



# Universidad de Cuenca

## Facultad de Ingeniería

### Escuela de Ingeniería Civil

#### **ESTUDIO COMPARATIVO DEL RÉGIMEN HIDROLÓGICO DE TRES MICROCUENCAS DE ALTA MONTAÑA CON DIFERENTE COBERTURA VEGETAL**

Proyecto de graduación previo a la  
obtención del grado de Ingeniero Civil

**Director:**

**Ing. Rolando Céleri Alvear, PhD**

**Autor:**

**Ronnie Javier Araneda Cabrera**

Cuenca – Ecuador

Noviembre de 2014



## Resumen

El páramo es una fuente importante de agua para muchas ciudades del Ecuador y en general de los Andes. Sin embargo, se conoce poco sobre los procesos hidrológicos que ocurren en estos ecosistemas. Además existen zonas con sistemas lacustres que jamás han sido estudiadas o periodos con precipitaciones altas y bajas que no han sido cuantificadas ni identificadas. A esto se le suma las actividades antrópicas como la agricultura, los procesos de (re)forestación con especies nativas y/o exóticas entre otros, que se realizan sin precaución alguna. Este estudio examina la influencia de la cobertura vegetal sobre la hidrología del páramo, partiendo de la búsqueda de indicadores que analicen los datos precipitación-escorrentía generados por tres microcuencas con similares características geomorfológicas y diferentes coberturas vegetales: una cubierta de pajonal natural, otra con pajonal pero con una fuerte alteración antrópica en sus suelos y otra con un sistema lacustre. El objetivo fue el de aumentar el conocimiento, lo que es vital para planes de manejo de agua y de cuencas hidrográficas. Se realizó un análisis comparativo de la lluvia, de la persistencia de caudales bajos y altos y de la reactividad y regulación hídrica. Los resultados indicaron que el páramo tiene precipitaciones muy constantes con solo el 2% de posibilidades de tener eventos extremos. Los caudales mayores y menores se presentaron en la microcuenca alterada lo cual indica que ha perdido sus características de regulación, además de mostrar una mayor reactividad y un coeficiente de escorrentía 14% mayor que la lacustre. La cuenca lacustre presentó una alta regulación, parecida a la de pajonal natural en especial para periodos secos. Los resultados resaltan la importancia de proteger el páramo.

Palabras clave: páramo, sistema lacustre, pajonal, regulación, reactividad, precipitación, caudal.



## Abstract

The páramo is an important source of water for many cities in Ecuador and in general of the Andes. However, the hydrological process that occurs in these ecosystems is barely known. In addition, there are existing areas with lacustrine systems that have never been studied and high/low periods of rainfall which have not been quantified or identified. In addition, the anthropogenic activities such as agriculture, (re)forestation with native species and/or exotic within others, that is performed without any precaution. This study analyzes the influence of the vegetation cover on the hydrology in the páramo, based on the search for indicators that analyze the data of rainfall-runoff. A series of data from three microbasins with similar geomorphic characteristics and different vegetation covers: one cover of natural pajonal, another containing pajonal but with a strong anthropogenic alteration in the land use, and the last one with a lacustrine system. The objective was to increase the knowledge of water resource and watershed management. A comparative analysis was performed of rainfall, high/low runoff, reactivity and a hydrological regulation. The results indicated that the páramo contains constant rainfall with only the 2% possibility to have extreme events. High and low streamflows were presented in the altered microbasin that has lost its regulation characteristics, furthermore this shows an utmost reactivity and a runoff coefficient 14% higher than the lacustrine microcatchment. The lacustrine microbasin presented a high regulation similar to the natural pajonal during the dry spells. The results highlight the importance of protecting the páramo ecosystem.

Keywords: páramo, lacustrine systems, pajonal, regulation, reactivity, rainfall, stream flow.



## ÍNDICE

Resumen.....	2
Abstract .....	3
ÍNDICE .....	4
Cláusulas de Responsabilidad .....	6
Agradecimiento .....	8
Dedicatoria.....	9
1. Introducción.....	10
1.1 Antecedentes .....	10
1.2 Justificación .....	12
1.3 Marco Teórico .....	12
1.4 Objetivos .....	16
1.4.1 Objetivo General.....	16
1.4.2 Objetivos Específicos.....	16
2. Materiales y Métodos .....	17
2.1 Descripción de las microcuencas y monitoreo.....	17
2.2 Datos.....	20
2.3 Análisis comparativo de la lluvia registrada en los 3 pluviógrafos .....	21
2.4 Análisis de la persistencia de caudales bajos y altos .....	22
2.5 Análisis de la reactividad y regulación hídrica.....	23
2.5.1 Reactividad.....	23
2.5.2 Regulación hídrica.....	24
3. Resultados y Discusión.....	25
3.1 Análisis comparativo de la lluvia registrada en los 3 pluviógrafos .....	25
3.2 Análisis de la persistencia de caudales bajos y altos .....	28
3.3 Análisis de la reactividad y regulación hídrica.....	31
3.3.1 Reactividad .....	34
3.3.2 Regulación hídrica.....	36
4. Conclusiones .....	40
5.1 Investigaciones futuras .....	43
5. Bibliografía y Referencias.....	43



ANEXOS ..... 46

Anexo 1. Fotografías de las tres microcuencas con sus pluviógrafos y vertederos .. 46

Anexo 2. Análisis comparativo de la lluvia registrada en los 3 pluviógrafos ..... 48



**Universidad de Cuenca**

**Fundada en 1867**

Yo, Ronnie Javier Araneda Cabrera, autor de la tesis “**ESTUDIO COMPARATIVO DEL RÉGIMEN HIDROLÓGICO DE TRES MICROCUENCAS DE ALTA MONTAÑA CON DIFERENTE COBERTURA VEGETAL**”, reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de **Ingeniero Civil**. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Cuenca, 04 de Noviembre de 2014

---

Ronnie Javier Araneda Cabrera  
C.I: 0104809579



**Universidad de Cuenca**

**Fundada en 1867**

Yo, Ronnie Javier Araneda Cabrera, autor de la tesis “**ESTUDIO COMPARATIVO DEL RÉGIMEN HIDROLÓGICO DE TRES MICROCUENCAS DE ALTA MONTAÑA CON DIFERENTE COBERTURA VEGETAL**”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 04 de Noviembre de 2014

A handwritten signature in blue ink, consisting of several overlapping loops and strokes.

---

Ronnie Javier Araneda Cabrera  
C.I: 0104809579



## **Agradecimiento**

Al Ingeniero Rolando Céleri Alvear por su brillante dirección, su constante aporte de conocimiento y su apoyo en la realización de este proyecto. Al Centro de Hidrología y Clima del Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales de la Universidad de Cuenca y todos sus integrantes que colaboraron en el proyecto, en el trabajo en campo y la obtención de datos analizados en esta investigación.

Ronnie Javier Araneda Cabrera,  
Cuenca, noviembre de 2014



## **Dedicatoria**

A mis padres, hermana, abuelos y amigos.

Ronnie,  
Cuenca, noviembre de 2014



## 1. Introducción

### 1.1 Antecedentes

El páramo es un ecosistema natural que se encuentra entre el límite continuo del bosque y de las nieves perpetuas, en la alta montaña tropical húmeda (Llambí et al., 2012). En Perú, Ecuador, Colombia y Venezuela estos ecosistemas se encuentran en la Cordillera de los Andes aproximadamente entre los 3000 y 5000 metros de altura sobre el nivel del mar (Josse et al., 2009) y son de mucha importancia por la gran biodiversidad que alberga, por ser elemento fundamental de la historia y cultura de sus pueblos (Llambí et al., 2012) y en especial por ser la principal fuente de suministro de agua para personas en diferentes ciudades (por ejemplo Quito, Bogotá, Cuenca). (De Bièvre, Iñiguez, & Buytaert, 2011; Vásconez et al., 2011)

A pesar de los múltiples servicios que brinda el páramo, existe muy poco conocimiento y estudio sobre el funcionamiento y comportamiento de este ecosistema desde varios puntos de vista, entre ellos el hidrológico (R Céleri, De Bièvre, & Iñiguez, 2012; Rolando Céleri, 2010; Córdova, 2013; Llambí et al., 2012). Ésta falta de conocimiento hace que se desconozca el impacto en los procesos hidrológicos que causan las diferentes prácticas antrópicas. Una de las prácticas más comunes es el cambio de la cobertura (nativa por otra) y uso del suelo; la misma que tiene efectos, en su mayoría desconocidos, en la hidrología natural del páramo. Por esta razón es necesario estudiar y conocer más este ecosistema para que los planes de manejo de recursos hídricos a escala de cuenca hidrográfica estén sustentados por un profundo conocimiento científico de los diferentes procesos que en él existen (R Céleri et al., 2012).

En el Ecuador los páramos que se encuentran en el sur del país, como el Parque Nacional el Cajas, consisten de planicies y valles accidentados de origen glacial con una gran variedad de lagunas, pantanos y praderas húmedas (De Bièvre et al., 2011). El clima es generalmente frío con una temperatura media de 7°C y tiene una precipitación anual relativamente alta comparada con zonas más bajas aledañas. Los suelos son relativamente homogéneos formados principalmente por andosoles e histosoles y se asientan sobre roca madre a una altura no mayor a tres metros de profundidad (Llambí et al., 2012).

Todas estas características sumadas a la baja evapotranspiración que existe, hacen que exista un gran excedente de agua, de excelente calidad) que alimenta ríos y quebradas durante todo el año (De Bièvre et al., 2011). Ésta provisión de agua en volúmenes más o menos constantes durante todo el año, para eventos de precipitación bajos y altos, es lo que llamamos regulación, que es la característica más legendaria de los páramos andinos entre agricultores y científicos.



Si bien este flujo sostenido de agua es atribuido principalmente al clima, la topografía y suelos (De Bièvre & Acosta, n.d.), puesto que no existen los reguladores clásicos de nieve ni hielo (R Célleri & Feyen, 2009), muchos experimentos e investigaciones se han realizado con el fin de analizar la influencia que tiene el cambio de uso de suelos y de cobertura vegetal en la regulación hídrica de las cuencas de alta montaña (R Célleri et al., 2012).

Los principales cambios en usos de tierras son la agricultura con labranza, forestación con pinos y bosque nativo, pastoreo tanto extensivo como intensivo, quemas y minería que se dan por el incremento de la presencia humana en el páramo (Hofstede, 2001; Josse et al., 2009; Vásconez et al., 2011). Estos cambios en la cobertura y uso del suelo tienen serias implicaciones en el equilibrio general de los ecosistemas (Quichimbo et al., n.d.), afectando en el ciclo del agua mediante cambios en las propiedades del suelo y amenazando con alterar las propiedades de regulación hídrica y otras propiedades vitales que el páramo genera para los habitantes andinos (Josse et al., 2009).

A nivel mundial se han realizado muchos estudios sobre los impactos del cambio de uso de la tierra sobre la hidrología, por lo que los indicadores y métodos desarrollados son muchos, llegando a ser algunas veces redundantes (Olden & Poff, 2003). Ha esto se le suma la incertidumbre de saber si cierto método o indicador es apto para el ecosistema que se está estudiando, puesto que los flujo de en vertientes y ríos puede variar por su origen, pudiendo ser este glacial o por escorrentía luego de precipitaciones, por su comportamiento, pudiendo ser intermitente o continuos durante el año y por sus régimen, pudiendo ser laminar o turbulento.

Aunque en el Ecuador el monitoreo hidrológico en los páramos ha sido deficiente y uno de los factores que más ha afectado a la hidrología como ciencia como ciencia es la reducción en la disponibilidad de datos obtenidos de observaciones (R Célleri et al., 2012; Córdova, 2013), el Centro de Hidrología y Clima del Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales de la Universidad de Cuenca, en el marco del proyecto "Impacto del Cambio Climático y uso de la Tierra Sobre los Recursos Hídricos, Generación Hidroeléctrica e Inundaciones de las Cuencas Jubones y Paute" (proyecto PIC-11-715) financiado por el SENESCYT, ha monitoreado, entre otras cosas, 3 microcuencas con diferente cobertura vegetal, una de ellas con un sistema lacustre. De este modo se cuenta con información para realizar un estudio comparativo sobre el régimen hidrológico en tres microcuencas de alta montaña.

En este contexto este documento reporta resultados de una investigación que tuvo por objeto conocer la influencia de un sistema lacustre sobre la hidrología a escala de microcuenca, puesto que a pesar que la presencia de lagunas es una de las características principales en la morfología de los páramos, no existen reportes de estudios ni información sobre tipo de coberturas.

## 1.2 Justificación

Los páramos ocupan una superficie que supera los 35000km<sup>2</sup>, representando el 2.2% del área total de los Andes del Centro y Norte y siendo Ecuador el país andino con más páramo, seguido por Colombia, Venezuela y Perú (Josse et al., 2009). Este ecosistema es de mucha importancia ecológica y económica pues el páramo es la fuente principal de agua para la sierra ecuatoriana para distintos fines: doméstico, industrial e incluso para la generación de energía hidroeléctrica (De Bièvre et al., 2011). El agua, que es de excelente calidad, ha servido a la población gracias a que se presenta de manera constante en volúmenes suficientes gracias a la capacidad de producción y regulación que tiene el páramo en su estado natural. Este estado natural, en términos de su cobertura y uso de suelo, se ve cada día más afectado por factores antrópicos como el pastoreo (extensivo y excesivo), cultivos, quemas, forestaciones (pinos y bosque nativo) (Josse et al., 2009; Vásconez et al., 2011). Aunque se han estudiado algunos de los efectos de estas actividades y se conocen algunas de las alteraciones que generan, estos estudios van casi en su totalidad relacionados a la afección que tienen sobre áreas cubiertas de pajonal natural.

Los sistemas lacustres, son característicos, naturales y comunes en la morfología de los páramos, al igual que las áreas cubiertas de pajonal natural, por ejemplo en Ecuador en el Parque nacional El Cajas existen más de 232 lagunas, Papallacta alberga un sistema lacustre de más de 28 lagunas, el Parque Podocarpus es conocido por las famosas lagunas El Compadre, entre otras (ABORDO & Tugunimango, 2014). Por ello sorprende que no existan estudios sobre los procesos hidrológicos que experimentan a nivel de microcuencas.

