo. pp. 38: 137-150.
- Gualpa, M., 2015. Caracterización morfométrica de áreas de drenaje de las estaciones hidrológicas de la red de ETAPA EP.
- Gualpa, M., 2014. Protocolo de Control de Calidad de Datos Hidrológicos Para Ecosistemas Andinos.
- Guzmán, V., León, A., 2012. Impacto de la calidad de datos sobre el cierre del balance hídrico en cuencas de páramo y bosques (Mazar y Soldados).
- Haan, C., 2002. *Statistical methods in hydrology*, 2nd ed. ed. Iowa State Press, Ames :
- Hedberg, O., 1992. Afroalpine vegetation compared to páramo: convergent adaptations and divergent differentiation. Academic Press, London.
- Horton, R., 1945. EROSIONAL DEVELOPMENT OF STREAMS AND THEIR DRAINAGE BASINS; HYDROPHYSICAL APPROACH TO QUANTITATIVE MORPHOLOGY. *GSA Bulletin* 56, 275–370. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1945\)56\[275:EDOSAT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1945)56[275:EDOSAT]2.0.CO;2)
- Ibañez, S., Gisber, J., Moreno, H., 2011. Inceptisoles.
- Iñiguez, V., Borja, P., Crespo, P., Cisneros, F., 2008. Importancia de la hidropedología en la determinación de procesos hidrológicos a escala de ladera en zonas de páramo. Presented at the de XI Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo, Quito.



- Iñiguez, V., Morales, O., Cisneros, F., Bauwens, W., Wyseure, G., 2016. Analysis of the drought recovery of Andosols on southern Ecuadorian Andean páramos. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 20, 2421–2435. <https://doi.org/10.5194/hess-20-2421-2016>
- Jackson, R., Jobbágy, E., Noretto, M., 2009. Ecohydrology in a human-dominated landscape. *Ecohydrology* 2, 383–389. <https://doi.org/10.1002/eco.81>
- Jiménez, F., 2005. El bosque como regulador del ciclo hidrológico.
- Jobbágy, E., Noretto, M., Santoni, C., Baldi, G., 2008. El desafío ecohidrológico de las transiciones entre sistemas leñosos y herbáceos en la llanura Chaco-Pampeana. *Ecología austral*.
- Jobbágy, E., Noretto, M., Villagra, P., Jackson, R., 2011. Water subsidies from mountains to deserts: their role in sustaining groundwater-fed oases in a sandy landscape. *Ecol Appl* 21, 678–694.
- Juen, I., Kaser, G., Georges, C., 2007. Modelling observed and future runoff from a glacierized tropical catchment (Cordillera Blanca, Perú). *Global and Planetary Change, Mass Balance of Andean Glaciers* 59, 37–48. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.11.038>
- Ladson, A., Brown, R., Neal, B., Nathan, R., 2013. A Standard Approach to Baseflow Separation Using The Lyne and Hollick Filter. *Australasian Journal of Water Resources* 17, 25–34. <https://doi.org/10.7158/13241583.2013.11465417>
- Llambí, L., Soto Werschitz, A., Célleri, R., Borja, P., 2012. Ecología, hidrología y suelos de páramos: Proyecto Páramo Andino.
- Lyne, V., Hollick, M., 1979. Stochastic time-variable rainfall-runoff modelling, in *Proceedings of the Hydrology and Water Resources Symposium*. Inst of Eng. Natl. Conference Publ., Perth, Australia. 79/10, 89–92.
- Maderey, E., 1970. Características físicas de la cuenca del Río Tizar. *Investigaciones Geográficas* 1. <https://doi.org/10.14350/rig.58844>
- Maderey, R., 2005. Principios de Hidrogeografía. Estudio Del Ciclo Hidrológico, Geografía para el siglo XXI, Primera. ed, Serie de textos universitarios. UNAM.
- Martínez de Azagra, A., 2006. Método de los coeficiente de escorrentía: Mauco Generalizado.
- Martínez, E., Coello, C., Feyen, J., 2017. Análisis comparativo del comportamiento de la escorrentía de tres microcuencas andinas con diferente régimen de precipitación y cobertura vegetal. *Maskana. Revista Científica*. <https://doi.org/10.18537/mskn.08.01.10>
- Molina, A., Govers, G., Vanacker, V., Poesen, J., Zeelmaekers, E., Cisneros, F., 2007. Runoff generation in a degraded Andean ecosystem: Interaction of vegetation cover and land use. *CATENA, Soil Water Erosion in Rural Areas* 71, 357–370. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2007.04.002>
- Molina, A., Vanacker, V., Balthazar, V., Mora, D., Govers, G., 2012. Complex land cover change, water and sediment yield in a degraded Andean environment. *Journal of Hydrology* 472–473, 25–35. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.09.012>
- Mosquera, G.M., Lazo, P.X., Célleri, R., Wilcox, B.P., Crespo, P., 2015. Runoff from tropical alpine grasslands increases with areal extent of wetlands. *CATENA* 125, 120–128. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.10.010>
- Myers, N., Mittermeier, R.A., Mittermeier, C.G., da Fonseca, G.A.B., Kent, J., 2000. Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature* 403, 853–858. <https://doi.org/10.1038/35002501>
- Nahar, N., Govindaraju, R.S., Corradini, C., Morbidelli, R., 2004. Role of run-on for describing field-scale infiltration and overland flow over spatially variable soils. *Journal of Hydrology* 286, 36–51. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2003.09.011>



- Nathan, R.J., McMahon, T.A., 1990. Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses. *Water Resources Research* 26, 1465–1473. <https://doi.org/10.1029/WR026i007p01465>
- Ochoa, B., Buytaert, W., 2014. Regionalisation of hydrological indices to assess land-use change impacts in the Tropical Andes.
- Ochoa, B., Buytaert, W., De Bièvre, B., Célleri, R., Crespo, P., Villacís, M., Llerena, C., Acosta, L., Villazón, M., Guallpa, M., Gil-Ríos, J., Fuentes, P., Olaya, R., Viñas, P., Rojas, G., Arias, S., 2016. Human Impacts on the Hydrology of Tropical Andean Catchment. 4089. <https://dx.doi.org/10.1002/hyp.10980>
- Ochoa, B., Fitzimons, B., De Bièvre, B., 2012. Parámetros e indicadores hidrológicos para ecosistemas andinos.
- Padrón, R.S., Wilcox, B.P., Crespo, P., Célleri, R., 2015. Rainfall in the Andean Páramo: New Insights from High-Resolution Monitoring in Southern Ecuador. *J. Hydrometeor.* 16, 985–996. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-14-0135.1>
- Perrin, J., Bouvier, C., Janeau, J., Menéz, G., Cruz, F., 2001. Rainfall/runoff processes in a small peri-urban catchment in the Andes mountains. The Rumihurcu Quebrada., *Hydrological Processes*. Quito (Ecuador).
- Pizarro, R., Ramirez B, C., V, F., Pablo, J., 2003. Análisis comparativo de cinco métodos para la estimación de precipitaciones areales anuales en períodos extremos. *Bosque (Valdivia)* 24, 31–38. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002003000300003>
- Poulenard, J., 2000. Les sols des Páramos d'Équateur sur couverture pyroclastique : diversité, genèse et propriétés physiques. Nancy 1.
- Quichimbo, P., Tenorio, G., Borja, P., Cárdenas, I., Crespo, P., Célleri, R., 2012. Efectos sobre las propiedades físicas y químicas de los suelos por el cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo: páramo de Quimsacocha al sur del Ecuador. *Suelos Ecuatoriales*. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo Suelos Ecuatoriales, 138–153.
- Rudden, M., 1998. Principles of Geographical Information Systems. *Journal of Environmental Planning and Management*; Abingdon 41, 777.
- Schumm, S.A., 1956. EVOLUTION OF DRAINAGE SYSTEMS AND SLOPES IN BADLANDS AT PERTH AMBOY, NEW JERSEY. *GSA Bulletin* 67, 597–646. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1956\)67\[597:EODSAS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1956)67[597:EODSAS]2.0.CO;2)
- Tan, B., Lo, E., Shuy, E., Chua, L., Lim, W.H., 2009. Generation of Total Runoff Hydrographs Using a Method Derived from a Digital Filter Algorithm. *Journal of Hydrologic Engineering* 14, 101–106. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2009\)14:1\(101\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2009)14:1(101))
- Teutschbein C., Grabs T., Karlsen R. H., Laudon H., Bishop K., 2016. Hydrological response to changing climate conditions: Spatial streamflow variability in the boreal region. *Water Resources Research* 51, 9425–9446. <https://doi.org/10.1002/2015WR017337>
- Tobón, C., 2009. Los Bosques Andinos y El Agua, Serie investigación y sistematización. Serie investigación y sistematización Serie investigación y sistematización. Quito.
- Tomer, M.D., Schilling, K.E., 2009. A simple approach to distinguish land-use and climate-change effects on watershed hydrology. *Journal of Hydrology* 376, 24–33. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.07.029>
- UNESCO, 2006. Evaluación de los Recursos Hídricos. Elaboración del balance hídrico integral por cuencas hidrográficas.
- Vallejo, E., 2014. Análisis de las crecidas presentadas en los ríos Tarqui, Yanuncay y Tomebamba desde 1997 hasta 2011.



