

Evaluación del Servicio Hidrológico de Regulación en un Sistema de Cuencas Pareadas  
Mediante el Concepto de Reservorio Lineal y el Uso de Índices Hidrológicos. Caso: Berlín,  
Santander

Andrea Viviana Arias Castellanos

Fabián Castellanos Prada

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Civil

Director

Isabel Cristina Domínguez Rivera

PhD. en Agricultura, Alimentación y Desarrollo Rural

Codirector

Arley David Celis Vargas

Ing. Civil

Universidad Industrial de Santander  
Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas  
Escuela de Ingeniería Civil  
Bucaramanga

2020

### **Dedicatoria**

*Quiero dedicar este trabajo a todas las personas que participaron en mi formación profesional.*

*A Dios por brindarme la sabiduría para culminar este proceso.*

*A mis padres Jorge e Hilda por todo el amor y el apoyo incondicional.*

*A mis hermanas por sus palabras de aliento y por siempre estar a mi lado.*

*A Fabián quien se convirtió en mi compañero en esta aventura.*

*Con todo el amor del mundo para ustedes. Mil gracias.*

***Andrea Arias***

*Dedico este trabajo a mi familia, en especial a mis padres Javier, Olga, mi hermano Sebastián y mi tía Stella por apoyarme a lo largo de mi formación profesional y hacer esto posible.*

*A Andrea por haber sido mi compañera a lo largo de esta travesía.*

*A mis profesores por brindarme el conocimiento y aconsejarme a lo largo de esta investigación.*

*Muchas gracias a todos.*

***Fabián Castellanos***

### **Agradecimientos**

*Agradecemos al grupo de investigación en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental (GPH) por la oportunidad que nos brindaron de trabajar en este proyecto, adicionalmente, damos un especial reconocimiento a la profesora Isabel Domínguez y al ingeniero David Celis por la dirección y el apoyo en la realización de este trabajo.*

**Andrea Arias y Fabián Castellanos**

**Tabla de Contenido**

	Pág.
Introducción .....	13
1. Objetivos .....	16
1.1 Objetivo general .....	16
1.2 Objetivos específicos .....	16
2. Marco Conceptual y estado del arte .....	17
2.1 Marco conceptual .....	17
2.1.1 Servicios hidrológicos.....	17
2.1.2 Regulación hídrica .....	18
2.1.3 El concepto de reservorio lineal .....	19
2.1.4 Índices hidrológicos .....	20
2.2 Estado del arte .....	21
3. Metodología .....	26
3.1 Descripción de la zona de estudio .....	26
3.2 Revisión de la literatura .....	27
3.3 Monitoreo de las variables hidrológicas .....	28
3.4 Análisis de la información recolectada .....	32
3.4.1 Reservorio lineal .....	33
3.4.2 Índices hidrológicos .....	36
3.4.3 Análisis de extracciones .....	38
4. Resultados y discusión .....	40
5. Conclusiones .....	45
Referencias .....	47
Apéndices .....	51

**Lista de Tablas**

	Pág.
Tabla 1 <i>Características de las dos unidades hidrológicas que fueron monitoreadas</i> .....	27
Tabla 2 <i>Descripción de las salidas de campo</i> .....	31
Tabla 3 <i>Tramos de estudio para UHI y UHNI. 9 de octubre</i> .....	35
Tabla 4 <i>Percentiles calculados</i> .....	36
Tabla 5 <i>Constantes de tiempo T</i> .....	40
Tabla 6 <i>Análisis estadístico</i> .....	41
Tabla 7 <i>Índices hidrológicos calculados</i> .....	42