Hoy en día existen, y se siguen creando, muchos planes para la conservación, manejo y protección de áreas generadoras de agua como es el páramo. Para que cada uno de estos planes tenga buenos resultados y sean sustentables es necesario fundamentarlos con un profundo entendimiento y conocimiento científico de todos los procesos hidrológicos de las zonas y ecosistemas a los que están dirigidos.

Por ello, los resultados obtenidos en este estudio serán de vital importancia para la toma de decisiones en la creación de planes de manejo de recursos hídricos y protección de microcuencas de alta montaña, además que enriquecerá el conocimiento acerca del funcionamiento en la hidrología de los páramos y marcará pautas para continuar en el estudio de sistemas lacustres.

## 1.3 Marco Teórico

Dependiendo del tipo de cobertura (p. ej. bosque nativo, bosque de pinos, pajonal) y de su nivel de conservación existirán diferentes grados de intercepción

de agua lluvia y de evapotranspiración (Dekker, 2000), lo cual influenciará directamente en el volumen de agua que llega al suelo y por lo tanto se podría llegar a convertir en escorrentía de las cuencas en períodos lluviosos y en períodos de verano o estiaje. De igual manera la capacidad de infiltración y capacidad de almacenamiento de los suelos podría verse afectada por el tipo, características y cantidad de los residuos producidos (hojas, resina, etc.) y por las prácticas de manejo del mismo como agricultura, conservación, forestaciones, quemas, entre otras (R Célleri et al., 2012). Además como no hay precipitaciones en forma de nieve, los suelos son los que se ven afectados directamente durante todo el año.

En algunos países se han realizado algunos tipos de experimentos e investigaciones relacionados con el cambio de uso de tierras y cobertura vegetal y su efecto sobre la hidrología de la cuenca. En un artículo que revisa varios de estos experimentos (Bosch & Hewlett, 1982) identificó que los bosques naturales de pino y eucalipto (en Estados Unidos) con un rendimiento de agua de agua de 40mm cambia a 25 y 10mm al cambiar el 10% de la cobertura por árboles madereros y matorrales, registrando cambios máximos de hasta 640mm con teniendo variaciones según los regímenes de lluvia. En otro artículo (Duncan, 1995) encontró (en Nueva Zelanda) que en los meses secos en las cuencas cubiertas de pino y otros árboles los caudales pueden ser en promedio 3 veces menores, mientras en épocas húmedas los flujos de agua son menores a la mitad que las cubiertas con pasto, siendo los picos hasta 80% menores y atribuyó estas diferencias por al grado de intercepción que tiene cada cobertura. Estos estudios han consistido en monitorear cuencas aledañas con diferente cobertura (los llamados estudios de cuencas pares) o, en experimentos de larga duración, monitorear durante algunos años una cuenca y luego cambiar su cobertura con el fin de encontrar las diferencias que se presentan en la hidrología de las mismas (R Célleri et al., 2012).

En los páramos andinos resaltan algunos estudios que han marcado pautas en el conocimiento del impacto y funcionamiento de la hidrología cuando en estos ecosistemas se presentan diferentes coberturas y uso de suelo ya sea de manera natural (como es el pajonal, bosque nativo, sistemas lacustres, entre otras morfologías naturales) o antrópica (forestaciones con pinos, influencia de cultivos, quemas y pastoreo). Siendo el estudio (Buytaert, Célleri, et al., 2006) la principal fuente de referencias sobre estudios de impacto hidrológico en los páramos de los Andes por actividades como el pastoreo intensivo de ganado, el cultivo y la siembra de pinos, entre otros y por fenómenos globales como el cambio climático; donde se realiza una revisión sobre el estado del conocimiento de su hidrología y el análisis del impacto de estas actividades (humanas y calentamiento global).

En la revisión de bibliografía previa a esta investigación se han encontrado estudios para diferentes tipos de impactos relacionados al páramo de los Andes:

impactos por plantaciones de pinos, de bosques nativos, por quemas, por cultivos con labranza y pastoreo de ganado. Los hallazgos de estos estudios se detallan a continuación.

El único estudio sobre el impacto de las plantaciones de pinos se encuentra en (R Célleri et al., 2012). El estudio presenta la investigación en dos microcuencas aledañas en la parte alta de la subcuenca del río Tomebamba en la provincia del Azuay, Ecuador. Una microcuenca (con un área de 1km<sup>2</sup> y ubicada entre los 2980 y 3740 m.s.n.m.) tenía una cobertura natural de pajonal y la otra (con un área de 0.59km<sup>2</sup> y ubicada entre los 3240 y 3700 m.s.n.m.) una alta plantación de pino patula (*Pinus Patula*) de aproximadamente 15 años de edad. Se encontró que el rendimiento hídrico anual de la microcuenca con pinos fue un 50% menor al observado en la cuenca de pajonales, lo que indica pérdidas por evapotranspiración fueron del 50%. Así mismo, el cambio en el régimen hidrológico fue total, existiendo una reducción significativa tanto de caudales picos como caudales base, observándose que estos últimos llegaban a ser un tercio de aquellos registrados en la microcuenca de pajonales.

Con respecto al impacto de los cultivos el estudio (Buytaert, Iñiguez, et al., 2006) realizado por la Universidad de Cuenca, Ecuador citada también en (Llambí et al., 2012) muestra los resultados de la investigación en dos microcuencas en la parte alta de la subcuenca del río Machángara en la provincia del Azuay. Una microcuenca tenía cobertura de pajonal natural y la otra un cultivo intenso de papas. Después de monitorear el caudal y el clima los investigadores encontraron un cambio significativo en el régimen hidrológico, con un incremento en flujos pico (promedio del 20%) y, una reducción fuerte de los caudales base, hasta un 50%. La relación entre caudales pico y base, aumentaba de 5 para la cuenca inalterada a 12 en la cuenca agrícola. Además se encontró una reducción en la capacidad de regulación estimada en un 40%.

En cuanto a los efectos de la quema y la labranza hay estudios a escala de parcela y de microcuenca. A escala de parcela (Hofstede, 2001) usó un simulador de lluvia sobre la parcela para su estudio. Encontró un incremento de los coeficientes de escorrentía (relación entre el volumen de escorrentía superficial sobre volumen de lluvia) de entre un 10 – 15% para una cobertura de pajonales (tomado como valor testigo) a valores de 30 – 50% para el primer evento de lluvia en el sitio quemado y entre 65 / 75% para otros eventos de precipitación. Además las pérdidas del suelo por la erosión para el pajonal fueron despreciables mientras para los sitios quemados o cultivados aumentaba considerativamente. A escala de microcuenca en el estudio (Buytaert, Célleri, et al., 2006) analiza el balance hídrico en dos microcuencas cercanas a la ciudad de Cuenca, Ecuador. Una (con un área de 2.58km<sup>2</sup> y ubicada entre los 3690 y 4100 m.s.n.m.) está cubierta por la vegetación típica de la hierba natural (pajonal) mientras la otra microcuenca (con un área de 1.59km<sup>2</sup> y ubicada entre los 3690 y 4100 m.s.n.m.) está fuertemente interferida por cultivos, pastoreo intensivo de



ganado además de tener obras de drenaje. Después de monitorear el caudal de salida de las cuencas, el clima y la precipitación, el análisis de los datos reveló que la variabilidad estacional en el páramo es extremadamente bajo. Esta propiedad es una de las principales razones el caudal base está bien sostenido (capacidad reguladora). Sin embargo, la evapotranspiración, representada por el coeficiente de escorrentía, es dos veces mayor en la cuenca con actividad antrópica (0.95) que en la de pajonal (0.42). En cuanto a la regulación el análisis de la variación en almacenamiento de agua (en páramo una variación anual de 25mm y en la cuenca interferida de 15mm) sugiere que esta capacidad se ve afectada en la cuenca con cultivos y pastoreo.

En relación al cambio o impacto por pastoreo en los páramos (De Bièvre et al., 2011) asegura que puesto la resistencia mecánica de los andosoles e histosoles es muy baja, al ser pisados estos se compactan y pierden así su extraordinaria capacidad de retención de agua. En (Rolando Célleri, 2010) se encuentran descritos dos estudios cuyos hallazgos se citan a continuación: (i) Quichimbo (2008) halló que a causa de esta compactación existe un aumento en la densidad aparente del suelo, subiendo esta de  $0.4\text{g/cm}^3$  en pajonal a de  $0.62\text{g/cm}^3$  en pastos y (ii) (Díaz & Paz, 2002) también encuentran aumentos en la densidad aparente desde valores entre  $0.2\text{-}0.31\text{g/cm}^3$  en páramos naturales a  $0.34\text{-}0.41\text{g/cm}^3$  para ganadería extensiva y fuertes aumentos de  $0,19\text{-}0,3\text{ g/cm}^3$  a  $0,81\text{-}0,86\text{ g/cm}^3$  en ganaderías permanentes intensivas (aunque valores de hasta  $0,99\text{ g/cm}^3$  fueron encontrados en ganaderías recientes).

Indudablemente la respuesta hidrológica de una microcuenca también está relacionada fuertemente con la cantidad e intensidad de lluvia o precipitación que exista, tal como lo demuestran los estudios citados. La variabilidad temporal y espacial de la precipitación en los páramos es muy grande (R Célleri, 2007) y en general existen grandes incógnitas en esta área.

Por ejemplo, Célleri R. (2007) realiza un estudio amplio sobre la variabilidad temporal y espacial sobre la cuenca del río Paute. Aquí analiza y estudia los períodos secos (de baja precipitación) en función de su ocurrencia y duración. Los eventos de precipitación considerados por la hidrología son los mayores a 1mm diario y los resultados demuestran la gran variabilidad espacial que tiene la lluvia dentro de una misma cuenca.

Todos los estudios revelan que una diferente cobertura (o cambiar una por otra) tienen diferentes impactos en la respuesta hidrológica del páramo a nivel de microcuencas. Estos impactos pueden ser alteraciones en la regulación hidrológica (lo que puede provocar períodos de estiaje o de inundaciones) o en la cantidad y calidad del agua. A pesar de esto es evidente que aún falta mucho por investigar alrededor de este tema. Por ejemplo en la claridad de las señales de impacto dependiendo del área de la cuenca que ha sido alterada falta mucho por estudiar, ya que la mayoría de las investigaciones se han centrado en

estudiar cuencas (casi) completamente alteradas. Asimismo es notable que existe un gran vacío de conocimiento en algunos tipos naturales de morfología, como son los sistemas lacustres.

Además las diferentes investigaciones presentan muchos métodos e indicadores diferentes, que son usados dependiendo del objetivo del estudio. (Olden & Poff, 2003) identificaron que existen 171 indicadores hidrológicos (descritos en el artículo) para la caracterización de regímenes de caudal que han sido usados y estudiados en diferentes publicaciones y, pone énfasis en solucionar dos problemas que se presentan al momento de realizar estudios hidrológicos: (i) el de elegir, de entre estos indicadores, los más apropiados de acuerdo a las características físicas de la zona donde se realiza el estudio y (ii), conocer si los indicadores que se eligen no sean redundantes. Los resultados muestran que existen grupos de indicadores que dan mejores resultados en diferentes tipos de sistemas de flujo (p. ej. flujos intermitentes, no intermitentes) y a su vez entre ellos cuales presentan mayor redundancia, con el fin de no utilizarlos en un mismo análisis puesto que el resultado será el mismo o muy parecido. Sin embargo siempre la última palabra la tiene el investigador concluye.

Tomando como base toda esta revisión de bibliografía notamos que los sistemas lacustres, a pesar de ser parte natural importante de la morfología de los páramos, no han sido estudiados hidrológicamente. Lo que nos deja con muchas incógnitas sobre el funcionamiento de los procesos hidrológicos del páramo. Es de vital importancia, abordar este tema de investigación con el fin de aumentar el sustento científico al momento de crear planes y proyectos para el manejo de recursos hídricos que sean sustentables, seguros y funcionales.

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivo General**

En función de lo identificado en el marco teórico, el presente estudio tiene por objetivo estudiar comparativamente el régimen hidrológico en tres microcuencas de páramo con diferente cobertura del suelo: una microcuenca con un sistema lacustre, una microcuenca con cobertura de pajonal natural inalterado y una microcuenca cubierta de pajonal que ha tenido cambios en su cobertura y uso de suelo en parte de su superficie, siendo estos cambios por pastoreo intensivo sobre pasto (cultivado) y pajonal, cultivos con labranza y plantaciones de pino y bosque nativo .

### **1.4.2 Objetivos Específicos**

Se identificaron tres temas que merecen particular atención para realizar el estudio propuesto.

El primero es la selección de índices que relacionen la cobertura de suelo y la precipitación con la respuesta hidrológica. Esto es buscar, elegir y aplicar indicadores que sean óptimos de acorde a las condiciones de clima, suelos y tipos de flujos existentes en las microcuencas de páramo a estudiar.

El segundo es la cuantificación y definición en forma preliminar, debido a la limitada disponibilidad de datos, de qué es un período seco y húmedo en el páramo. Este punto está relacionado a identificar la intensidad, duración y ocurrencia de las precipitaciones, con el fin de aportar conocimientos en esta área que está fuertemente relacionado con la respuesta hidrológica del páramo.

Finalmente, determinar y entender la importancia de las diferentes coberturas del suelo en el páramo a partir del análisis de los datos de precipitación y caudal. Con el fin de comprender que cobertura o uso del suelo tiene más o menos implicaciones, positivas y/o negativas en la hidrología del páramo.

## **2. Materiales y Métodos**

En este capítulo se describen las microcuencas y datos utilizados en el estudio (las secciones 2.1 y 2.2 respectivamente): las microcuencas de alta montaña, su ubicación, características morfológicas y topográficas; y los datos que resultaron del monitoreo realizado. Posteriormente se explican los métodos e indicadores que se usaron en la presente investigación, los que fueron divididos de la siguiente manera: Análisis comparativo de la lluvia registrada en los pluviógrafos (sección 2.3), análisis de la persistencia de los caudales bajos y altos (sección 2.4) y análisis de la reactividad y de la regulación hídrica de las cuencas de estudio (sección 2.5). Aunque si bien existen otras características de la respuesta hidrológica que podrían haber sido estudiados, debido a la disponibilidad de datos no se los pudo emplear.