- Vanacker, V., Govers, G., Barros, S., Poesen, J., Deckers, J., 2003. The effect of short-term socio-economic and demographic change on landuse dynamics and its corresponding geomorphic response with relation to water erosion in a tropical mountainous catchment, Ecuador. *Landscape Ecol* 18, 1–15. <https://doi.org/10.1023/A:1022902914221>
- Verdugo, M., 2017. Análisis morfométrico de las microcuencas a las que pertenece el Bosque y Vegetación Protectora Aguarongo (BVPA), influencia en el comportamiento hidrológico.
- Viramontes, O., Escoboza, L., Pinedo, C., Pinedo, A., Reyes, V., Román, R., Pérez, A., 2007. Morfometría de la Cuenca San Pedro, Conchos, Chihuahua. *Tecnociencia Chihuahua* 1, 21–31.
- Vuille, M., Bradley, R., Keimig, F., 2000. Climate Variability in the Andes of Ecuador and Its Relation to Tropical Pacific and Atlantic Sea Surface Temperature Anomalies. *J. Climate* 13, 2520–2535. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2000\)013<2520:CVITAO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013<2520:CVITAO>2.0.CO;2)
- Zhang, J., Zhang, Y., Song, J., Cheng, L., 2017. Evaluating relative merits of four baseflow separation methods in Eastern Australia. *Journal of Hydrology* 549, 252–263. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.04.004>

9. ANEXOS

Anexo 1. Parámetros morfométricos de la subcuenca del río Tomebamba

UBICACIÓN DE LAS ESTACIONES			TM4	TM3	TM1	TM2	TB1	TA1
Parámetros de forma								
Descripción	Simbología	Unidad	Valor					
Área	S	km ²	230.36	73.05	299.61	53.67	321.22	13.2
Perímetro	Pm	Km	78.18	49.72	80.86	40.67	86.47	16.37
Coefficiente de Compacidad	Ck		1.45	1.64	1.32	1.57	1.36	1.27
Rectángulo Equivalente	l	Km	7.23	3.4	9.77	3.12	9.52	2.21
	L	Km	31.88	21.47	30.67	17.23	33.72	5.98
Factor de forma	Kf		0.23	0.16	0.32	0.18	0.28	0.37
Longitud de la cuenca	Lc	Km	21.4	16.71	23.57	14.99	27.23	5.09
Relación de elongación	Re		0.8	0.58	0.83	0.55	0.74	0.8
Parámetros relativos a la variación altitudinal								
Elevación de frecuencia media	Hmd	Msnm	3864.48	3774.39	3842.75	3818.76	3822.33	4079.06
Altura más frecuente	Hmf	Msnm	3935.83	3765.83	3918.33	3813.18	3889.17	4084.17
Altura media de la cuenca	Hm	Msnm	3749.99	3678.53	3713.8	3730.17	3661.41	4079.06
Pendiente media de la cuenca	Pmed	%	21.67	19.37	21.78	22.82	21.09	19.5
Características de la Red de Drenaje								
Longitud del curso principal	Lp	Km	5.49	13.93	7.85	12.46	11.75	1.942
Orden de corrientes	Oc	Unidad	5	3	5	3	5	3
Longitud de la red hídrica	Lh	Km	281.6	87.74	368.19	65.88	404.73	24.141
Pendiente promedio de la red hídrica	Pr	%	2.18	2.16	2.18	2.25	2.15	1.911
Densidad de drenaje	Dd	km/km ²	1.22	1.2	1.23	1.23	1.26	1.829
Frecuencia de corriente	Fc		2.04	1.92	2.01	2.11	2.02	4.242
Tiempo de concentración de Giandotti	Tc	Horas	1.41	1.14	1.66	0.98	1.85	0.342

TB1 = subcuenca Tomebamba, TA1= primera microcuenca alta de Tomebamba, TM1= primera microcuenca media de Tomebamba, TM2 = segunda microcuenca media de Tomebamba, TM3 = tercera microcuenca media de Tomebamba, TM4 = cuarta microcuenca media de Tomebamba.