**Lista de Figuras**

	Pág.
Figura 1. Localización de las unidades hidrológicas (intervenida y natural), Páramo de Berlín, Santander, Colombia.....	27
Figura 2. Ensamblaje del vertedero.....	29
Figura 3. Adecuación del terreno .....	30
Figura 4. Adecuación final del vertedero .....	30
Figura 5. Detalle unidades hidrológicas.....	32
Figura 6. Hidrogramas de las dos unidades estudiadas $\Delta t=15$ min.....	33
Figura 7. Hidrograma de la UHI y la UHNI del evento ocurrido el 9/10/2019 $\Delta t=15$ min	34
Figura 8. Hidrograma de la UHI y la UHNI del evento ocurrido el 9/10/2019 en escala semilogarítmica.....	34
Figura 9. Tramos de estudio para UHI y UHNI. 9 de octubre de 2019 .....	35
Figura 10. Detalle extracción E1 .....	38
Figura 11. Detalle extracción E2.....	39
Figura 12. Detalle extracción E3.....	39

**Lista de Apéndices**

	Pág.
Apéndice A. Gráficas de eventos analizados para el reservorio lineal .....	51
Apéndice B. Periodos de tiempo analizados para índices hidrológicos.....	59

## Resumen

**Título:** Evaluación del servicio hidrológico de regulación en un sistema de cuencas pareadas mediante el concepto de reservorio lineal y el uso de índices hidrológicos. caso: Berlín, Santander\*

**Autores:** Andrea Viviana Arias Castellanos\*\*

Fabian Castellanos Prada

**Palabras clave:** Páramo, Servicios Hidrológicos, Regulación Hídrica, Reservorio Lineal, Índices Hidrológicos.

### Descripción:

Los páramos son fundamentales en la provisión y regulación del recurso hídrico, sin embargo, debido al aumento de la población y con esta el de las zonas de cultivo, los páramos se han visto afectados, puesto que se han generado cambios en su uso del suelo, los cuales pueden ocasionar impactos negativos sobre el servicio de regulación que proveen. En este estudio se evaluó esta problemática mediante el concepto del reservorio lineal y de los índices hidrológicos utilizando dos unidades hidrológicas consideradas como pareadas, una de las cuales esta intervenida por actividades agrícolas mientras que la otra no, el periodo de análisis estuvo comprendido entre el 27/09/2019 y el 04/01/2020 (100 días). En el caso del reservorio lineal se calcularon constantes de tiempo T, siendo la unidad natural la que presentó constantes de mayor magnitud indicando descargas 25% más lentas que las de la unidad intervenida. Respecto a los índices, estos no fueron concluyentes debido a que se determinó una posible afectación de estos por efectos de las extracciones que se hacen en la unidad intervenida. Se encontró que el índice de duración de flujos bajos (DLQ75) era menor en la unidad natural acorde con los resultados esperados. El índice de duración de flujos altos (DHQ25) era mayor en la unidad intervenida generando incertidumbre frente a la efectividad de los índices en este caso de estudio. La importancia de los resultados obtenidos radicaba en conocer el efecto real de las prácticas agrícolas sobre el ecosistema de paramo.

---

\*Trabajo de grado

\*\*Facultad de ingenierías fisicomecánicas. Escuela de ingeniería civil. Director Isabel Cristina Domínguez Rivera. Codirector Arley David Celis Vargas.

### Abstract

**Title:** Evaluation of the hydrological regulation service in a paired catchments system through the concept of linear reservoir and the use of hydrological indices. case: Berlin, Santander\*

**Authors:** Andrea Viviana Arias Castellanos\*\*

Fabian Castellanos Prada

**Key words:** Paramo, Hydrologic Services, Water Regulation, Linear Reservoir, Hydrological Indices.

### Description:

The paramos are fundamental in the provision and regulation of the water resource, however, the increase of the population and cultivation areas, have affected paramos due to land use changes, which lead to negative impacts on regulation service they provide. In this study, this problem was analyzed using the linear reservoir concept and hydrological indices using two hydrological units considered as paired, one of which is intervened for agricultural activities while the other not, the analysis period was between 27/09/2019 and 04/01/2020 (100 days). In the case of the linear reservoir, time constants  $T$  were calculated, the natural unit being the one that presented constants of greater magnitude indicating discharges 25% slower than the intervened unit. About the indices, these were inconclusive because a possible affectation of these was determined by the effects of the extractions made in the intervened unit. It was found that the low flow duration index (DLQ75) was lower in the natural unit according to the expected results. The high flow duration index (DHQ25) was higher in the intervened unit generating uncertainty about the effectiveness of the indices. The importance of the results obtained lies in knowing the real effect of agricultural practices on paramo ecosystem.