### **2.1 Descripción de las microcuencas y monitoreo**

Las tres microcuencas de estudio se encuentran al sur del Ecuador al noroeste de la ciudad de Cuenca, en la cuenca del río Ishcayrumi cerca de la parroquia Soldados. Las cuencas se han nombrado como Pajonal Natural (coordenadas centroide: X 687552 Y 9674589), Pajonal Antropizado (coordenadas centroide: X 689279 Y 9675288) y Lacustre (coordenadas centroide: X 687542 Y 9674610), esta última ubicada dentro del Parque Nacional El Cajas. Las microcuencas fueron identificadas por medio de una imagen satelital y fotografías aéreas y posteriormente fueron localizadas con precisión en campo mediante un levantamiento topográfico de sus límites con G.P.S. (Quichimbo, 2011). En la Figura 2.1 se presenta la ubicación de las microcuencas.

La Tabla 2.1 indica las características físicas más importantes de las microcuencas. Las tres tienen un tamaño similar y se encuentran muy cerca una de la otra (los centros de gravedad se encuentran separados entre 1.7 y 5 km aproximadamente), por lo que el clima, las pendientes, los suelos y la geología son muy similares. Por lo tanto la única diferencia considerable entre las microcuencas es la cobertura vegetal. Esta cercanía entre las microcuencas hace que tengan condiciones hidrológicas muy similares lo que resulta lo que resulta en que se puedan usar para un estudio comparativo. De esta manera, las diferencias en los hidrogramas podrán atribuirse a su cobertura y uso de suelo ya que el resto de variables son muy parecidas.

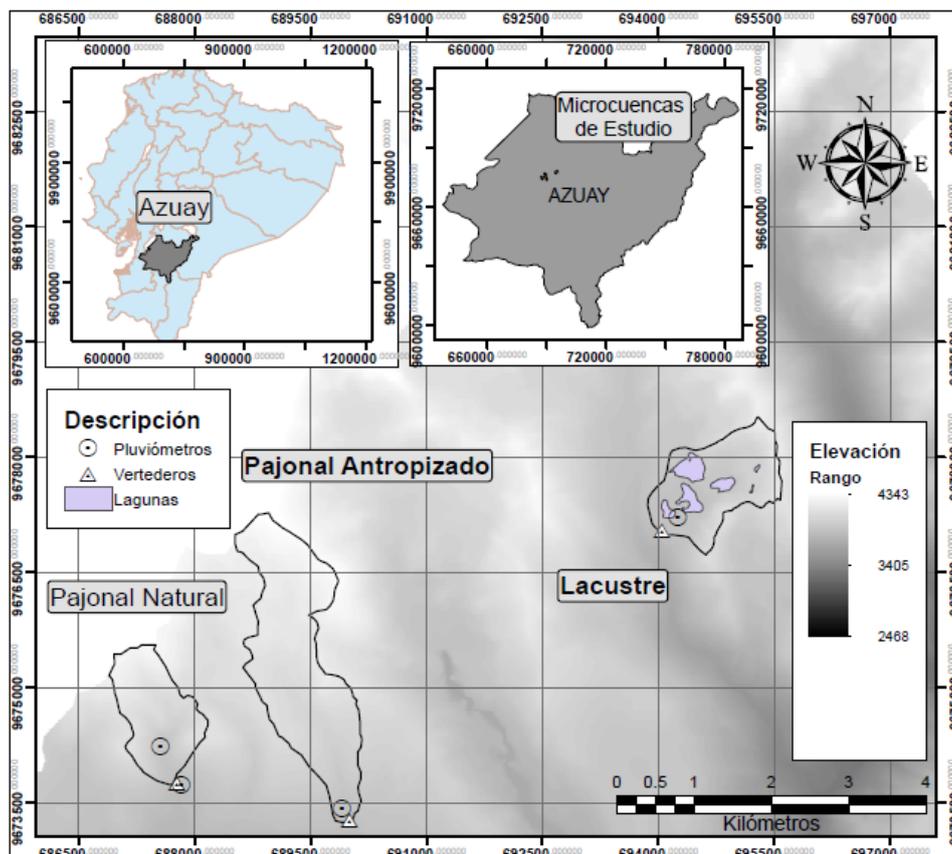
La microcuenca Pajonal Natural se encuentra en su totalidad fuera de influencias humanas y es de la que con mayor conocimiento hidrológico se cuenta por ser la cobertura más común de los páramos, por lo que se constituye en la cuenca base o de referencia; la cuenca Pajonal Antropizado tiene una gran influencia antrópica con diversas prácticas de alteración en la cobertura vegetal, de las cuáles se conoce poco de la potencial afección a la hidrología del páramo. Aquí el dueño del terreno donde se encuentra la cuenca de estudio mantiene que sus prácticas son amigables con el medio ambiente: el porcentaje de bosque de pinos sembrado ocupa solo una pequeña fracción de la cuenca. La cuenca Lacustre no presenta influencias antrópicas pero está formado por un pequeño sistema de lagunas, llamadas Estrellas Cocha, cuyo funcionamiento hidrológico se desconoce y es la cuenca de mayor interés para la presente investigación. Para conocer el área exacta de cada cobertura vegetal se realizó un levantamiento topográfico con G.P.S.

**Tabla 2.1.** Características biofísicas de las microcuencas de estudio.

Características	Microcuenca		
	Pajonal Natural	Pajonal Antropizado	Lacustre
Área	1.37 km <sup>2</sup>	3.29 km <sup>2</sup>	1.72 km <sup>2</sup>
Cobertura vegetal	Pajonal (93.2%), pasto (3.3%) y bosque secundario (3.5%)	Pajonal (85%), cultivos, plantaciones pino y bosque (15%). El 20 % de la cuenca tiene pastoreo intensivo sobre pajonal y pasto (cultivado)	Pajonal (80%), bosque secundario (6.5%) y cuerpos de agua (13.5%)
Tipo de suelo	Andosol	Andosol	Andosol
Rango de altitud	3740-4100 msnm	3740-4160 msnm	3740-4040 msnm
Pendiente promedio	32.90%	18.12%	30.62%

Las tres microcuencas fueron monitoreadas por el Centro de Hidrología y Clima del Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales (antes Grupo de Ciencias de la Tierra y del Ambiente) de la Universidad de Cuenca, desde el año 2011. La implementación del monitoreo se realizó por parte del proyecto PIC-08-460 y continuó como parte del proyecto PIC-11-715. El monitoreo consistió en la obtención de datos de precipitación y caudal, así como en la caracterización hidrofísica y química de suelos.

La precipitación se monitoreó de la siguiente manera: un pluviógrafo marca Davis con resolución de 0.254mm en la cuenca Pajonal Antropizado, dos pluviógrafos marca Davis con resolución de 0.254mm en la Pajonal Natural (uno cerca del centroide de la microcuenca denominado Pajonal Natural 1 y otro en la salida de la misma llamado Pajonal Natural 2) y un pluviógrafo marca Onset de resolución 0.2mm en la cuenca Lacustre. El caudal fue monitoreado en las tres microcuencas mediante transductores de presión llamados Drivers que toman alturas de nivel de agua cada 5 minutos en vertederos triangulares. Fotografías de los pluviógrafos y vertederos se encuentran en el Anexo 1 de este trabajo, donde además se puede observar la morfología de las microcuencas de estudio.



**Figura 2.1.** Ubicación de las microcuencas de estudio, pluviográficos y vertederos.



## 2.2 Datos

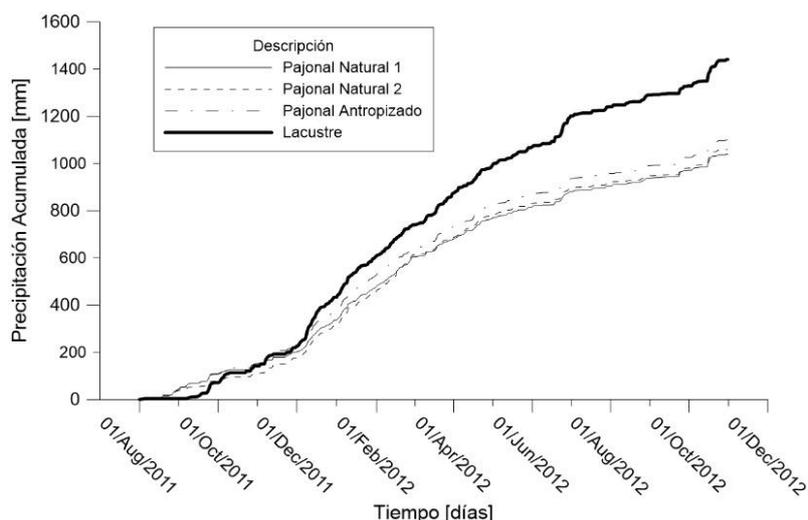
Todos los datos que resultaron del monitoreo fueron entregados para la presente investigación ya revisados y con una excelente calidad garantizada por el Centro de Hidrología y Clima, por lo que no existió trabajo previo al uso de los mismos.

Los datos instantáneos de precipitación de los cuatro pluviógrafos fueron entregados para un período común de 15 meses, desde el 01/ago/2011 al 30/oct/2012. Los mismos que fueron agregados a un paso de tiempo de 5 minutos, horario, diario y mensual.

Los datos de nivel de agua transformados a caudales fueron agregados a las mismas escalas temporales que la precipitación. Los períodos de datos de caudal para las cuencas Pajonal Antropizado y Lacustre fueron los mismos que para la precipitación: 15 meses entre el 01/ago/2011 al 30/oct/2012. Sin embargo por un problema en la medición de altura de agua durante el monitoreo en el vertedero de la microcuenca Pajonal Natural, los datos no tienen la misma duración, siendo el período coincidente de 6 meses, desde el 01/ago/2011 hasta el 31/ene/2012, periodo en el cual los datos tienen una excelente calidad.

Durante todo el periodo de estudio siempre existió escorrentía en las tres microcuencas, es decir que los flujos de agua no son intermitentes, sino continuos.

Con el fin de utilizar un solo pluviógrafo en la cuenca Pajonal Natural se realizó un análisis de los datos de precipitación. Este análisis consistió en dos partes: un gráfico de masa y la correlación entre los datos de los cuatro pluviógrafos (ambos durante el periodo de 15 meses). En la Figura 2.2 se muestra el gráfico de masas, el mismo que presenta una uniformidad en el aumento de volumen de lluvia en los cuatro pluviógrafos y un comportamiento casi idéntico entre los dos pluviógrafos de la cuenca Pajonal Natural. Las correlaciones entre los datos con una agregación de tiempo diaria resultaron con un coeficiente de Pearson de 0.96 entre los pluviógrafos 1 y 2 pertenecientes a la Pajonal Natural, 0.92 entre Pajonal Natural 1 y Pajonal Antropizada y de 0.90 entre Pajonal Natural 2 y Pajonal Antropizada.



**Figura 2.2.** Gráfico de masa de la precipitación registrada en los cuatro pluviógrafos pertenecientes a las 3 microcuencas durante el periodo de estudio de 15 meses.

Estos dos análisis nos permiten justificar el uso de los datos de precipitación registrada en el pluviógrafo Pajonal Natural 1, desde ahora único para ésta cuenca. Además se rectifica el hecho de que las tres microcuencas de estudio son aptas para un estudio comparativo, puesto que el comportamiento de la precipitación es muy similar, aunque los volúmenes difieran particularmente con la cuenca lacustre. El buen monitoreo fue primordial para lograr esto, puesto que las estaciones están a solo 5 km de distancia (la máxima distancia) y se encuentran a la misma altura (alrededor de los 3780 m.s.n.m.), las diferencias en el volumen registrado en la cuenca lacustre son entre el 23 y 27% mayores que los registros de las otras tres, es de un 5% entre la Pajonal Natural 1 con respecto al Pajonal Natural 2 y a la Pajonal Antropizado; y la diferencia es casi nula (0.17%) entre Pajonal Natural 1 y 2. Si no se hubieran colocado estos cuatro pluviógrafos las conclusiones hubieran sido muy diferentes.

### 2.3 Análisis comparativo de la lluvia registrada en los 3 pluviógrafos

Esta sección del estudio estuvo destinada a analizar las diferencias y semejanzas entre la precipitación registrada por los pluviógrafos pertenecientes a cada microcuenca y principalmente a analizar los períodos secos y húmedos que se presentan en el páramo en términos de la duración y de la ocurrencia de estos eventos. Para el análisis se utilizaron los datos agregados a un paso de tiempo diario y de un año hidrológico completo, es decir 12 meses seguidos (obtenidos del período de 15 meses), puesto que de esta manera ningún dato diario estuvo promediado con uno de otro año, lo que fuera posible de tenerse dos o más años de datos completos. Por la misma razón de tener una cantidad de datos limitada, este fue un estudio preliminar y los hallazgos deben realizarse

en el futuro cuando se disponga de con series más largas de datos para comprender mejor la climatología del lugar.

Se utilizaron los siguientes indicadores:

**Intensidad:** Se calculó la máxima intensidad horaria (mm/h) y diaria (mm/día) durante el año de estudio. Consistió en buscar el máximo valor de precipitación agregado a un paso de tiempo horario y diario respectivamente. Una sola intensidad para las agregaciones de tiempo más significantes fue suficiente para comparar el comportamiento espacial y temporal de la precipitación en las tres microcuencas.

**Duración de periodos húmedos y secos:** Consistió en analizar el número de eventos, con su respectivo porcentaje de excedencia, de días seguidos en que la lluvia se presenta bajo, sobre o igual a cierto umbral. Los umbrales para periodos secos fueron  $P = 0\text{mm}$  (días sin lluvia),  $P \leq 0.5\text{mm}$  (días secos desde el punto de vista meteorológico) y  $P \leq 1\text{mm}$  (día seco desde el punto de vista hidrológico) (R Céleri, 2007). Mientras para periodos húmedos los umbrales fueron  $P \geq \text{precipitación media diaria}$  y  $P \geq \text{precipitación mediana diaria}$ .

**Ocurrencia de periodos húmedos y secos:** Tanto para períodos húmedos como secos se procedió a analizar el número de eventos de días seguidos para varios umbrales (además de los propuestos en la duración), con el fin de encontrar el número de días en el año que la precipitación se presenta bajo o sobre un umbral.

## **2.4 Análisis de la persistencia de caudales bajos y altos**

En esta sección se analizó de manera comparativa la magnitud y duración de los caudales específicos en las cuencas Pajonal Antropizado y Lacustre. Se utilizaron los datos de caudales específicos ( $\text{l/s/km}^2$ ) del periodo de 15 meses y agregados a un paso de tiempo diario. No se utilizó la cuenca Pajonal Natural debido al poco tiempo de datos de caudal que tiene.