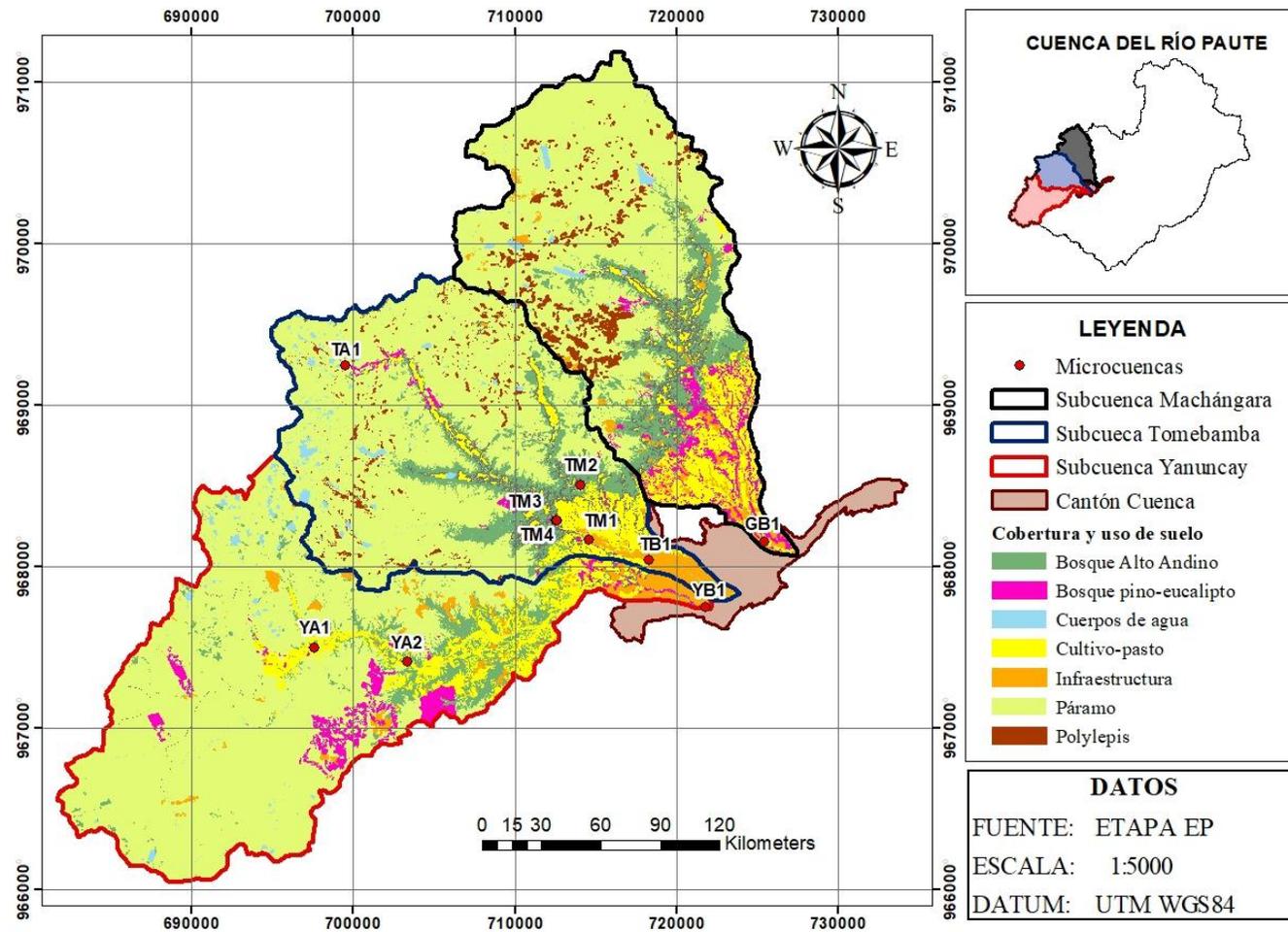


Anexo 2. Parámetros morfométricos de las subcuencas de Yanuncay y Machángara

UBICACIÓN DE LAS ESTACIONES		YA1	YB1	YA2	GB1	
		Parámetros de forma				
Descripción	Simbología	Unidad	Valor			
Área	S	km ²	45.76	414.82	308.73	322.18
Perímetro	Pm	km	40.68	135.3	98.38	96.83
Coefficiente de Compacidad o de Gravelious	Ck		1.7	1.87	1.58	1.52
Rectángulo Equivalente	l	km	2.58	6.82	7.39	7.97
Rectángulo Equivalente	L	km	17.77	60.83	41.8	40.45
Factor de forma	Kf		0.15	0.11	0.18	0.2
Longitud de la Cuenca	Lc	km	12.2	41.5	23.05	31.73
Relación de elongación	Re		0.63	0.55	0.86	0.64
Parámetros relativos a la variación altitudinal						
Elevación de frecuencia media (Hmd)	Hmd	msnm	3959.1	3795.82	3821.73	3751.98
Altura más frecuente	Hmf	msnm	4018.34	3814.17	3725.2	3853.24
Altura media de la cuenca	Hm	msnm	3881.05	3641.33	3761.06	3553.87
Pendiente media de la cuenca	Pmed	%	22.07	15.3	13.75	20.24
Características de la Red de Drenaje						
Longitud del curso principal	Lp	km	8.01	41.37	19.1	16.22
Orden de corrientes	Oc	unidad	4	5	5	5
Longitud de la red hídrica (Lh)	Lh	km	52.9	539.59	386.55	423.44
Pendiente promedio de la red hídrica	Pr	%	1.9	2.01	1.78	2.13
Densidad de drenaje	Dd	km/km ²	1.16	1.3	1.25	1.31
Frecuencia de corriente	Fc		2.05	2.05	2.09	2.05
Tiempo de concentración de Giandotti	Tc	horas	0.78	2.97	2.02	2.02

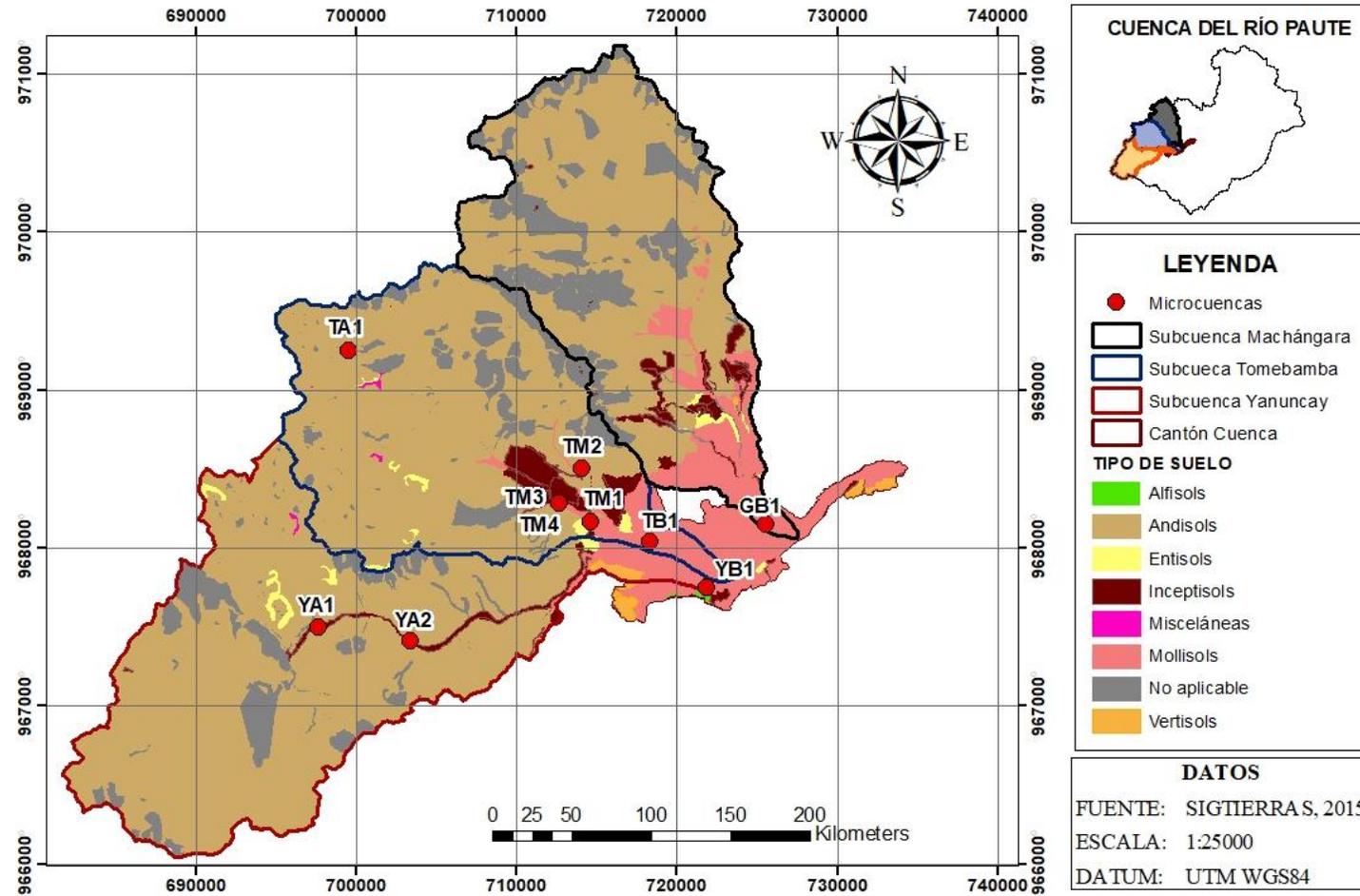
YB1=subcuenca Yanuncay, GB1= subcuenca Machángara, YA1= primera microcuenca alta de Yanuncay, YA2 = segunda microcuenca alta de Yanuncay.