---

\*Bachelor Thesis

\*\*Facultad de ingenierías fisicomecánicas. Escuela de ingeniería civil. Director Isabel Cristina Domínguez Rivera. Codirector Arley David Celis Vargas.

## Introducción

El agua es fundamental para el desarrollo de la vida en la tierra, sin embargo, la contaminación de este recurso se ha convertido en un problema de carácter mundial, es por esta razón que su cuidado y conservación debería ser objeto de interés no solo de los entes gubernamentales sino de las personas en general. El sexto Objetivo de Desarrollo Sostenible propone que para el año 2030 se garantice la disponibilidad de agua y su gestión sostenible (Naciones Unidas, 2018), no obstante, desde los años 90 la contaminación del agua se ha intensificado y con esta las amenazas a la salud humana y al medio ambiente. Según el Programa Mundial de las Naciones Unidas de Evaluación de Recursos Hídricos (WWAP), para el año 2018 más de 2000 millones de personas carecían de acceso a agua potable (WWAP, 2018).

El incremento de la población mundial ha traído consigo un aumento en la demanda de agua estimada en alrededor de un 1% anual, siendo el sector agrícola el principal consumidor de este recurso en el mundo (WWAP, 2018). Así mismo, la demanda de alimentos ha ido en aumento y por consiguiente la producción agrícola se ha tecnificado y se ha hecho necesaria la expansión de las tierras de cultivo y el uso de pesticidas (Ongley, 1997). Si bien, se reconoce la importancia de la producción agrícola como un actor fundamental para la alimentación de las personas, también su crecimiento ha acarreado consigo efectos negativos sobre el agua como contaminación de las fuentes superficiales y subterráneas debido al uso intensivo de pesticidas y fertilizantes (FAO, 2011).

Alrededor del mundo existen ecosistemas sensibles, como los páramos, que proveen de una gran variedad de servicios, dentro de los cuales se pueden resaltar el suministro y la regulación hídrica (Cárdenas & Tobón, 2017). Específicamente, la regulación hídrica se entiende como la

capacidad de un ecosistema de almacenar agua y liberarla de forma progresiva en tiempos de sequía (Bonnesoeur et al., 2019). El ecosistema de páramo se caracteriza por tener una buena regulación (Buytaert, Wyseure, De Bièvre, & Deckers, 2005), sin embargo, el aumento de la producción agropecuaria ha generado una disminución de este servicio en estos ecosistemas.

En este estudio, se presentan los resultados obtenidos al evaluar el servicio hidrológico de regulación de una unidad hidrológica intervenida por actividades agrícolas y otra sin intervenir, mediante el uso del concepto de reservorio lineal y de índices hidrológicos, todo esto apoyado en la metodología de cuencas pareadas, la cual consiste en seleccionar dos cuencas con características geomorfológicas similares pero que difieran, en este caso, en el uso del suelo. Ahora bien, de acuerdo con la clasificación propuesta por Jiménez y Materón cuando el área de una cuenca es inferior a 500 hectáreas a esta se le denomina “unidad” (Jiménez y Materón, 1986), en este caso, las unidades hidrológicas que fueron estudiadas se encuentran ubicadas en el páramo de Berlín en el departamento de Santander, de las cuales una de ellas se encuentra intervenida por cultivos de cebolla *junca*, papa y ganadería mientras que la otra unidad hidrológica presenta una superficie sin intervención humana casi en su totalidad, dichas unidades están asociadas al proyecto de investigación titulado “Análisis participativo de la influencia del uso del suelo en los servicios hidrológicos de suministro y regulación ofertados por el ecosistema de páramo seco. Caso: Berlín (complejo Santurbán, Santander – Colombia)” el cual se encuentra en desarrollo a la fecha de publicación de este documento por el Grupo de investigación en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental (GPH).