Se utilizaron los siguientes indicadores:

**Para la magnitud de caudales:** se calculó la media y la mediana de los caudales específicos, este último para observar si éstos se veían afectados por valores extremos. El coeficiente de variación también se calculó para cada cuenca, como la relación entre la desviación estándar y el promedio de todos los datos de caudal específico en el periodo de estudio. (Olden & Poff, 2003)

**Para la persistencia o duración de caudales:** De la curva de duración de caudales se eligieron dos umbrales para caudales específicos altos y bajos: percentiles 10, 25, 75 y 90 tal como (Olden & Poff, 2003) lo describe. Estos

umbrales fueron elegidos de la cuenca Pajonal Antropizado solamente, puesto que se será la cuenca base o de comparación. Para las dos cuencas (Pajonal Antropizado y Lacustre) se calculó el máximo, media y mediana de días continuos en que el caudal específico se mantiene bajo los umbrales bajos y sobre los umbrales altos.

Adicionalmente en esta sección se calculó el coeficiente de escorrentía ( $C = Q/P$ ), que es la relación que existe entre el volumen de caudal medido a la salida de la cuenca con respecto al volumen de precipitación registrada en la misma. Si bien, este indicador no es afectado por la persistencia de caudales, ayudó a entender en qué cuenca existen mayores pérdidas de agua, pues un elevado coeficiente de escorrentía indica que gran parte de la lluvia se transformó en escorrentía, mientras uno bajo indica pérdidas por interceptación, evaporación o transpiración.

## 2.5 Análisis de la reactividad y regulación hídrica

Esta última sección de la investigación fue un análisis de los caudales específicos de las tres microcuencas agregados a un paso de tiempo horario en el periodo de 6 meses, donde se tienen los caudales en las tres microcuencas simultáneamente.

El análisis de la reactividad se realizó por evento, es decir en los picos que se presentan en el hidrograma de salida. Para la regulación hídrica no existe un indicador o método directo que la cuantifique, por lo que se utilizaron varios índices a nivel de (i) eventos (en los mismos picos que se analiza la reactividad) y (ii) de todo el periodo de datos por lo que se utilizó un diagrama de cajas para visualizar los caudales específicos agregados a un paso horario.

### 2.5.1 Reactividad

La reactividad o sensibilidad a eventos de precipitación de las coberturas de cada microcuenca fue analizada para cada pico o evento con los siguientes índices, los mismos que suponen que los eventos de precipitación se presentaron casi al mismo tiempo y con igual intensidad en las tres cuencas de estudio, tal como se revisó y comprobó en la sección 2.2 de este capítulo mediante el análisis de correlación y gráficos de masa:

**Inicio del evento:** Se usó para analizar qué microcuenca reacciona más pronto. Es el día y hora exacta en que comienza un evento.

**Tiempo de ascenso en el hidrograma:** Usado para identificar qué cuenca llega más rápido al pico o valor más alto de caudal antes de empezar a descender. Es el tiempo en horas que le toma a la rama ascendente del hidrograma llegar a su



punto máximo desde que empieza el evento. Este indicador también formó parte del análisis de la regulación hídrica, tal como se explicará en la sección 2.5.2.

Tiempo de descenso en el hidrograma: Se usó para analizar que microcuenca se recupera más rápido luego de una crecida antes de otro evento. Es el tiempo en horas que le toma a la rama descendente del hidrograma bajar desde el punto más alto hasta el momento justo antes que empiece a subir nuevamente. Este indicador también formó parte del análisis de la regulación hídrica, tal como se explicará en la sección 2.5.2.

Tiempo del evento en hidrograma: La suma del tiempo de subida y bajada nos indica las duraciones de los eventos por microcuenca. Es el tiempo en horas que dura un evento visualizado en el hidrograma.

Tasa mediana de ascenso: Es la pendiente mediana horaria con la que el evento asciende hasta el pico visualizado en el hidrograma. Se usó la mediana para evitar errores por valores de caudal específico extremos que se pueden presentar en una o dos horas y afectan el ritmo real que tiene cada microcuenca hasta llegar al pico. Este indicador también formó parte del análisis de la regulación hídrica, tal como se explicará en la sección 2.5.2.

Tasa promedio de descenso: Al no verse afectado más que por la gravedad y la cobertura vegetal, la tasa promedio nos indica el ritmo de estabilización de caudales en cada cuenca. Es la pendiente promedio con la que desciende el evento, desde el pico hasta el momento justo antes que comience a subir de nuevo, visualizado en el hidrograma. Este indicador también formó parte del análisis de la regulación hídrica, tal como se explicará en la sección 2.5.2.

## **2.5.2 Regulación hídrica**

Para analizar la regulación hidrológica de cada cuenca se usaron indicadores de manera general en todo el periodo de estudio y otros (además de los usados para la reactividad) en cada evento que se visualizó en el hidrograma.

Los indicadores generales para el período de estudio fueron:

Caudal específico máximo: Este indicador está relacionado con inundaciones o crecidas que podrían presentarse aguas abajo en pequeñas escalas. Es el valor de caudal específico máximo registrado en el periodo de estudio.

Caudal específico mínimo: Relacionado con el problema más frecuente de la región que es la disponibilidad de agua. Es el valor de caudal específico mínimo registrado en el periodo de estudio.

Relación entre caudal específico máximo y caudal específico mínimo: Este indicador es un complemento del coeficiente de variación y fue usado para analizar qué microcuenca tiene menor y mayor rango de variabilidad en los caudales específicos. Es la relación entre el caudal específico máximo y caudal específico mínimo registrados en el periodo de estudio.

Coeficiente de variación: Es la relación entre la desviación estándar y el promedio de todos los datos de caudal específico en el periodo de estudio. Este indicador fue usado para analizar la variabilidad que existe de caudales en cada una de las cuencas, un menor valor indica mayor regulación.

Los indicadores usados por evento o pico del hidrograma fueron el tiempo de ascenso, tiempo de descenso, tasa mediana de ascenso y tasa promedio de descenso, siendo los mismos que se usaron para la reactividad, puesto que la sensibilidad a eventos de lluvia da indicios de mejores o peores condiciones de regulación. Adicionalmente se usó la relación entre el caudal específico máximo y caudal específico mínimo por evento, el mismo que muestra el rango de variabilidad que tiene cada evento en cada una de las microcuencas.

Finalmente se realizó un análisis comparativo visual entre las persistencias o permanencias para los diferentes porcentajes de exceso en las curvas de duración de caudales específicos de las tres microcuencas durante el período de estudio, con el fin de identificar, cuantificar y comparar los cambios en el comportamiento de las mismas.

### **3. Resultados y Discusión**

#### **3.1 Análisis comparativo de la lluvia registrada en los 3 pluviógrafos**

Tal como se mencionó en la sección 2.3 del Capítulo 2 se han calculado para cada una de las series de datos registradas en los pluviógrafos de las tres microcuencas las intensidades tanto horarias como diarias. Los resultados se muestran en la Tabla 3.1.

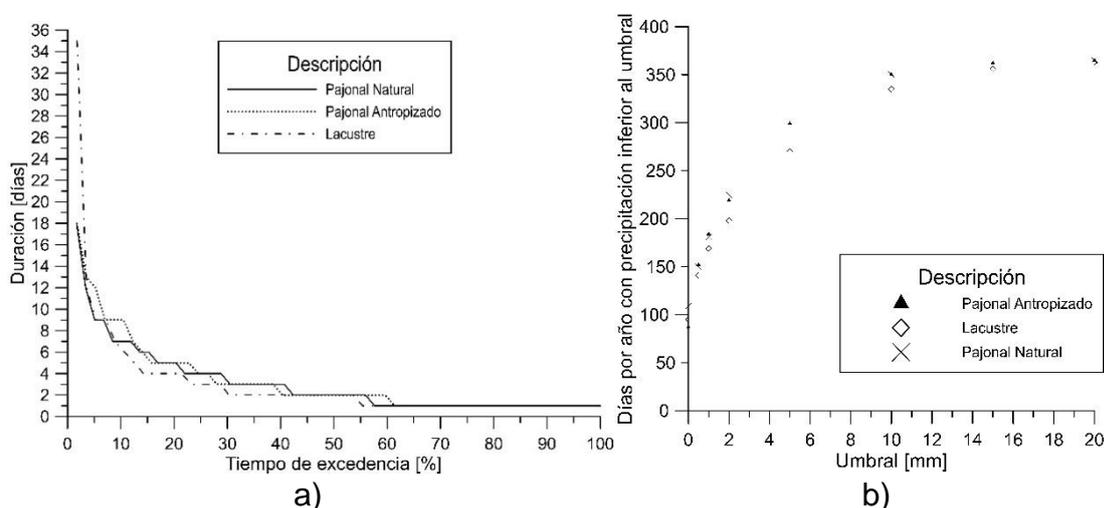
En la Tabla 3.1 se observa que en general las máximas intensidades horarias registradas son las mismas teniendo una diferencia máxima del 3% entre ellas. En cuanto a las intensidades diarias la Pajonal Natural y Lacustre registra valores semejantes 30 y 25% mayores que la Pajonal Antropizado. Esto indica que aunque existen pequeñas diferencias en las intensidades (al menos en agregaciones de tiempo horarias) existe una gran variabilidad espacial en las precipitaciones, puesto que según el conocimiento que se tiene en el comportamiento de las precipitaciones en el páramo se esperarían dos cosas que no se reflejan en estos resultados: que las cuencas más cercanas tengan

intensidades similares y que a escalas de tiempo menor existan mayores diferencias.

**Tabla 3.1.** Intensidades diarias [mm/día] y horarias [mm/h] registradas en las estaciones pluviométricas durante un año hidrológico en cada una de las tres microcuencas de estudio.

Intensidades	Microcuencas		
	Pajonal Natural	Pajonal Antropizado	Lacustre
Máxima horaria [mm/h]	12.89	12.60	13.30
Máxima diaria [mm/día]	34.03	23.56	31.52

Para el estudio de los periodos secos y húmedos en las tres microcuencas de páramo, tal como se explicó en el Capítulo 2 en la sección 2.3 se lo realizó en términos de su duración y de su ocurrencia. En la Figura 3.1 se muestra en análisis de los periodos secos, donde para su duración se presenta como umbral la precipitación  $P \leq 1\text{mm}$ , ya que éste es el de mayor relevancia desde el punto de vista hidrológico; sin embargo en el Anexo 2 de este trabajo se presentan los análisis para los umbrales de  $P \leq 1\text{mm}$  y  $P = 0\text{mm}$  que pueden ser de interés para fines comparativos, meteorológicos u otros.



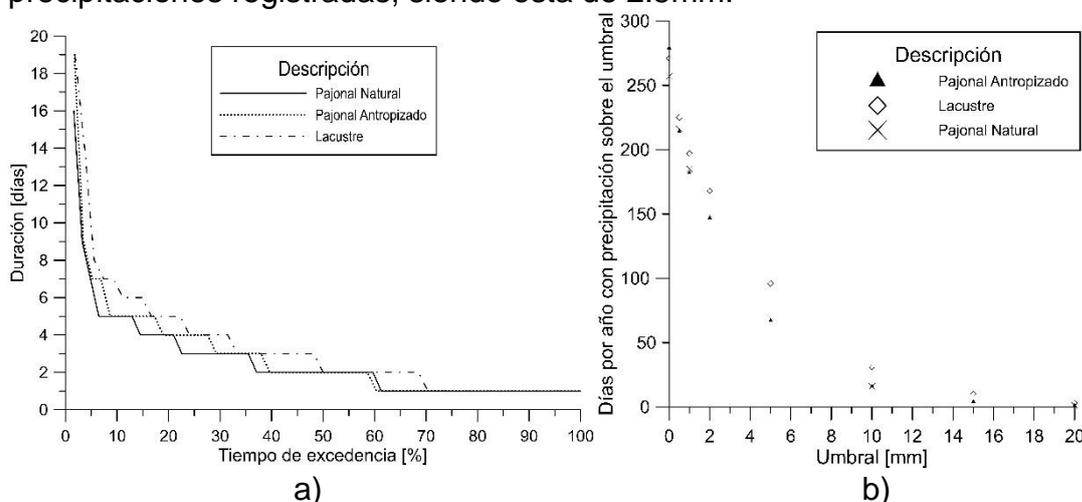
**Figura 3.1.** Análisis de periodos secos en las tres estaciones pluviométricas pertenecientes a cada microcuenca en términos de a) su duración (para días con  $P < 1\text{mm/día}$ ) y b) su ocurrencia.

La Figura 3.1a muestra pequeñas diferencias entre los pluviógrafos de las microcuencas de Pajonal Natural y Pajonal Antropizado, donde para casi todos los tiempos de excedencia muestran la misma duración y tienen el mismo

número de días seguidos máximo con precipitaciones menores a 1 mm por día (18 días). La estación ubicada en la microcuenca lacustre es la que mayor diferencia presenta pues para todo tiempo de excedencia la duración de las precipitaciones bajo el umbral de sequía hidrológica es menor o igual a las duraciones de las otras dos estaciones. En forma general se observa que alrededor de un 57% de las veces que se presentan días secos, durarán solamente un día, mientras el 10% de las veces se presentarán por más de 7 días, con posibilidad de eventos extraordinarios de sequía de entre 18 a 35 días consecutivos un 2% de las veces.

Mientras para la ocurrencia de días secos no consecutivos (Figura 3.1b) durante un año se esperan más días secos en la cuenca Pajonal Antropizado, seguida por la Lacustre y la Pajonal Natural, esto para cualquier umbral de precipitación, excepto cuando la precipitación es cero, pues es este caso el orden se invierte. En forma general se espera que alrededor de un tercio del año los días sean secos desde el punto de vista hidrológico, mientras que 100 días al año aproximadamente no tendrán precipitación alguna.

En la Figura 3.2 se muestra el análisis de los periodos húmedos, donde para su duración se presenta como umbral la precipitación  $P \geq$  mediana de las precipitaciones registradas, la misma que resultó ser de 1.5mm. De igual manera en el Anexo 2 se muestran los análisis para una precipitación  $P \geq$  media de las precipitaciones registradas, siendo esta de 2.5mm.



**Figura 3.2.** Análisis de periodos húmedos en las tres estaciones pluviométricas pertenecientes a cada microcuenca en términos de a) su duración (para días con  $P > 1.5$ mm/día) y b) su ocurrencia.