Anexo 3. Mapa cobertura y uso de suelo en las microcuencas de estudio



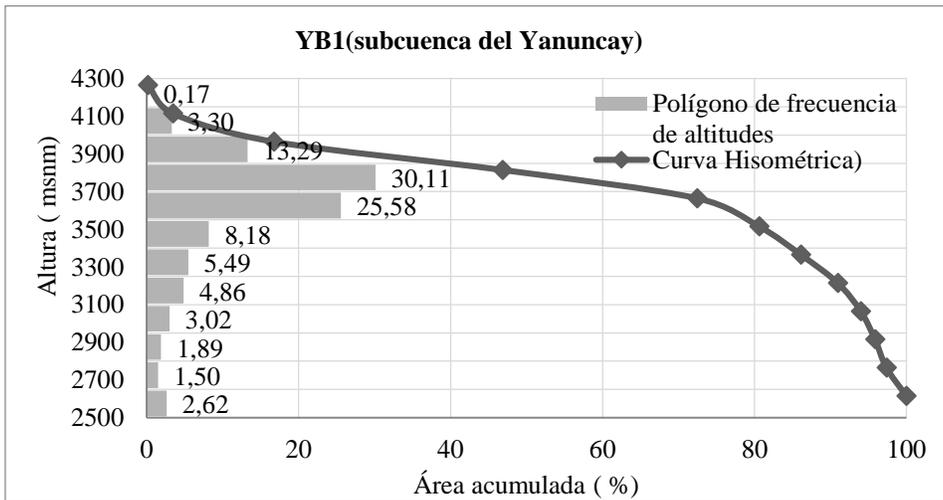
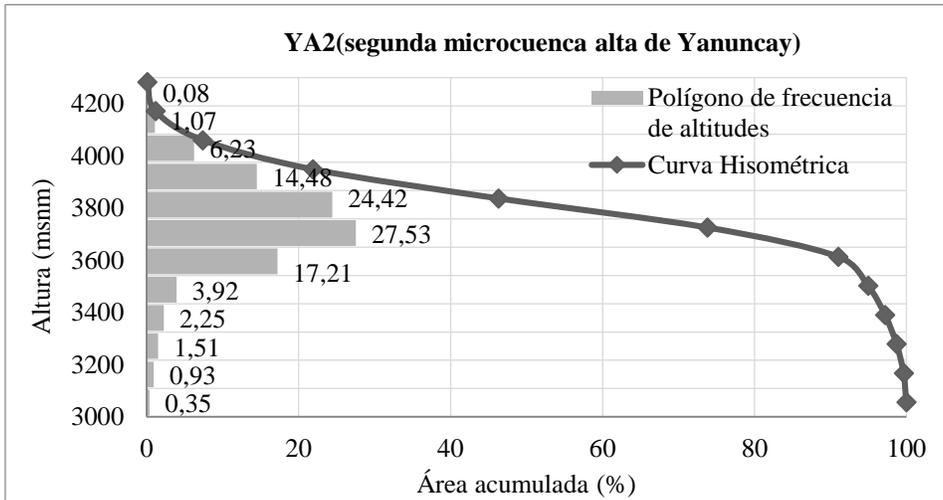
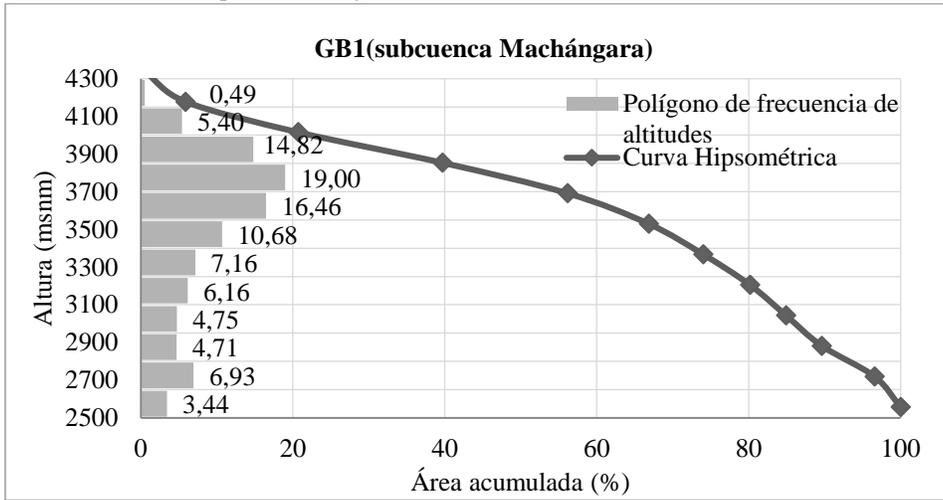
YB1=subcuenca Yanuncay, TB1 = subcuenca Tomebamba, GB1= subcuenca Machángara, YA1= primera microcuenca alta de Yanuncay, YA2 = segunda microcuenca alta de Yanuncay, TA1= primera microcuenca alta de Tomebamba, TM1= primera microcuenca media de Tomebamba, TM2 = segunda microcuenca media de Tomebamba, TM3 = tercera microcuenca media de Tomebamba, TM4 = cuarta microcuenca media de Tomebamba.

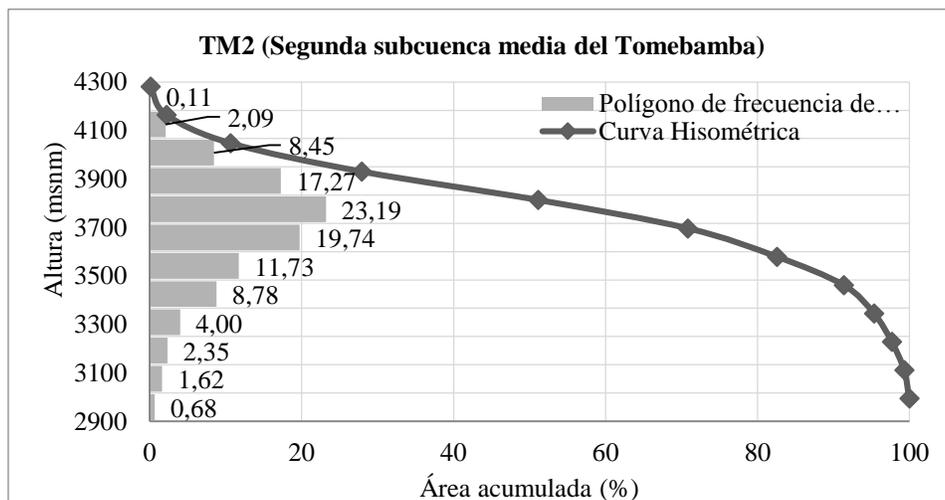
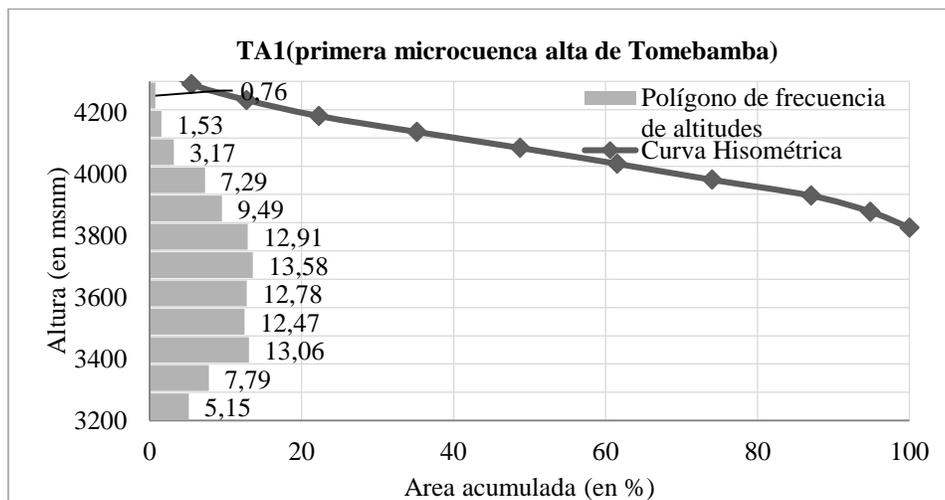
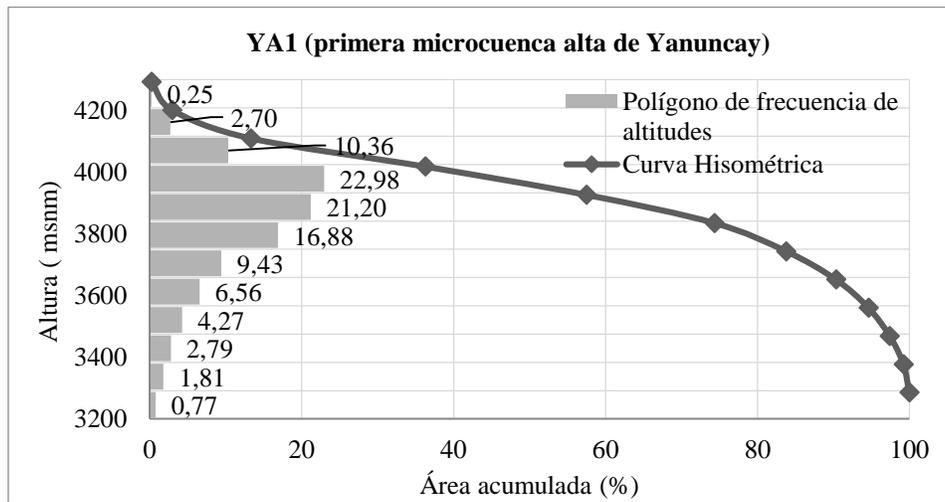
Anexo 4. Tipo de suelo en las microcuencas de estudio