La importancia de esta investigación radica en el papel que cumplen los páramos como proveedores y reguladores del recurso hídrico. Los páramos se consideran de prioridad nacional e importancia estratégica para la conservación de la biodiversidad del país (Ley No. 1930, 2018).

Adicionalmente, conocer la magnitud real del impacto que puede generar el cambio del uso del suelo en la regulación hídrica resulta valioso, puesto que, es posible generar planes de manejo ambiental que permitan armonizar los medios de sustento de las comunidades de páramo con los servicios hidrológicos que este provee.

## **1. Objetivos**

### **1.1 Objetivo general**

Evaluar el servicio hidrológico de regulación en un sistema de cuencas pareadas de un ecosistema de páramo seco mediante el concepto de reservorio lineal y el uso de índices hidrológicos.

### **1.2 Objetivos específicos**

Cuantificar el servicio hidrológico de regulación en una cuenca intervenida y otra no intervenida aplicando tres metodologías distintas.

Determinar el impacto del cambio del uso del suelo sobre el servicio hidrológico de regulación mediante comparación entre una cuenca intervenida y otra no intervenida.

## 2. Marco Conceptual y Estado del Arte

### 2.1 Marco conceptual

**2.1.1 Servicios hidrológicos.** Para hablar de servicios hidrológicos hay que empezar por identificar qué es un servicio ecosistémico. Los servicios ecosistémicos se pueden definir como los beneficios que obtienen las personas de los ecosistemas, estos pueden ser de suministro, regulación, culturales o de apoyo y cada uno se encarga de suplir una necesidad (Millennium Ecosystem Assessment., 2005). Los beneficios producto de los efectos de los ecosistemas terrestres en el agua dulce se denominan servicios hidrológicos; cada uno de estos servicios presenta atributos de calidad, cantidad, localización y tiempo de flujo. Estos atributos se ven afectados directamente por los ecosistemas de las cuencas que pueden aumentarlos o disminuirlos (Brauman, Daily, Duarte, & Mooney, 2007).

Un ecosistema específico es el páramo. Los páramos proveen una gran variedad de servicios, dentro de los cuales se pueden resaltar el suministro y la regulación hídrica (Cárdenas & Tobón, 2017). La capacidad de retención de agua en los páramos se debe principalmente a la cantidad de microporos presentes en los suelos producto de la presencia de carbono orgánico. Por otra parte, la topografía irregular, la cual favorece la presencia de lagos y pantanos que aumentan la capacidad de almacenamiento y regulación del ecosistema y finalmente las condiciones de clima propias de la alta montaña, acompañadas de la formación de hielo que favorece el suministro de agua, permiten que los páramos sean ecosistemas que proveen de un sin fin de beneficios a las personas (Buytaert et al., 2006), sin embargo, con el paso de los años la provisión de los servicios

hidrológicos en estos ecosistemas se ha visto afectada por los cambios en el uso del suelo asociados a actividades humanas (Bonnesoeur et al., 2019).

**2.1.2. Regulación hídrica.** Los servicios de regulación resultan de la capacidad que tienen los ecosistemas para regular el clima, los ciclos hidrológicos y bioquímicos, los procesos de la superficie terrestre y una variedad de procesos biológicos (Hein, van Koppen, de Groot, & van Ierland, 2006). La regulación hídrica puede definirse como la capacidad del ecosistema de mantener un flujo mínimo en las quebradas y ríos durante los períodos secos del año a través del almacenamiento (en el suelo y los acuíferos) y la liberación progresiva durante las estaciones secas, reduciendo de esta manera la escasez de agua y los impactos de la sequía. Además de lo anterior, esta capacidad de almacenamiento permite reducir la esorrentía y de esta forma controlar los caudales en cuerpos superficiales durante eventos de lluvia, reduciendo la magnitud y frecuencia de las inundaciones (Bonnesoeur et al., 2019).

Los ecosistemas de páramo son caracterizados por tener una respuesta hidrológica lenta y una buena regulación del agua, causada por una combinación de una alta capacidad de almacenamiento junto con una alta conductividad hidráulica (Buytaert et al., 2005).