En la Figura 3.2a se observa que para todo tiempo de excedencia, la microcuenca Lacustre espera duraciones más largas de días húmedos con precipitaciones mayores a 1.5mm (mediana de las precipitaciones durante el año hidrológico), seguida por la Pajonal Antropizado y la Pajonal Natural, excepto alrededor del 60% donde estas dos últimas se invierten. En forma general se

observa que alrededor de un 70% de las veces que se presentan días húmedos, durarán solamente un día, mientras el 10% de las veces se presentarán por más de 5 días, con posibilidad de eventos extraordinarios un 2% de las veces donde la precipitación sobre este umbral llega a los 16 y 18 días seguidos.

En cuanto a la ocurrencia de días lluviosos (Figura 3.2b) en un año se esperan más días húmedos en la cuenca Pajonal Natural, seguida por la Lacustre y la Pajonal Antropizado, esto para cualquier umbral de precipitación, excepto cuando la precipitación es cero, pues es este caso el orden se invierte. En forma general se espera que alrededor de la mitad del año los días sean húmedos, con una precipitación mayor a la mediana, mientras alrededor de 260 días al año se espera que exista precipitación alguna.

A pesar sus pequeñas diferencias, las Figuras 3.1 y 3.2 muestran que las precipitaciones en los tres pluviógrafos son muy similares, por lo que se recalca que los datos tomados por los mismos son aptos para un estudio comparativo.

### 3.2 Análisis de la persistencia de caudales bajos y altos

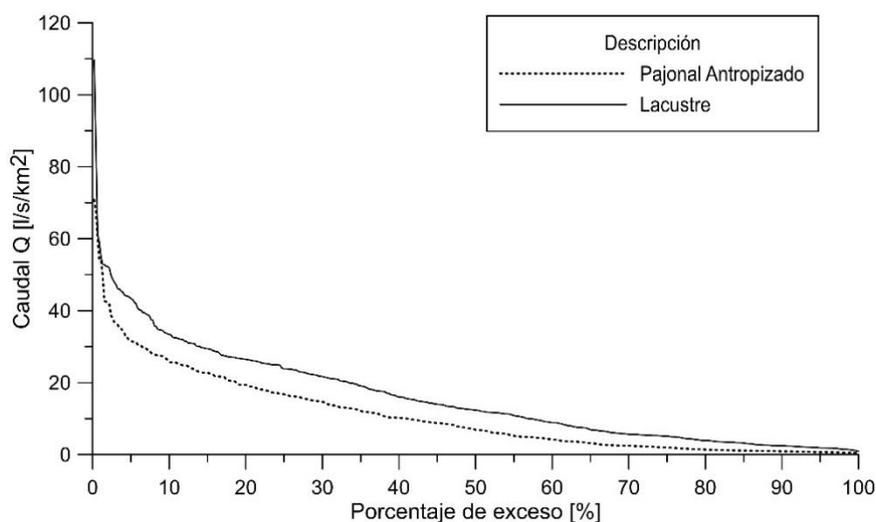
Para realizar este análisis, lo primero que se realizó fue un estudio de la magnitud de los caudales de las cuencas Pajonal Antropizado y Lacustre. Estos resultados se presentan en la Tabla 3.2.

**Tabla 3.2.** Indicadores de la magnitud de caudales específicos agregados a un paso de tiempo horario. Media o promedio [l/s/km<sup>2</sup>], mediana [l/s/km<sup>2</sup>] y coeficiente de variación [adimensional] de los datos durante el periodo de estudio en la microcuenca Pajonal Antropizado y Lacustre.

Indicador	Microcuenca	
	Pajonal Antropizado	Lacustre
Media [l/s/km <sup>2</sup> ]	10.81	15.97
Mediana [l/s/km <sup>2</sup> ]	6.86	12.33
Coeficiente de Variación []	1.05	0.87

Como se aprecia en la Tabla 3.1 la microcuenca Lacustre tiene un promedio en los caudales específicos diarios cerca de un 33% mayor a la Pajonal Antropizado, mientras la mediana es de cerca 45% mayor. Esto se debe a que en la microcuenca antropizada, además de presentarse caudales mayores, existen caudales extremos, en este caso altos, que influyen de mayor manera el promedio. Hecho que es corroborado por el coeficiente de variación que es 17% mayor en la cuenca Lacustre, el mismo que indica una menor variabilidad de caudales en el periodo de estudio.

Posteriormente se procedió a la comparación de la persistencia o duración de caudales específicos entre la Lacustre y la Pajonal Antropizado, teniendo ésta última como cuenca de referencia o cuenca base. Para esto se utilizaron como umbrales altos los percentiles 75 y 90 y umbrales bajos los percentiles 10 y 25, los mismos que fueron elegidos de la curva de duración de caudales (Figura 3.3). Luego se calcularon el máximo, mínimo, media y mediana de días continuos en que el caudal se mantiene sobre los umbrales altos y bajo los umbrales bajos. Estos resultados se presentan en la Tabla 3.3.



**Figura 3.3.** Curva de duración de caudales específicos [l/s/km<sup>2</sup>] agregados a un paso de tiempo diario en las cuencas Pajonal Antropizado y Lacustre durante el periodo de estudio.

La Figura 3.3 muestra que los caudales específicos denominados bajos en (menores al percentil 25), para la cuenca Pajonal Antropizado, son excedidos un 75% de las veces al valor de 1.71l/s/km<sup>2</sup>, los caudales específicos llamados extremos bajos (menores al percentil 10) son excedidos un 90% de las veces al valor de 0.85l/s/km<sup>2</sup>, los caudales específicos denominados altos (mayores al percentil 75) son excedidos un 25% de las veces del valor de 12.02l/s/km<sup>2</sup> y que los caudales específicos denominados como extremos altos (mayores al percentil 90) son excedidos un 10% de las veces del valor de 24.53l/s/km<sup>2</sup>. Además se aprecia que para cualquier porcentaje de exceso la cuenca Lacustre presenta caudales mayores, lo que indica que mantiene flujos de agua mayores durante todo el periodo de estudio.

**Tabla 3.3.** Comparación en la persistencia o duración de caudales específicos [l/s/km<sup>2</sup>] diarios bajo los umbrales percentil 10 y 25 y sobre los umbrales percentil 75 y 95 de la cuenca Pajonal Antropizado. La comparación se realiza para el número de días continuos máximo, mínimo, promedio y mediana que se presentan durante el periodo de estudio en la cuenca base y en la Lacustre.

Indicador [número de días consecutivos]	Menores P10 Q=0.85 l/s/km <sup>2</sup>	Menores P25 Q=1.71 l/s/km <sup>2</sup>	Mayores P75 Q=12.02 l/s/km <sup>2</sup>	Mayores P90 Q=24.53 l/s/km <sup>2</sup>	
	Extremos bajos	Bajos	Altos	Extremo altos	
<b>Pajonal Antropizado</b>	<b>Máximo</b>	18.00	24.00	35.00	8.00
	<b>Promedio</b>	5.75	12.78	7.19	2.56
	<b>Mediana</b>	4.00	14.00	3.50	2.00
<b>Lacustre</b>	<b>Máximo</b>	1.00	7.00	47.00	17.00
	<b>Promedio</b>	1.00	3.38	13.69	5.26
	<b>Mediana</b>	1.00	3.00	10.00	2.00

Los registros de la Tabla 3.3 confirman el hecho que la microcuenca Lacustre tiene caudales superiores que la Pajonal Antropizado durante el periodo de estudio, puesto que para los mismos umbrales de caudales específicos se notan algunas cosas importantes: La duración en días continuos de los caudales bajos y extremo bajos son mayores en la cuenca antropizada que en la Lacustre, mientras para caudales altos y extremo altos la Lacustre presenta duraciones mayores, por ejemplo para los días con caudales extremos bajos, en la cuenca antropizada se presentan en promedio con una duración de casi 6 días seguidos mientras en la Lacustre existe un solo día en el periodo de análisis, es decir, un evento sumamente extremo y único. Por otro lado, los días con caudales extremos altos se presentan – en promedio – con una duración más del doble de veces. Incluso para los umbrales altos y bajos (no extremos) existe una diferencia notable en sus duraciones, donde para caudales menores al percentil 25 en la cuenca antropizada tiene duraciones medias cerca de 3 veces mayores y valores medianos cerca de 5 veces más altos, además de presentar en el extremo máximo un valor de días seguidos 3.5 más alto; mientras que para caudales mayores al percentil 75 éstas tendencias se invierten, encontrándose valores de días seguidos en promedio casi el doble de altos, una mediana 3 veces mayor y un máximo 0.25% mayor.

Estas diferencias eran de esperarse, puesto que en la microcuenca Lacustre se registraron lluvias mayores a la Pajonal Antropizado, sin embargo puede deberse también a la presencia de las lagunas que mantienen un flujo de agua mayor, puesto que actúan como un reservorio natural y constante.

Los coeficientes de escorrentía se obtuvieron para cada una de las microcuencas. La precipitación pasada a mm fue calcula asumiendo que esta es

contante en toda el área de la microcuenca. Los resultados que se presentan en la Tabla 3.4 indican que en la cuenca Lacustre existe alrededor de un 14% menos de pérdidas de la precipitación que en la cuenca antropizada (que pueden ser por transpiración, intercepción o evaporación).

**Tabla 3.4.** Coeficientes de escorrentía totales para el periodo de estudio en las microcuencas Pajonal Antropizado y Lacustre. Los volúmenes de caudal fueron calculados con una agregación de tiempo horaria.

Microcuenca	Coeficiente de escorrentía ( C )		C [ ]
	Lluvia [mm]	Caudal	
Pajonal Antropizado	1099.79	427.56	0.39
Lacustre	1440.95	630.34	0.44

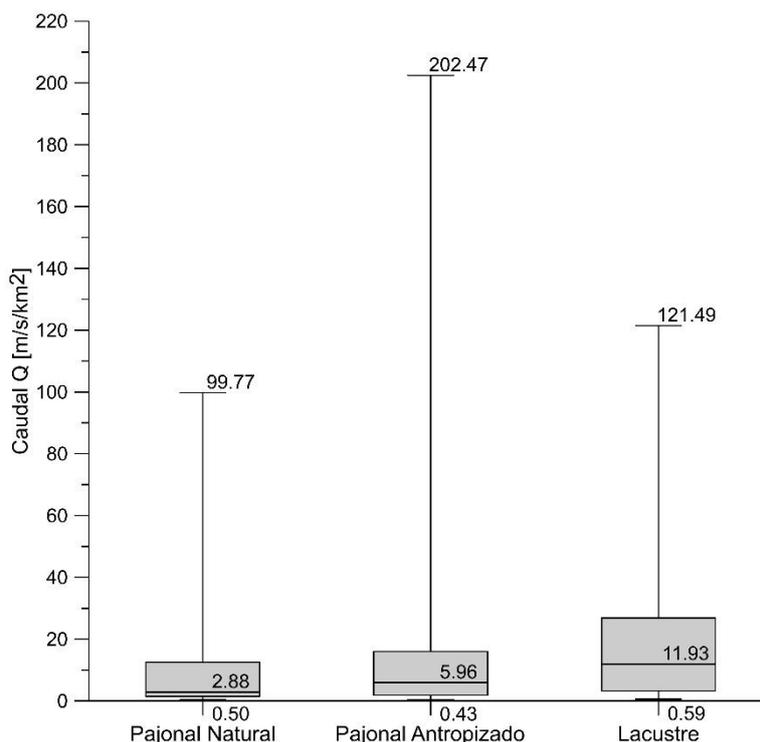
Este resultado en la diferencia de C es tal como se lo esperaba, pues la cuenca con lagunas presenta caudales más altos como se vio anteriormente, además de tener cierta área que no está afectada por intercepción o transpiración (sobre las lagunas). Esta diferencia se debe también a las diferentes afecciones en el uso y cobertura del suelo que tiene la cuenca antropizada ya que la lacustre en toda su área alrededor de las lagunas está cubierta de pajonal y está completamente inalterada.

### 3.3 Análisis de la reactividad y regulación hídrica

Con el fin de ilustrar de mejor manera la distribución de los caudales específicos diarios de las tres microcuencas de estudio se realizó un diagrama de cajas (Figura 3.4).

La cuenca Pajonal Antropizado es la que presenta un mayor rango con un valor de 202.46, seguido por la Lacustre con un rango igual a 120.89 y finalmente la cuenca Pajonal Natural que presenta un rango de 99.27. La cuenca con lagunas es la que tiene datos con mayor dispersión en su rango intercuartil (datos dentro de la caja) con un valor de 23.55, seguido por la antropizada con 14.08 y finalmente por la de pajonal inalterado con 11.03. De este rango intercuartil en las tres microcuencas se muestra una mayor dispersión el los datos altos ubicados entre la mediana y el percentil 75 que los bajos ubicados entre la mediana y el percentil 25, teniendo la Lacustre una división del 64.14% y 36.86% respectivamente, la de Pajonal Antropizado 71.08% y 28.92% y Pajonal Antropizado 87.47% y 12.53%. De ésta última observación también notamos que

las medianas de los caudales específicos son mayores según es mayor el rango intercuartil.

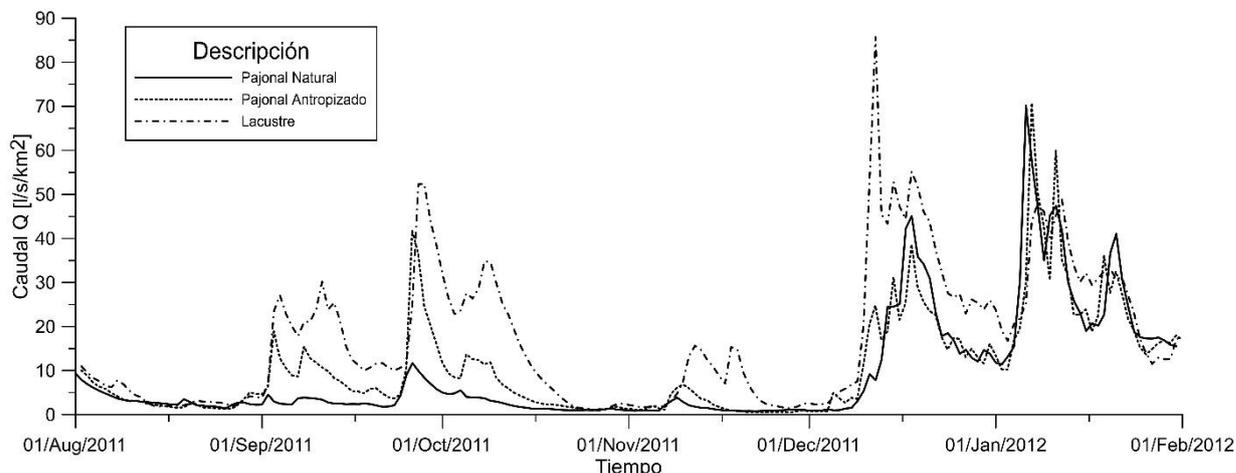


**Figura 3.4.** Diagrama de cajas de la distribución de caudales específicos [ $\text{l/s/km}^2$ ] en las tres microcuencas de estudio. La caja central encierra los datos contenido entre los cuartiles 0.25 y 0.75 y la línea central es la mediana (mostrada en el gráfico), los extremos indican los valores máximo y mínimo (descritos es el gráfico).