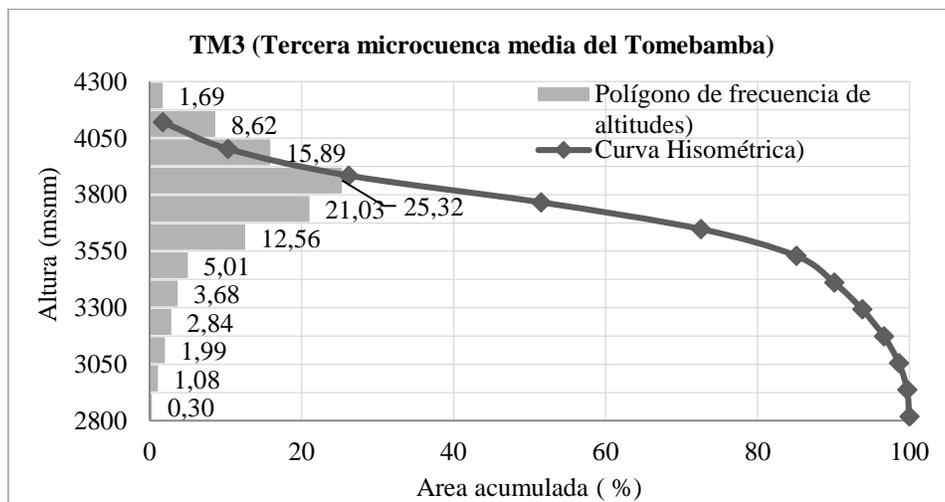
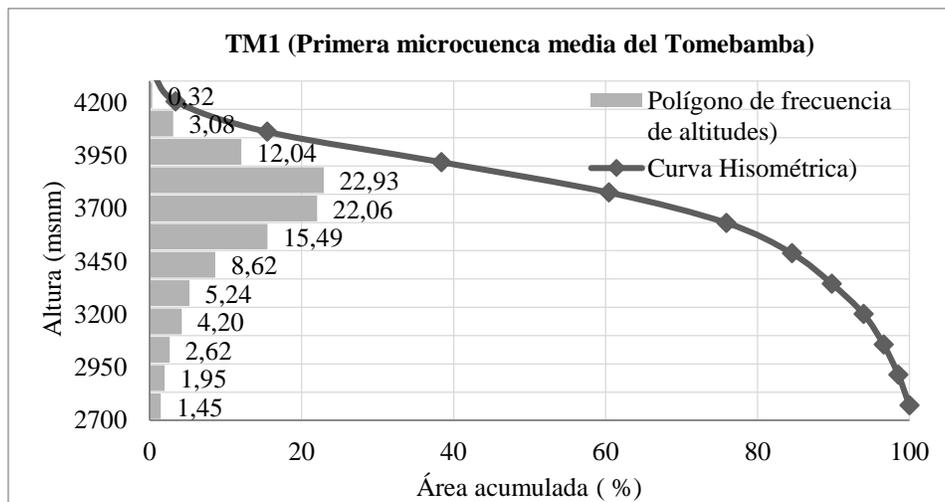
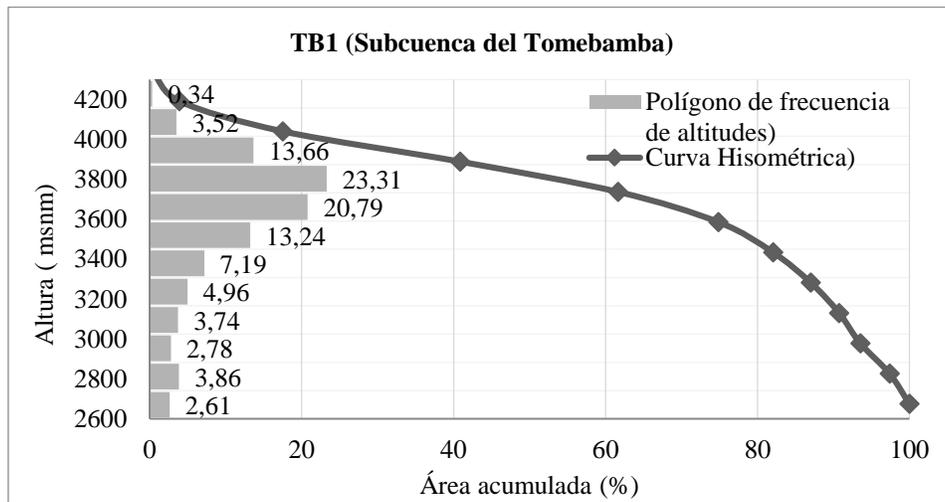


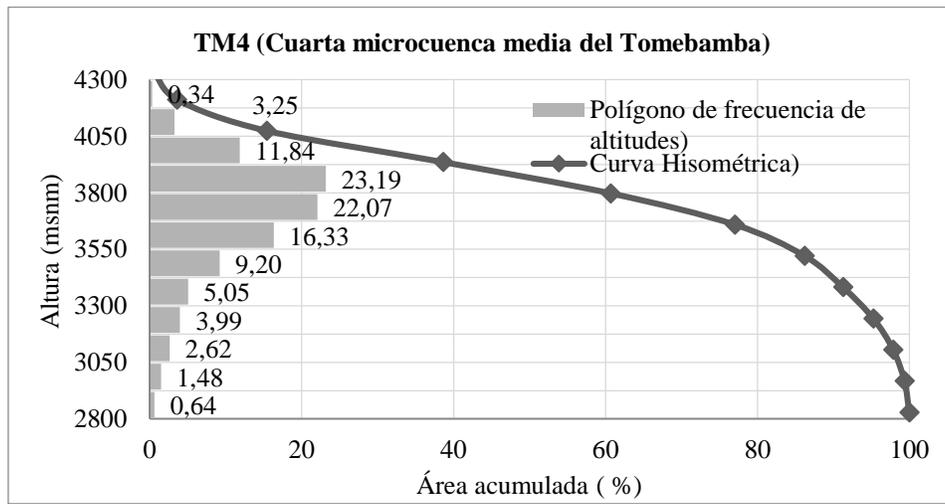
YB1=subcuenca Yanuncay, TB1 = subcuenca Tomebamba, GB1= subcuenca Machángara, YA1= primera microcuenca alta de Yanuncay, YA2 = segunda microcuenca alta de Yanuncay, TA1= primera microcuenca alta de Tomebamba, TM1= primera microcuenca media de Tomebamba, TM2 = segunda microcuenca media de Tomebamba, TM3 = tercera microcuenca media de Tomebamba, TM4 = cuarta microcuenca media de Tomebamba.

Anexo 5. Curvas hipsométricas y frecuencia de altitudes de las microcuencas de estudio

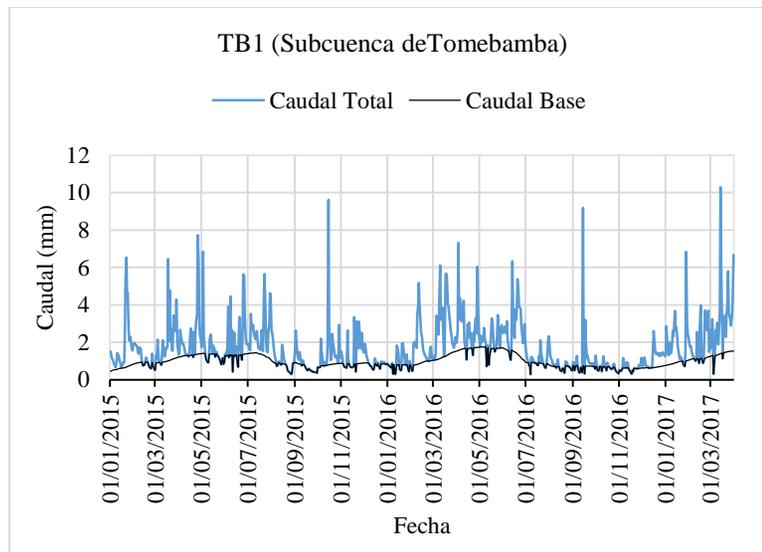
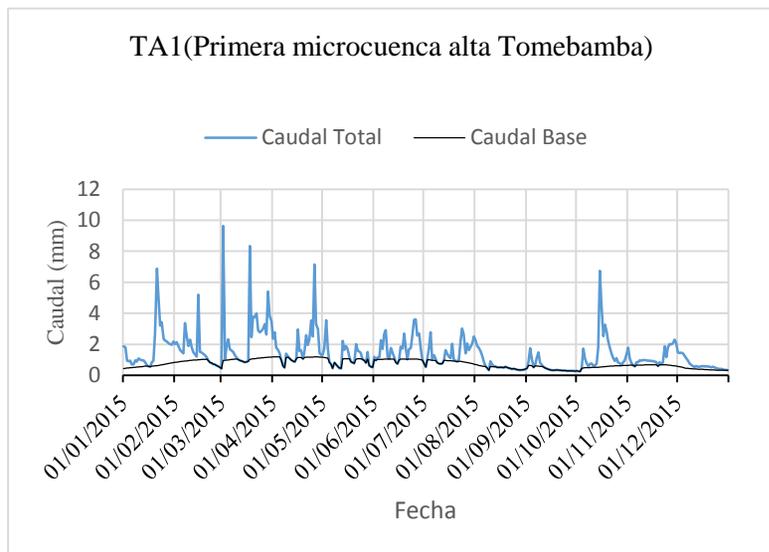
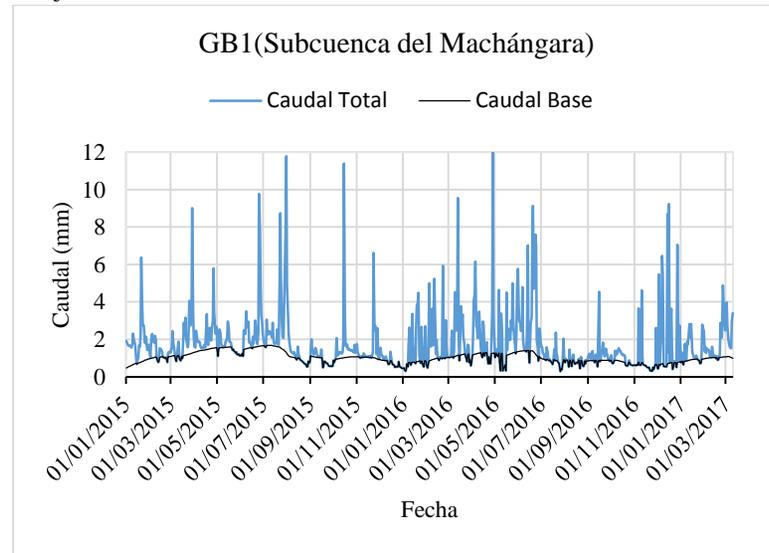
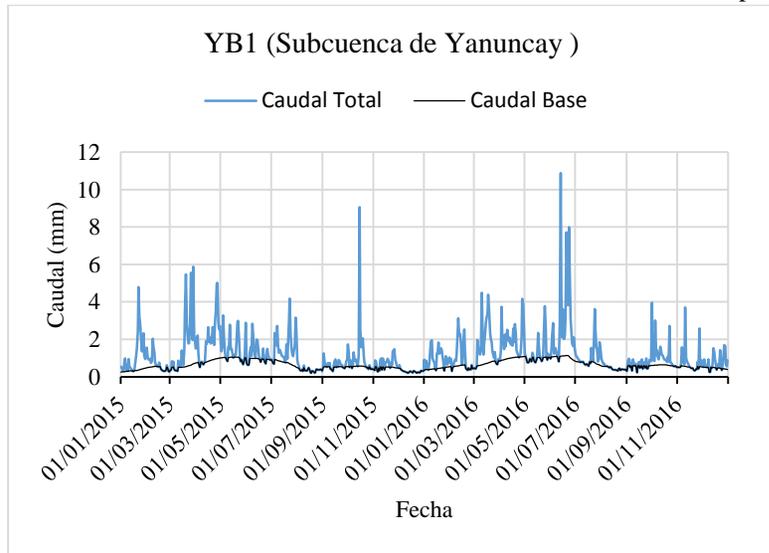