De éstos resultados observamos que la cuenca Lacustre presenta una mayor dispersión entre sus caudales dentro de la caja y la Pajonal Antropizado mayor dispersión en los bigotes, mientras la de pajonal natural presenta la mayoría de sus caudales muy condensados. Que la cuenca Pajonal Antropizado presente una variabilidad menor que la Lacustre, a excepción para los valores altos y mínimos indica que es la que tiene los caudales más extremos entre las tres cuencas.

Estos datos quieren decir que la cuenca antropizada es la que menor regulación hídrica ofrece (tal como se lo esperaba), pues tiene caudales extremos máximos y mínimos, seguida por la lacustre y finalmente la cuenca con pajonal inalterado. Sin embargo al analizar solo el rango intercuartil y el valor de la mediana éstas afirmaciones no son del todo correctas, por lo que se requiere de una mayor información, la misma que es la ofrecida por otros indicadores que se analizan más adelante.

Además del diagrama de cajas se realizó el hidrograma de salida para las tres microcuencas durante el periodo de estudio, estos se presentan en la Figura 3.5.



**Figura 3.5.** Hidrogramas de respuesta de las tres microcuencas en el periodo de estudio. Los caudales específicos [l/s/km<sup>2</sup>] se encuentran agregados a un paso de tiempo horario.

La Figura 3.5 muestra que cuando hay precipitaciones capaces de generar hidrogramas, éstas ocurren en las 3 cuencas simultáneamente, por lo que los eventos en las 3 cuencas son coincidentes.

Por otro lado existe un comportamiento similar en los hidrogramas de salida entre las tres microcuencas, en especial para los eventos de crecida ya que se presentan casi simultáneamente en los tres hidrogramas con ascensos y descensos similares. La excepción a esto se encuentra durante el último evento, donde los datos muestran que existen disminuciones de niveles de agua para los eventos de crecida en la cuenca Lacustre en comparación a las otras dos cuencas y/o un aumento en las de pajonal antropizado e inalterado. Esta diferencia no se debe a un cambio en la precipitación de las microcuencas, pues ésta fue analizada pero no incluida en este trabajo; sino al parecer por iniciar la crecida con niveles de caudal muy altos en comparación a los anteriores cuatro eventos que se visualizan en el periodo de estudio. Esto podría indicar que existe mayor almacenamiento en los meses anteriores en los suelos de las cuencas con pajonal, lo cual sería el responsable de éste cambio en el hidrograma. Sin embargo esta hipótesis deberá ser comprobada en otros estudios donde existan registros de periodos mayores y donde existan otros eventos que se comporten de manera similar con el fin de estudiarlos y descartar o afirmar que es un caso aislado tal como resulta en la presente investigación.

De los hidrogramas se han identificado 4 eventos (también llamados picos) donde se analizaron la reactividad o sensibilidad a eventos de crecida y la regulación hídrica que tiene cada una de las microcuencas. Los mismos que se estudiaron desde que iniciaron hasta el punto justo anterior donde se identificó una nueva subida del hidrograma, esto a escala horaria, y fueron numerados por su orden de aparición. La fecha y hora de inicio y fin de los cuatro eventos que se identificaron para su estudio se presentan en la Tabla 3.5. El quinto evento se descartó de este estudio por las razones explicadas anteriormente y por ser un caso aislado donde sus resultados no serán significantes al no poder ser comparados con otros eventos similares.

### 3.3.1 Reactividad

Con los procedimientos indicados en la sección 2.5.1 del Capítulo 2 se calcularon para cada uno de los picos los diferentes indicadores con el fin de comparar la reactividad o sensibilidad de las microcuencas a eventos de precipitación. Los indicadores son el inicio del evento [fecha y hora], el tiempo que le toma al evento en llegar a su caudal máximo [horas], el tiempo de descenso de los niveles de agua hasta que vuelva a subir [horas], la tasa mediana de subida hasta el caudal máximo [ $l/s/km^2/h$ ], la tasa promedio de bajada hasta que los niveles de agua vuelven a subir [ $l/s/km^2/h$ ] y la relación entre el caudal máximo específico y caudal mínimo específico registrado en el periodo de estudio, cuyos resultados se presentan en la Tabla 3.5. Esta comparación, al igual que la realizada con la regulación hídrica que se analiza posteriormente, es posible gracias a que los eventos de precipitación se presentaron casi al mismo tiempo y con intensidad muy similar, esto en base a los coeficientes de correlación mostrados en la sección 2.2 del Capítulo 2.

En la Tabla 3.5 observamos que en los eventos 1 y 4 la cuenca Lacustre inicia primero y la cuenca Pajonal Natural lo hace en los eventos 2 y 3, aunque como lo hacen por pocas horas (en tres de los cuatro eventos, exceptuando el evento 2) de diferencia se podría decir que lo hacen a tiempos similares; mientras la cuenca Pajonal Antropizado reacciona para los cuatro eventos al último con diferencias de 3 horas hasta 26 con la más cercana. Aunque se esperaba una respuesta más rápida en la cuenca antropizada por los efectos de los sembríos y el ganado, parece que la interacción con los otros usos que se le da al suelo como las plantaciones de pino y bosque retrasan la respuesta.

**Tabla 3.5.** Comparación de la reactividad y de la regulación hídrica para los cuatro eventos en las tres microcuencas de estudio.

Indicadores	Evento 1			Evento 2		
	Pajonal Natural	Pajonal Antropizado	Lacustre	Pajonal Natural	Pajonal Antropizado	Lacustre
Inicio [Fecha]	31/ago/2011 09:00	31/ago/2011 10:00	31/ago/2011 07:00	21/sep/2011 08:00	22/sep/2011 20:00	22/sep/2011 09:00
Fin [Fecha]	04/sep/2011 10:00	06/sep/2011 10:00	06/sep/2011 08:00	03/oct/2011 05:00	03/oct/2011 18:00	03/oct/2011 00:00
Tiempo Ascenso [horas]	46	28	41	60	38	71
Tiempo Descenso [horas]	51	79	61	102	124	113
Tiempo Evento [horas]	97	107	102	162	162	184
Tasa Mediana Ascenso [l/s/km <sup>2</sup> /h]	0.167	0.360	0.397	0.101	0.584	0.411
Tasa Promedio Descenso [l/s/km <sup>2</sup> /h]	-0.127	-0.228	-0.285	-0.161	-0.217	-0.430
Q <sub>máx</sub> /Q <sub>mín</sub> []	3.210	6.461	9.742	9.352	20.472	6.373
Indicadores	Evento 3			Evento 4		
	Pajonal Natural	Pajonal Antropizado	Lacustre	Pajonal Natural	Pajonal Antropizado	Lacustre
Inicio [Fecha]	05/nov/2011 07:00	06/nov/2011 21:00	06/nov/2011 08:00	06/dic/2011 07:00	07/dic/2011 13:00	05/dic/2011 05:00
Fin [Fecha]	20/nov/2011 07:00	19/nov/2011 13:00	16/nov/2011 04:00	12/dic/2011 09:00	12/nov/2011 15:00	13/dic/2011 01:00
Tiempo Ascenso [horas]	49	24	86	57	32	87
Tiempo Descenso [horas]	159	187	78	27	31	44
Tiempo Evento [horas]	208	211	164	84	63	131
Tasa Mediana Ascenso [l/s/km <sup>2</sup> /h]	0.072	0.362	0.211	0.087	0.550	0.183
Tasa Promedio Descenso [l/s/km <sup>2</sup> /h]	-0.079	-0.135	-0.251	-0.559	-2.312	-1.961
Q <sub>máx</sub> /Q <sub>mín</sub> []	15.269	21.796	10.976	29.148	30.992	29.333

Existe una tendencia marcada en los tiempos de ascenso, donde la cuenca con pajonal antropizado le tomó en promedio la mitad de tiempo menos en llegar al pico que a las otras dos cuencas, para los cuatro picos, seguida por el pajonal inalterado en tres de los cuatro picos. Esta tendencia cambia en los tiempos de descenso donde le tomó llegar al final del evento un considerable tiempo mayor a la cuenca Pajonal Antropizado que a las otras dos cuencas en tres de los cuatro eventos, mientras las dos otras cuencas descendieron más rápido en dos eventos cada uno. Sumados los tiempos de ascenso y descenso la duración mínima de un evento es de 63 horas (evento 1 en la cuenca Pajonal Antropizado) y la máxima de 211 horas (en el evento 3 en la cuenca antropizada); en este indicador el dato con mayor relevancia la tiene la cuenca Pajonal Natural, la cual tuvo en tres de los cuatro eventos menor duración que las otras dos cuencas.

En las tasas de ascenso medianas, tal como se esperaba por los resultados en los tiempos de subida ya que mantienen relación, presentaron valores mayores la cuenca Pajonal Antropizado en tres de los cuatro eventos, siendo la excepción el primer pico donde la diferencia es menor a  $0.04 \text{ l/s/km}^2/\text{h}$ , mientras los menores se presentan en la cuenca cubierta por pajonal inalterado. En las tasas de descenso promedio no existió tanta relación como se esperaba con los tiempos de descenso, puesto que la cuenca Lacustre fue la que descendió más rápido en el hidrograma en tres de los cuatro eventos, mientras la microcuenca Pajonal Natural fue la que bajo más lento (entre 3 y 5 veces más lento), en los cuatro eventos estudiados. Estos resultados indican que las diferentes afecciones a las coberturas naturales de suelo hacen que el agua escurra más rápido, incluso que un sistema lacustre que no presenta obstáculos como lo hace la vegetación sobre la tierra. Aunque éstos obstáculos si toman su importancia al momento de regular el nivel de agua, puesto que las pendientes de bajada en los picos del el hidrograma son menores en las cuencas con cobertura vegetal, en especial una cobertura natural.

Según los resultados la mayor reactividad se presenta para la cuenca Pajonal Antropizado, esto debido a que las afecciones que tiene el suelo por el cambio en su uso y cobertura hacen que el agua precipitada escurra más rápidamente provocando mayores picos de una manera más rápida. Sin embargo la microcuenca con lagunas es la que reacciona primero pues ésta mantiene flujos de agua constantes, los mismos que al presentarse un evento de lluvia aumentan más rápido que las otras dos cuencas, donde primero debe realizarse un proceso de saturación del suelo, que le toma más tiempo a la cuenca antropizada por la interacción de las afecciones humanas que tiene.

### **3.3.2 Regulación hídrica**

Los resultados de los indicadores usados por evento o pico identificados en el hidrograma, los mismos que fueron explicados en la sección 2.5.1 y 2.5.2 del



Capítulo 2, están presentados en la Tabla 3.5, ya que algunos de ellos fueron usados para analizar la reactividad de las microcuencas en estudio.

Según los registros de la Tabla 3.5 y los resultados en la reactividad de las microcuencas existen tendencias en la cuenca Pajonal Antropizado para tener menores tiempos de ascenso durante los eventos que las otras dos cuencas que presentan tiempos menores en dos eventos cada una y también una tendencia de tiempos de descenso mayores donde solo en un caso fue mayor el tiempo de ascenso de la Lacustre. Esto quiere decir, tomando en cuenta la alta regulación que tiene el páramo en su estado natural (cuenca de Pajonal Natural), que tal como se esperaba los efectos del cambio de uso de suelo han perjudicado esta característica fundamental del páramo, puesto que para eventos de precipitación similares el volumen de agua que sale lo hace en tiempos menores pudiendo provocar pequeñas crecidas o sequías que tal vez no se presentarían en una cuenca inalterada, mientras que la Lacustre muestra características de comportamiento semejantes a la de Pajonal Natural, lo que indica una alta regulación, la misma que podría ser atribuida a las lagunas o a la vegetación que de igual manera es inalterada.

Analizando las tasas medianas de ascenso se observa una fuerte relación con los tiempos de ascenso en las 3 microcuencas. Por otro lado, el estudio de las tasas promedio de descenso muestra que la microcuenca Lacustre presenta valores mayores que las otras dos, donde la cuenca inalterada es la que más baja tasa promedio presenta con valores de 3 a 5 veces menores en comparación a las otras dos cuencas. Estos resultados ratifican la pérdida de regulación en la cuenca antropizada, puesto que para posibles crecidas después de un evento de precipitación, la rápida velocidad de aumento en el nivel de agua podría causar desbordamientos, además en comparación con la cuenca inalterada el rápido descenso en los caudales en la bajada del hidrograma podría causar que pequeñas sequías tengan mayor duración. A diferencia de los tiempos de descenso, donde la Lacustre muestra una alta regulación, según la tasa promedio, este hecho es refutable ya que al igual que en la microcuenca con pajonal antropizado presenta pendientes altas en los descensos de los picos del hidrograma; sin embargo, la presencia de las lagunas (que funcionan como reservorio) podrían ser la razón de la alta tasa puesto que éstas aportan con agua al efluente además del agua que llega por las lluvias.

El último indicador presentado en la Tabla 3.5 es la relación entre el caudal específico máximo y mínimo presente en cada evento. Tal como se esperaba la cuenca Pajonal Antropizado muestra un mayor valor, lo que indica mayor rango de caudales de entre el 6% al 60%, en los tres de los cuatro eventos, mientras las dos otras cuencas alternan los rangos menores. Esto demuestra un indudable parecido en la alta regulación que tiene la cuenca Lacustre con la Pajonal Natural y asimismo una pérdida de esta característica por parte de la cuenca con

cobertura afectada, debido a que es más propenso de presentar caudales extremadamente bajos y altos.