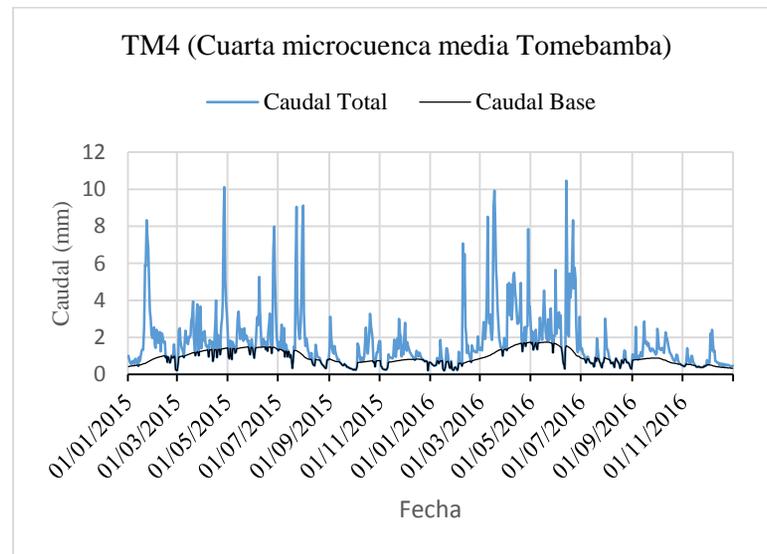
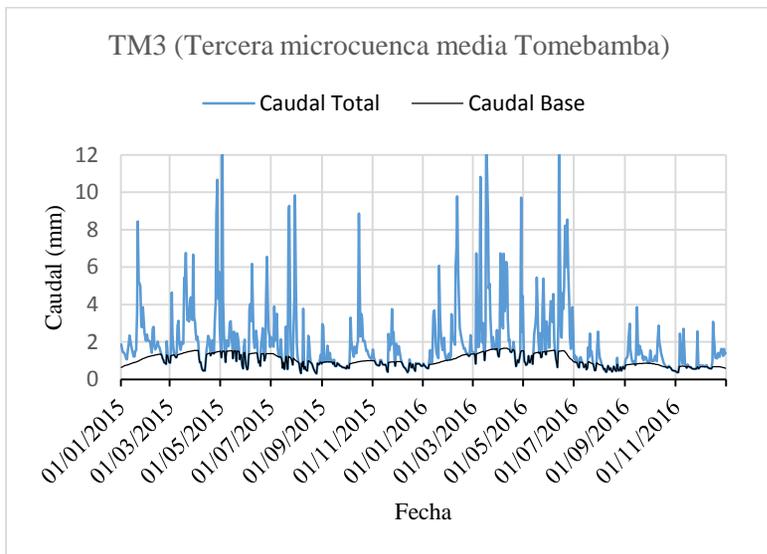
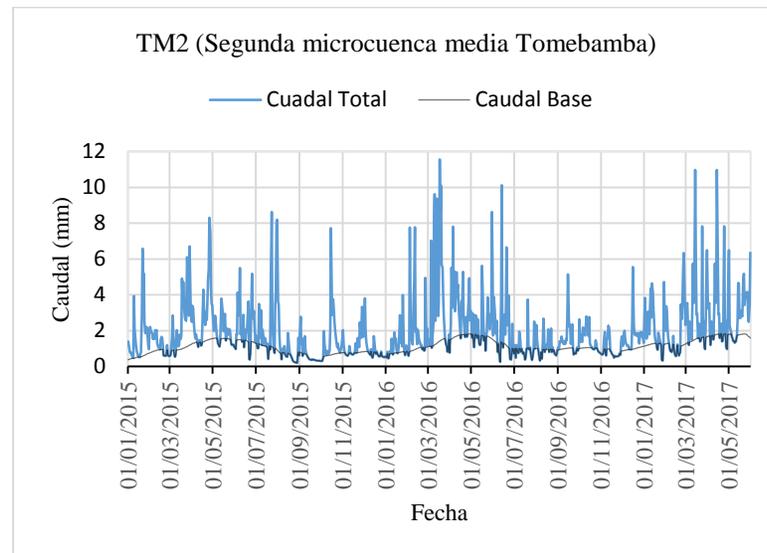
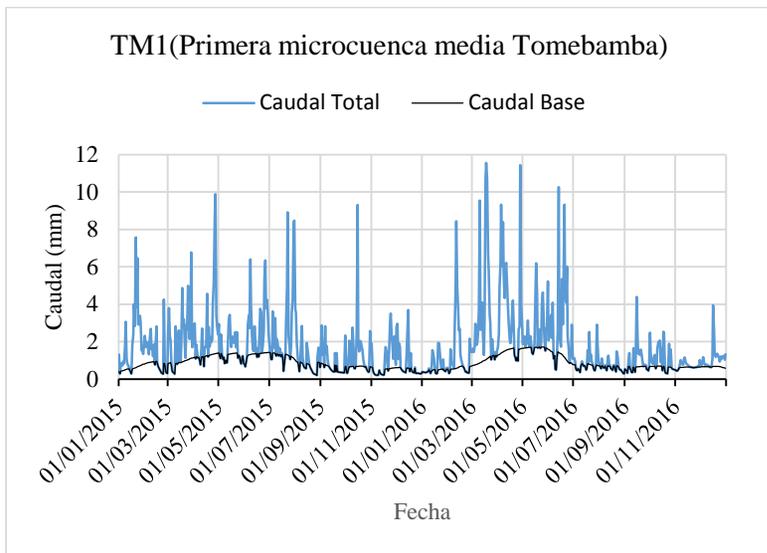


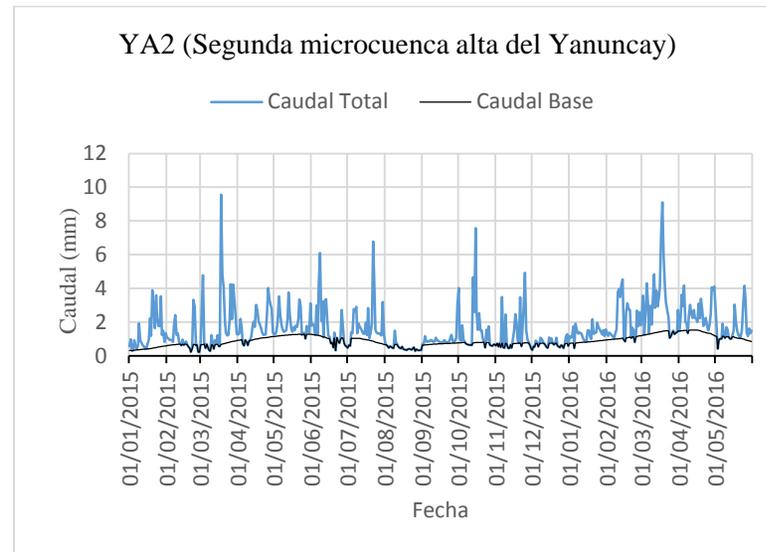
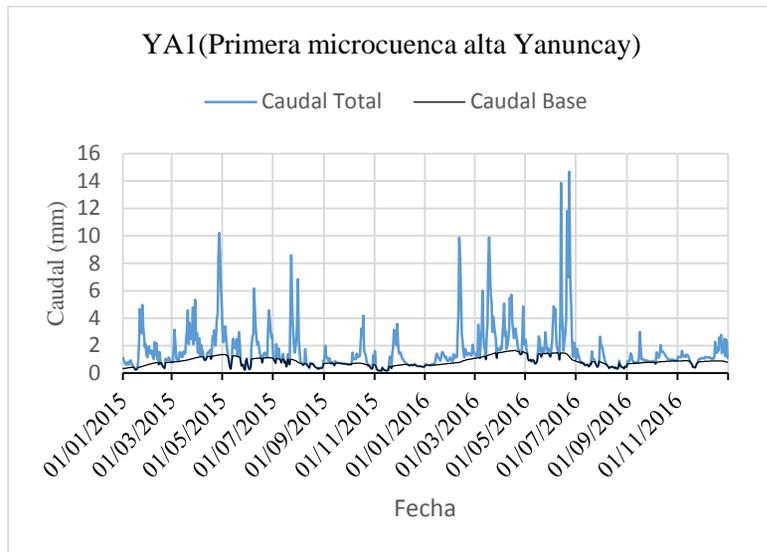