Otra parte del análisis en la regulación hídrica en las tres microcuencas fue el uso de indicadores generales para todo el periodo de estudio, cuyos resultados se presentan en la Tabla 3.6. Estos indicadores son el caudal máximo específico [l/s/km<sup>2</sup>], el caudal mínimo específico [l/s/km<sup>2</sup>], la relación entre el caudal específico máximo y caudal específico mínimo [adimensional] y el coeficiente de variación [adimensional].

**Tabla 3.6.** Indicadores para la comparación en la regulación hídrica de las tres microcuencas de estudio.

Indicadores	Pajonal Natural	Pajonal Antropizado	Lacustre
Q max [l/s/km <sup>2</sup> ]	99.77	202.47	121.49
Q min [l/s/km <sup>2</sup> ]	0.50	0.43	0.59
Qmax/Qmin []	200.00	467.43	204.97
Coefficiente de Variación []	1.43	1.25	0.92

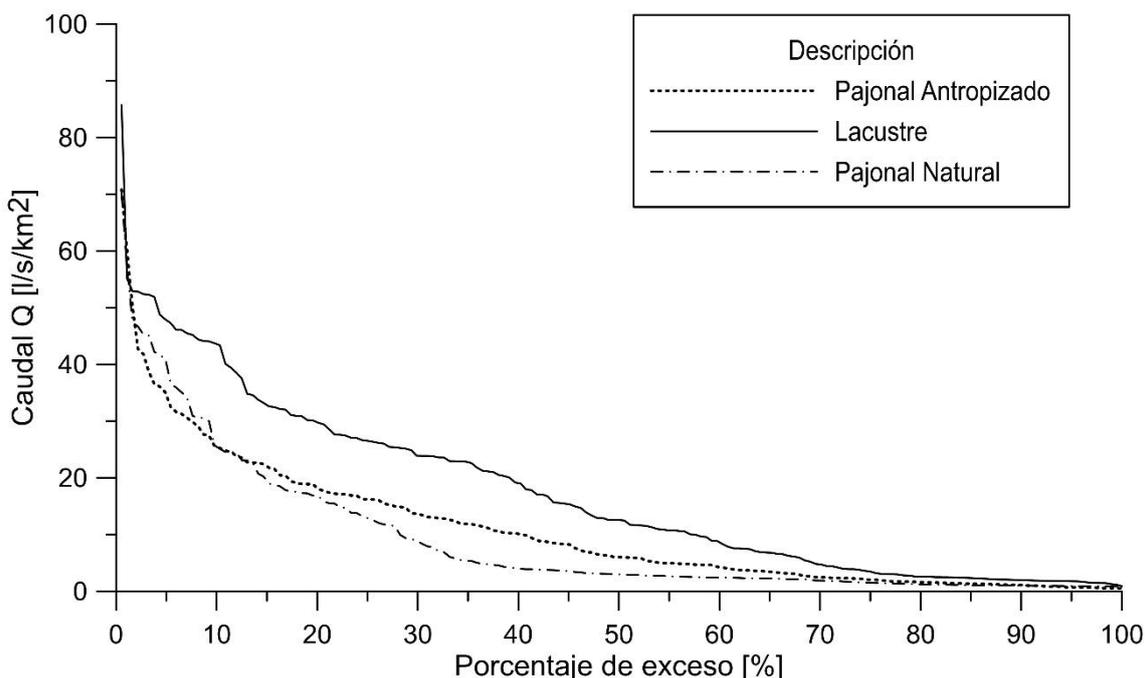
El análisis de la Tabla 3.6 muestra que los caudales específicos máximos y mínimos se presentan en la cuenca de Pajonal Antropizado, teniendo como máximo caudal valores superiores en un 50 y 40% y caudales mínimos con valores menores en un 14 y 27% que las cuencas de Pajonal Natural y Lacustre, respectivamente. Esto resulta en una relación entre caudales específicos máximos y mínimos más del doble mayor para la cuenca antropizada que para las otras dos. Por otro lado la variabilidad general de los caudales del hidrograma tiene un comportamiento diferente a la relación de caudales específicos máximos y mínimos, pues la diferencia de los caudales es 36 y 26% menor en la Lacustre que en la cuenca inalterada y la antropizada respectivamente, mientras éstas últimas tienen una diferencia del 12.5%.

Los tres primeros indicadores muestran una gran pérdida en la capacidad de regulación en la cuenca alterada mientras la Lacustre pierde muy poco o nada estas características si las comparamos con la Pajonal Natural que mantiene características intactas. El coeficiente de variación muestra comportamientos de variabilidad en los niveles de agua mayores en la cuenca de Pajonal Natural, seguido por el Pajonal Antropizado y finalmente con el menor valor la cuenca Lacustre; se esperaba un menor coeficiente de variación en las cuencas con mejor capacidad reguladora puesto que éstas tienden a presentar menores valores extremos tanto altos como bajos, pero se observa que la variabilidad de caudales es mayor en la cuenca cubierta de pajonal inalterado y una menor en la cuenca con lagunas lo que lleva a pensar que existe poca relación entre estos

indicadores y a su vez confirma una buena regulación en la cuenca con un sistema Lacustre.

Esto indica que el coeficiente de variación por sí solo no puede ser usado para estudiar la regulación hídrica, lo que lleva a pensar que usar un solo indicador puede resultar en resultados fácilmente equivocados.

Finalmente, como parte del estudio de la regulación hidrológica se realizó un análisis comparativo visual entre el comportamiento de las curvas de duración de caudales de cada una de las tres microcuencas, las mismas que se encuentran en la Figura 3.6.



**Figura 3.6.** Curva de duración de caudales específicos [l/s/km<sup>2</sup>] horarios en las cuencas Pajonal Natural, Pajonal Antropizado y Lacustre durante el periodo de estudio.

En la Figura 3.6 se observa una clara permanencia de caudales específicos mayores en la cuenca Lacustre para cualquier porcentaje de excedencia, lo que indica que mantiene flujos de agua mayores durante todo el periodo de estudio. Entre las cuencas con pajonal alterado y natural esta característica no es constante, pues para caudales altos con un 10% o menos de excedencia la cuenca Pajonal Natural mantiene flujos de agua mayores mientras para cualquier porcentaje de excedencia mayor a 10 mantiene caudales menores.

Las curvas de duración de caudales de las tres cuencas disminuyen de igual forma hasta el 2% de excedencia donde los caudales son extremadamente



altos, desde ese punto la Lacustre comienza mantener una diferencia constante del 40% mayor con las otras dos curvas, excepto entre los porcentajes de excedencia del 40 al 50% donde estas diferencias aumentan hasta el 75% con la cuenca de Pajonal Natural. Desde el 60% de excedencia comienzan a comportarse de igual forma acercándose a valores mínimos de caudal similares. Estas diferencias en el comportamiento de las curvas muestran la buena regulación que mantiene la cuenca con lagunas gracias a sus altos caudales durante todo el periodo de estudio, mientras es sorprendente que la cuenca antropizada muestre mejor regulación para caudales alrededor del 50% de excedencia y solo para caudales altos, cuando se podrían presentar crecidas bruscas la cuenca con pajonal natural regule de mejor manera. Este fenómeno está relacionado con la alta variabilidad de caudales registrados que tiene la cuenca Pajonal Natural.

Si bien los resultados obtenidos con las curvas de duraciones por si solos tampoco son buenos indicadores de regulación, si lo es para el rendimiento hídrico (tema no abordado en este trabajo por la corta serie de datos con la que se contó), pues se aprecia que la cuenca Pajonal Antropizado tiene un alto rendimiento hídrico, hecho que también se ve en el hidrograma. Sin embargo, desde el punto de vista solo de regulación hidrológica la cuenca con pajonal alterado es la que menos goza de ésta característica, mientras la Lacustre tiene una muy buena regulación al compararla con la cuenca Pajonal Natural que mantiene ésta característica intacta.

#### **4. Conclusiones**

El objetivo de esta tesis fue realizar un estudio comparativo del régimen hidrológico entre tres microcuencas de alta montaña (en el páramo de los Andes), las mismas que por su cercanía tuvieron similares condiciones climatológicas, geológicas y topográficas, teniendo como única diferencia considerable su cobertura vegetal: una microcuenca tenía pajonal natural inalterado, otra cubierta también de pajonal pero con una fuerte intervención antrópica con diferentes cambios en el uso y cobertura natural del suelo y la última microcuenca tenía un sistema lacustre. Para esto se propuso identificar índices hidrológicos que relacionen la cobertura del suelo y la precipitación con la respuesta de las microcuencas, cuantificar y definir en forma preliminar lo que podría considerarse como un periodo seco y húmedo en el páramo y determinar y entender la importancia de las diferentes coberturas y usos de suelo. Los datos con que se contó para este trabajo fueron de precipitación y caudal. Cada microcuenca contó con un pluviógrafo y un vertedero para registrar la lluvia y alturas de agua que posteriormente se transformaron en caudales.

El estudio consistió en lograr tres análisis: (i) El análisis comparativo de la lluvia registrada en los tres pluviógrafos con datos de precipitación agregados a

un paso de tiempo diario, que se lo realizó para las tres microcuencas; (ii) El análisis de la persistencia de caudales bajos y altos en las microcuencas Pajonal Antropizado y Lacustre con datos de caudales específicos agregados a un paso de tiempo diario; y, (iii) El análisis de la reactividad y regulación hídrica con datos de caudales específicos agregados a un paso de tiempo horario, que se lo realizó en las tres microcuencas.

Se encontró que las intensidades máximas horarias en las tres cuencas tienen similares valores con diferencias máximas del 3%, mientras para las intensidades máximas diarias las cuencas Pajonal Natural y Lacustre tienen valores del 25 y 30% mayores a la Pajonal Antropizado.

En el estudio de persistencia de días secos se encontró que para 57% de las veces que se presenten días secos (precipitaciones menores a 1mm/día) tuvieron una duración solamente un día, un 10% de las veces se presentaron por más de 7 días consecutivos con posibilidad de un 2% de eventos extraordinarios de sequía con duraciones de entre 18 y 32 días. Por otro lado, al estudiar los días húmedos (precipitaciones mayores a 1.5mm/día, siendo éste valor la mediana de los eventos diarios), un 70% de las veces duraron solo un día, un 10% de las veces duraron 5 días o más consecutivos con posibilidad de un 2% de eventos extremos extraordinarios con duraciones de 16 a 18 días consecutivos. Además tuvieron en promedio 100 días al año con precipitación cero. En este contexto se pueden concluir dos cosas: (a) Existen grandes variabilidades temporales y espaciales en las lluvias, pues aunque se esperaría que a estaciones más cercanas las intensidades fueran más similares y a escalas temporales menores éstas tengan mayores diferencias, esto no se reflejó en los resultados obtenidos. (b) El páramo tiene una precipitación en general muy constante, pues los eventos extremos de sequía o chubascos se presentan rara vez. Además esta precipitación es elevada por lo que es una fuente muy importante de agua.

En el segundo análisis se encontró que la microcuenca Lacustre tuvo caudales específicos mayores - un 33% en promedio y 45% en la mediana - que los registrados por la cuenca Pajonal Antropizado, además de un 17% menor variabilidad de caudales. La duración de caudales sobre umbrales altos en la cuenca Pajonal Antropizado se presentó en promedio el doble de días consecutivos que en la Lacustre, mientras que los caudales por debajo de umbrales bajos duraron en promedio la mitad de días consecutivos. Concluyendo que la microcuenca Lacustre presenta caudales superiores no sólo por la mayor precipitación registrada, sino también por la presencia de las lagunas, que al actuar como reservorios mantienen un flujo de agua constante que aumenta más que en las otras cuencas en períodos lluviosos y se mantiene más alto en períodos secos. Esto se corrobora con las pérdidas de precipitación representadas por el coeficiente de escorrentía que en la cuenca antropizada es 14% mayor que en la lacustre, hecho que además se da por el área que no es



afectada por intercepción o transpiración (sobre las lagunas); sin embargo la evaporación puede ser muy importante por lo que se requerirían de otras mediciones meteorológicas para afirmar o desmentir esta afirmación.

En último análisis (tercero) se halló que la microcuenca Pajonal Antropizado presenta mayor variabilidad en sus caudales (analizadas con diagramas de cajas), seguida por la Lacustre y la Pajonal Natural; sin embargo, el coeficiente de variación presenta valores de mayor a menor en el orden de las cuencas invertidos, siendo novedoso pues se esperaba que la variabilidad y el coeficiente de variación estuvieran relacionados. Los caudales máximos y mínimos se presentan en la cuenca alterada mostrando valores entre la relación de caudal específico mínimo y caudal específico máximo más del doble mayores que en la cuenca Lacustre y Pajonal Natural. La reactividad en la cuenca Pajonal Antropizada es mayor que en las otras dos debido a las afecciones que tiene su cobertura y uso de suelo, sin embargo la que primero reacciona frente a eventos de precipitación es la cuenca Lacustre debido a que ésta cuenta con flujos constantes de agua además de tener menos área de suelo que humedecer y saturar con la lluvia antes de escurrir. Para la regulación hidrológica se hallaron muchos índices que por sí solos hubieran dado resultados equivocados ya que no todos son claros en explicar éste fenómeno, el uso de varios de ellos pudo mostrar que la cuenca alterada es la que menos regula la salida de agua a pesar de tener un mayor rendimiento hídrico en comparación a la Pajonal Natural. La cuenca lacustre tiende a tener una excelente regulación que se compara a la de Pajonal Natural en periodos donde los caudales se presentan bajos, pero para caudales altos característica se ve reducida. Otro de los resultados de gran importancia fue el hallar que los eventos de crecida duran de entre 60 a 200 horas por lo que se espera que las crecidas después de eventos de precipitación importantes no se presentarán de forma inmediata como comúnmente se piensa sino que tomarán tiempo en desarrollarse.

En general se concluye que es de suma importancia mantener los páramos lo más inalterados posible, pues como se observó las microcuencas naturales (cubiertas con pajonal y un sistemas lacustre), aunque con ciertas diferencias, mantienen de mejor las características naturales como es la regulación hídrica y la reactividad. De todas maneras el impacto de la cuenca (ligeramente) alterada fue mucho menor que el encontrado en estudios de impacto de agricultura intensiva con arado mecánico y de forestación de 100% del área con especies exóticas.

Gracias a que el monitoreo fue excelente se obtuvieron datos de alta calidad que pudieron usarse para una investigación que jamás se ha realizado, como es el estudio del régimen hidrológico sobre sistemas lacustres en el páramo andino. Puesto que la complejidad que representa la instrumentación y el monitoreo (con su respectivo control de calidad) para realizar estudios como este es notable en nuestro medio hace que el valor de este trabajo sea enorme.