Anexo 6. Gráficas de separación de flujo de las microcuencas de estudio







Anexo 7. Correlaciones totales

Morfometría	CE	Eto	P	Q	Pseco	Qseco	Qplazo	Q10	Q35	Q50	Q95	Q90	Qbase	Qmin	Qmax	Q90/Q10	Q90/Q35	FDC
Área	-0.06	0.00	0.00	-0.11	0.00	-0.07	-0.13	-0.11	-0.11	-0.06	-0.01	-0.05	0.04	0.00	-0.11	0.00	0.00	-0.11
Perímetro	-0.02	0.00	0.01	-0.14	0.03	-0.15	-0.15	-0.13	-0.18	-0.08	0.01	-0.05	0.07	-0.01	-0.05	0.00	0.02	-0.15
Coefficiente de Compacidad	0.06	-0.06	-0.07	-0.08	-0.15	-0.24	-0.06	-0.05	-0.22	-0.08	0.00	-0.01	0.13	-0.09	0.18	0.00	0.15	-0.13
Rectángulo Equivalente	-0.17	0.08	0.05	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.01	-0.12	0.00	0.02	0.00
Factor de forma	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.04	0.08	0.00	0.00	0.06	0.00	-0.05	-0.02	-0.22	0.05	-0.23	0.02	-0.21	0.11
Longitud de la cuenca	-0.09	0.01	0.00	-0.10	0.00	-0.08	-0.11	0.11	-0.13	-0.07	0.00	-0.02	0.18	0.00	0.01	0.01	0.04	-0.18
Relación de elongación	0.03	0.05	-0.04	0.01	-0.02	0.00	-0.02	0.00	0.00	0.00	-0.13	-0.08	-0.37	0.00	-0.37	0.07	-0.18	0.06
Elevación de frecuencia media	0.14	-0.22	-0.25	-0.13	-0.08	-0.02	-0.13	-0.13	-0.07	-0.15	-0.28	-0.16	-0.39	-0.08	-0.03	-0.03	-0.10	0.02
Altura más frecuente	-0.01	-0.18	-0.04	-0.07	0.00	0.01	-0.07	-0.12	-0.03	-0.12	-0.22	-0.13	-0.10	-0.05	0.00	0.02	-0.13	0.00
Altura media de la cuenca	0.28	-0.15	-0.28	-0.09	-0.13	-0.04	-0.08	-0.06	-0.04	-0.09	-0.23	-0.12	-0.49	-0.07	-0.04	-0.04	-0.09	0.06
Pendiente media de la cuenca	-0.39	0.06	0.41	0.36	0.40	0.51	0.34	0.25	0.41	0.23	0.03	0.06	0.02	0.00	0.18	0.01	-0.09	0.13
Longitud del curso principal	0.03	-0.15	-0.11	-0.25	-0.14	-0.39	-0.24	-0.21	-0.35	-0.21	-0.01	-0.04	0.07	0.02	0.00	0.01	0.10	-0.17
Orden de corrientes	-0.09	0.01	0.00	-0.08	0.00	0.02	-0.10	-0.09	-0.08	-0.04	-0.04	-0.07	0.02	0.04	-0.06	0.00	0.00	-0.09
Longitud de la red hídrica	-0.06	0.00	0.00	-0.12	0.00	0.08	-0.15	-0.13	-0.12	-0.07	-0.01	-0.04	0.05	0.00	-0.11	0.00	0.01	-0.13
Pendiente promedio de la red hídrica	-0.46	0.09	0.54	0.37	0.37	0.27	0.35	0.31	0.42	0.27	0.13	0.10	0.15	0.10	0.03	0.00	0.05	0.11
Densidad de drenaje	0.06	-0.30	-0.17	-0.21	-0.01	-0.03	-0.20	-0.25	-0.08	-0.18	-0.07	-0.04	-0.17	0.04	-0.24	0.03	0.00	-0.03
Frecuencia de corriente	0.10	-0.27	-0.19	-0.16	-0.02	-0.02	-0.15	-0.18	-0.05	-0.14	0.10	0.05	0.26	0.01	-0.17	0.01	0.01	0.00
Tiempo de concentración de Giandotti	-0.02	0.01	0.01	-0.13	-0.03	-0.16	-0.15	-0.13	-0.18	-0.08	0.00	-0.04	0.09	0.00	-0.04	0.00	0.03	-0.15
Cobertura	CE	Eto	P	Q	Pseco	Qseco	Qplazo	Q10	Q35	Q50	Q95	Q90	Qbase	Qmin	Qmax	Q90/Q10	Q90/Q35	FDC
Páramo	0.77	-0.03	-0.50	-0.10	-0.54	-0.23	-0.08	-0.02	-0.11	-0.09	-0.20	-0.14	-0.43	-0.10	-0.02	-0.11	-0.04	0.08
Quinuas	0.15	0.21	0.03	0.53	-0.07	0.01	0.57	0.73	0.42	0.34	0.11	0.08	0.02	0.02	0.33	-0.07	0.00	0.27



Cuerpos Agua	0.11	-0.19	-0.21	-0.10	-0.06	0.00	-0.10	-0.11	-0.06	-0.15	-0.18	-0.09	-0.18	-0.01	0.00	0.01	-0.04	0.01
Degradación	0.17	-0.36	-0.30	-0.30	-0.14	-0.09	-0.27	-0.36	-0.39	-0.36	-0.09	-0.07	0.00	-0.12	0.20	0.02	0.07	-0.20
Via	0.27	-0.32	-0.36	-0.22	-0.05	-0.02	-0.20	-0.27	-0.09	-0.21	-0.09	-0.02	-0.35	0.04	-0.30	0.06	0.01	-0.12
Eucalipto	-0.68	0.05	0.37	0.01	0.64	0.31	0.01	-0.03	0.01	0.04	0.28	0.24	0.50	0.09	0.30	0.47	0.33	-0.69
Pino	0.41	-0.50	-0.84	-0.81	-0.62	-0.84	-0.78	-0.59	-0.89	-0.69	-0.26	-0.29	-0.11	-0.32	-0.17	-0.02	0.01	-0.07
Pasto	-0.20	-0.27	0.01	-0.09	0.04	-0.03	-0.10	-0.13	0.03	-0.07	-0.03	-0.05	0.01	0.00	-0.16	0.00	-0.02	-0.02
Población	0.06	-0.09	0.00	-0.14	0.03	0.01	-0.11	-0.38	-0.20	-0.07	0.14	0.07	0.61	0.03	0.27	0.36	0.53	-0.96
Bosque	-0.44	0.02	0.57	0.32	0.49	0.28	0.30	0.22	0.42	0.27	0.16	0.15	0.05	0.10	0.00	0.01	-0.01	0.06
Pasto y Cultivo	-0.92	0.47	0.76	0.41	0.87	0.63	0.42	0.11	0.33	0.53	0.90	0.82	0.76	0.70	0.38	0.62	0.47	-0.37
Suelos	CE	Eto	P	Q	Pseco	Qseco	Qplazo	Q10	Q35	Q50	Q95	Q90	Qbase	Qmin	Qmax	Q90/Q10	Q90/Q35	FDC
Andisoles	0.71	-0.18	-0.72	-0.29	-0.72	-0.39	-0.27	-0.15	-0.30	-0.34	-0.35	-0.30	-0.25	-0.04	-0.01	-0.13	-0.05	0.03
Entisoles	0.10	0.00	0.03	0.03	-0.05	0.00	0.04	0.04	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	-0.03	0.59	0.00	0.02	0.03
Inseptisoles	-0.43	0.02	0.16	0.01	0.05	0.11	0.00	0.00	0.04	0.01	0.00	0.00	0.05	0.16	-0.13	0.02	0.02	0.00
Miselaneos	0.01	0.00	0.01	0.04	0.02	0.14	0.06	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01	0.09	-0.25	0.86	0.00	0.01	0.02
Mollisols	-0.50	0.01	0.12	0.01	0.33	0.14	-0.01	-0.12	-0.02	0.00	0.17	0.12	0.57	0.10	0.08	0.46	0.37	-0.82
No aplicable	-0.33	0.15	0.54	0.34	0.48	0.25	0.34	0.27	0.40	0.41	0.24	0.24	0.03	0.00	0.00	0.03	0.00	0.01

CE=coeficiente de escorrentía, Eto=evapotranspiración real, P=precipitación, Q=caudal, Pseco=precipitación del mes más seco, Qplazo=caudal promedio a largo plazo, Q10=percentil 90, Q35=percentil 65, Q50=percentil 50, Q95=percentil 5, Q90=percentil 10, Qbase=caudal base, Qmin=caudal mínimo, Qmax=caudal máximo, Q90/Q10=relación entre percentil 10 y 90, FDC=Curva de duración de descarga.