### 5.1 Investigaciones futuras

A partir de lo estudiado en este trabajo de tesis y los resultados obtenidos se recomienda realizar los siguientes estudios que completen la presente investigación.

- Realizar una verificación de los resultados. Para ello se recomienda continuar con el monitoreo y aplicar los indicadores de reactividad y regulación hídrica en todos los tipos de picos que se presentan en el hidrograma de salida y compararlos entre sí. Para esto se requieren periodos de datos más largos con el fin de descartar o afirmar que son casos aislados. Se recomienda que ésta comparación se haga de manera especial entre microcuencas con un sistema lacustre y con cobertura de Pajonal Natural.
- Estudiar el impacto en el régimen hidrológico en zonas con sistemas lacustres que tengan a su alrededor no solo una cobertura natural sino también otras coberturas y usos de suelos que se han sido cambiados por acciones antrópicas.
- A escala de parcela y/o de microcuenca realizar investigaciones acerca de la afección que tiene un cambio de cobertura o uso de suelo parcial y sobre la afección que tiene la interacción de varios de estos cambios en una misma área.
- Agregar a los próximos estudios sobre sistemas lacustres otras variables como la evapotranspiración y evaporación de las lagunas.
- Desde el punto de vista matemático-físico buscar mejores índices que cuantifiquen directamente los diferentes procesos hidrológicos, como es el caso de la regulación hídrica.

### 5. Bibliografía y Referencias

ABORDO, & Tugunimango, X. (2014). 17 PÁRAMOS PARA VISITAR EN ECUADOR, Ministerio del Ambiente. In *PÁRAMOS*.

Bosch, J. M., & Hewlett, J. D. (1982). A REVIEW OF CATCHMENT EXPERIMENTS TO DETERMINE THE EFFECT OF VEGETATION CHANGES ON WATER YIELD AND EVAPOTRANSPIRATION. *Journal of Hydrology*, 55, 3 – 23.



- Buytaert, W., Célleri, R., De Bièvre, B., Cisneros, F., Wyseure, G., Deckers, J., & Hofstede, R. (2006). Human impact on the hydrology of the Andean páramos. *Earth-Science Reviews*, 79(1-2), 53–72. doi:10.1016/j.earscirev.2006.06.002
- Buytaert, W., Iñiguez, V., Célleri, R., De Bièvre, B., Wyseure, G., & Deckers, J. (2006). Analysis of the water balance of small páramo catchments in south Ecuador. *Environmental Role of ...*, 271 – 281. Retrieved from [http://link.springer.com/chapter/10.1007/1-4020-4228-0\\_24](http://link.springer.com/chapter/10.1007/1-4020-4228-0_24)
- Célleri, R. (2007). *RAINFALL VARIABILITY AND RAINFALL-RUNOFF DYNAMICS IN THE PAUTE RIVER BASIN - SOUTHERN ECUADORIAN ANDES*. Tesis doctoral. Universidad Católica de Lovaina. Bélgica.
- Célleri, R. (2010). Estado del conocimiento técnico-científico sobre los servicios ambientales hidrológicos generados en los Andes. In *Servicios Ambientales Hidrológicos en la Región Andina. Estado del conocimiento, la acción y la política para asegurar su provisión mediante esquemas de pago por servicios ambientales* (pp. 25 – 46).
- Célleri, R., De Bièvre, B., & Iñiguez, V. (2012). Efecto de las Plantaciones de Pinos en la Regulación Hidrológica de Microcuencas de Páramo. *Páramo*, 29(Páramo y forestación (III)), 7 – 17.
- Célleri, R., & Feyen, J. (2009). The hydrology of tropical Andean ecosystems: importance, knowledge status, and perspectives. *Mountain Research and Development*, 29(4), 350–355. Retrieved from <http://www.bioone.org/doi/abs/10.1659/mrd.00007>
- Córdova, M. (2013). *Análisis del Comportamiento de la Evapotranspiración de Referencia (ET<sub>o</sub>) en un Ecosistema de Páramo Mediante la Ecuación Combinda de Penman-Monteith*.
- De Bièvre, B., & Acosta, L. (n.d.). Ecosistemas altoandinos , cuencas y regulación hídrica. High Andean Ecosystems , River Basins and Water Regulation. *Dialogue*, 21–22.
- De Bièvre, B., Iñiguez, V., & Buytaert, W. (2011). Hidrología del páramo, Importancia, propiedades y vulnerabilidad. Conocer para Conservar. In *Páramo. Paisaje estudiado, habitado, manejado e institucionalizado*. EcoCiencia/Abya-Yala/ECOBONA. Quito. (pp. 81 – 97).
- Dekker, S. C. (2000). *Modelling and monitoring forest evapotranspiration. Behaviour, concepts and parameteres*.
- Díaz, E., & Paz, L. (2002). “Evaluación del régimen del suelo bajo diferentes usos, en los páramos Las Ánimas (Municipio de Silvia) y Piedra de León



(Municipio de Sotará), Departamento del Cauca” Tesis de grado, Fundación Universitaria de Popayán, Colombia.

Duncan, M. J. (1995). Hydrological impacts of converting pasture and gorse to pine plantation, and forest harvesting, Nelson, New Zealand. *Journal of Hydrology*, 34(1), 15 – 41.

Hofstede, R. (2001). Runoff and soil erosion under rainfall simulation of andisols from the Ecuadorian páramo: effect of tillage and burning. *Ámsterdam: Elsevier*, 45(3), 185 – 207.

Josse, C., Cuesta, F., Navarro, G., Barrena, V., Cabrera, E., Chacón-Moreno, E., ... Tovar, A. (2009). *Atlas de los Andes del Norte y Centro. Bolivia, Colombia, Ecuador, Perú y Venezuela*. (pp. 1 – 100).

Llambí, L. D., Soto-W, A., Célleri, R., De Bièvre, B., Ochoa, B., & Borja, P. (2012). *Ecología, hidrología y suelos de páramos* (pp. 1 – 294).

Olden, J. D., & Poff, N. L. (2003). Redundancy and the choice of hydrologic indices for characterizing streamflow regimes. *River Research and Applications*, 19(2), 101–121. doi:10.1002/rra.700

Quichimbo, P. (2011). *PLAN DE MONITOREO DE SUELOS Y CARTOGRAFÍA. Informe de proyecto PIC-11-715. Universidad de Cuenca*. (pp. 1 – 27).

Quichimbo, P., Tenorio, G., Borja, P., Cárdenas, I., Crespo, P., & Célleri, R. (n.d.). EFECTOS SOBRE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LOS SUELOS POR EL CAMBIO DE LA COBERTURA VEGETAL Y USO DEL SUELO : PÁRAMO DE QUIMSACOGCHA AL SUR DEL ECUADOR. *Suelos Ecuatoriales*, 42(2), 138–153.

Vásconez, M., Castillo, A., Flores, S., Hofstede, R., Josse, C., B, S. L., ... Ortiz, D. (2011). *Páramo. Paisaje estudiado, habitado, manejado e institucionalizado. EcoCiencia/Abya-Yala/ECOBONA. Quito*. (pp. 1 – 388).

## ANEXOS

### Anexo 1. Fotografías de las tres microcuencas con sus pluviógrafos y vertederos

A continuación, tal como se explicó en la sección 2.1 del Capítulo 2, se presentan fotografías de los pluviógrafos y vertederos que fueron usados en cada una de las tres microcuencas de estudio, además de una fotografía general de la cobertura y morfología de las mismas. La Figura 1.1 presenta las fotografías de la microcuenca Lacustre, la Figura 1.2 de la microcuenca Pajonal Natural y la Figura 1.3 de la microcuenca Pajonal Antropizado, a la misma que no fue posible fotografiar el vertedero.



a)



b)



c)

**Figura 1.1.** Fotografías del a) pluviógrafo, b) vertedero y c) morfología de la microcuenca Lacustre.



a)



b)

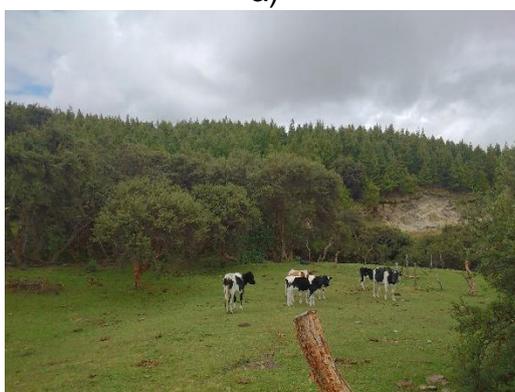


c)

**Figura 1.2.** Fotografías del a) pluviógrafo, b) vertedero y c) morfología de la microcuenca Pajonal Natural.



a)

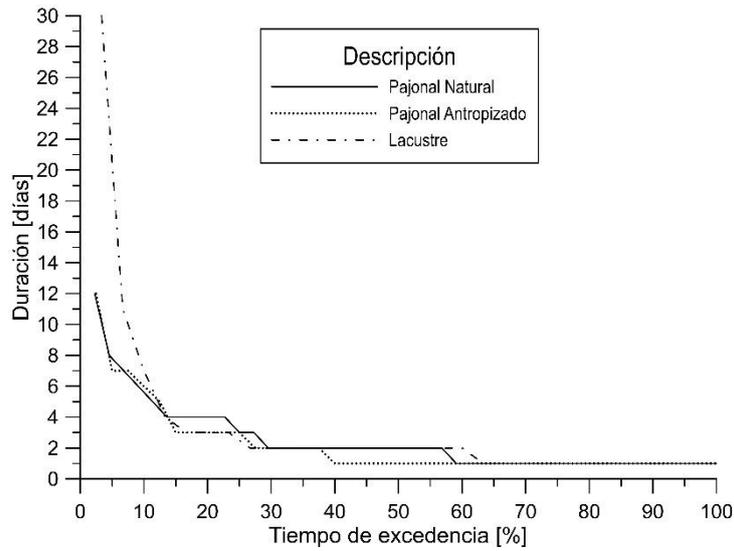


b)

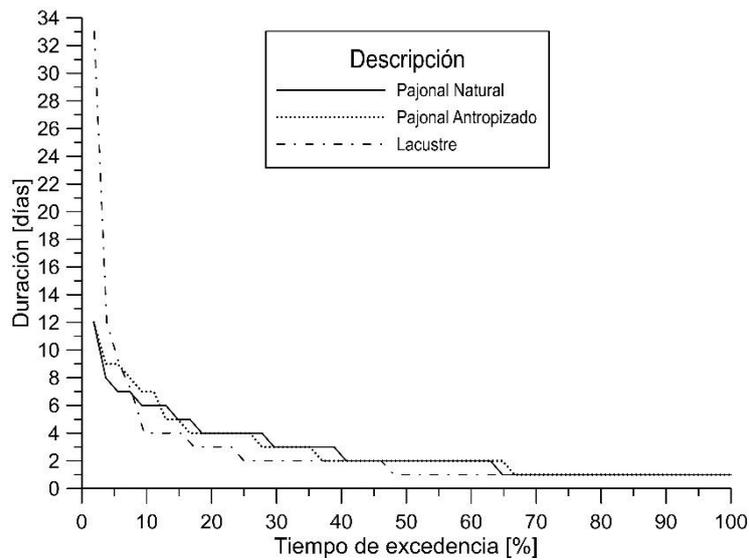
**Figura 1.3.** Fotografías del a) pluviógrafo y b) morfología de la microcuenca Pajonal Antropizado.

## **Anexo 2. Análisis comparativo de la lluvia registrada en los 3 pluviógrafos**

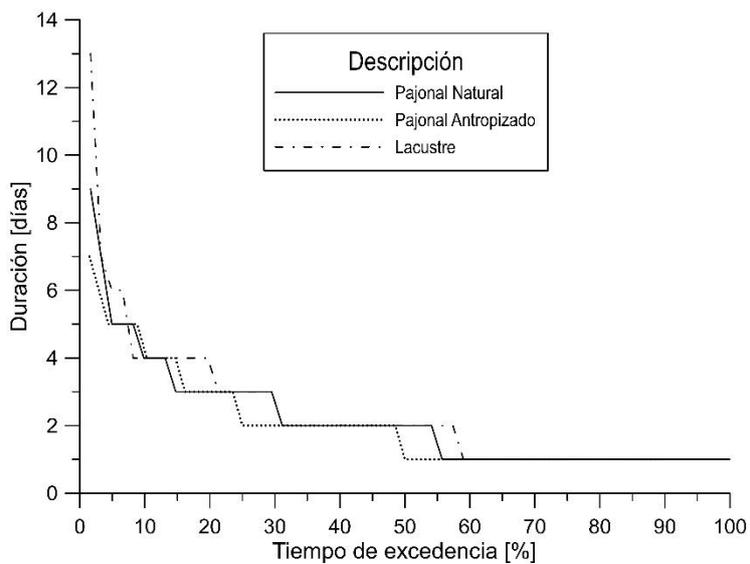
A continuación, tal como se explicó en la sección 3.1 del Capítulo 3, se presentan los resultados del análisis comparativo de la lluvia registrada en los tres pluviógrafos en términos de su duración para otros umbrales que podrían ser de interés. La Figura 2.1 presenta los resultados del análisis de la duración en periodos secos cuando la precipitación diaria es nula, es decir  $P=0$ . La Figura 2.2 presenta los resultados del análisis de la duración en periodos secos bajo el umbral de precipitación menor a 0.5mm por día ( $P<0.5\text{mm/día}$ ), que es de especial interés en estudios meteorológicos. Y, en la Figura 3.3 se encuentran los resultados del análisis de los periodos húmedos sobre el umbral de precipitación mayor a la mediana de todos los datos registrados agregados a un paso de tiempo diario, valor que resulto de 2.5mm ( $P>2.5\text{mm/día}$ ).



**Figura 2.1.** Análisis de periodos secos en las tres estaciones pluviométricas pertenecientes a cada microcuenca en términos de su duración ( $P=0\text{mm/día}$ ).



**Figura 2.2.** Análisis de periodos secos en las tres estaciones pluviométricas pertenecientes a cada microcuenca en términos de su duración ( $P<0.5\text{mm/día}$ ).



**Figura 2.3.** Análisis de periodos húmedos en las tres estaciones pluviométricas pertenecientes a cada microcuenca en términos de su duración ( $P > 2.5 \text{ mm/día}$ ).