La regulación hídrica en cuencas de páramo puede ser evaluada mediante diferentes metodologías como el concepto del reservorio lineal e índices hidrológicos, los cuales se explican en los siguientes numerales.

**2.1.3 El concepto de reservorio lineal.** Frecuentemente en lugares como lagos, segmentos de ríos, cuencas hidrológicas e incluso en cuerpos de agua subterránea, se puede observar como la tasa de flujo de salida aumenta en conjunto con la cantidad de almacenamiento (Dingman, 1994), esta relación entre la tasa de flujo de salida,  $Q$ , y el volumen de almacenamiento,  $S$ , puede ser modelada con la Ecuación 1:

$$Q = f(S) \quad (1)$$

En donde el caudal  $Q$  es función del almacenamiento  $S$ . Ahora bien, en la mayoría de los reservorios hidrológicos, como las cuencas naturales, la Ecuación 1 puede ser simplificada y descrita como:

$$Q = K * S \quad (2)$$

$$\frac{dS}{dT} = -Q \quad (3)$$

Donde  $Q$  es el caudal,  $S$  el almacenamiento,  $t$  el tiempo y  $K$  es una constante de cambio que indica la velocidad con la cual el reservorio drena (Buytaert, De Bièvre, Wyseure, & Deckers, 2004). Las Ecuaciones 2 y 3 pueden combinarse y mediante una linealización obtener una ecuación semilogarítmica de la forma:

$$\ln(Q) = \ln(Q_0) - Kt \quad (4)$$

Ahora bien, si se tiene en cuenta que el inverso de  $K$  representa una constante de tiempo llamada  $T$  (Dingman, 1994), la cual indica la capacidad de almacenamiento de un reservorio o la lentitud con la que libera el agua (Buytaert et al., 2004), podemos reemplazar  $K$  en la Ecuación 4 por  $1/T$  obteniendo así la Ecuación 5.

$$\ln(Q) = \ln(Q_0) - \frac{t}{T} \quad (5)$$

La Ecuación 5 es conocida como Ecuación de reservorio lineal y es usada como herramienta para comparar el comportamiento de las cuencas al dividir eventos en varias descargas de reservorios, cada uno con una constante de tiempo particular  $T$ , además de evaluar la capacidad de retención en términos del caudal (Roa-García, Brown, Schreier, & Lavkulich, 2011). A través de la constante de tiempo  $T$  se puede observar la capacidad de regulación de una cuenca respecto a otra, puesto que un valor de  $T$  alto es un indicador de que la cuenca está liberando el agua almacenada de una manera lenta y prolongada permitiendo así que en tiempos difíciles como sequías se reduzca la escasez de agua. En términos generales, la cuenca puede ser vista como un conjunto de reservorios, cada uno de los cuales tiene un valor diferente de  $T$ , si estos valores difieren lo suficiente entre sí, se puede considerar la descarga final como una cadena temporal de las liberaciones de los diferentes reservorios (Buytaert et al., 2004).

**2.1.4 Índices hidrológicos.** Los índices hidrológicos son una herramienta que permite describir diversos aspectos en los regímenes de flujo de una corriente, lo cual ha generado un incremento en su aplicación, en especial, en investigaciones de tipo fluvial. Estos términos se han desarrollado para caracterizar regiones basándose en variables de flujo relevantes y adicionalmente poder describir la variabilidad de los regímenes hidrológicos de tipo regional o global. Finalmente, los índices permiten evaluar las características de los flujos que pueden resultar sensibles a los efectos antrópicos (Olden & Poff, 2003).

En el desarrollo de este proyecto se hará uso de dos índices que permiten evaluar el servicio hidrológico de regulación. Estos índices describen la duración de pulsos altos y bajos. Se define pulso hidrológico como aquellos momentos dentro del periodo de análisis en los que la condición media diaria del agua aumenta por encima del percentil 75 (pulso alto), medido mediante el índice

DHQ25, o cae por debajo del percentil 25 (pulso bajo), cuantificado mediante el índice DLQ75. Respecto a la nomenclatura de los índices la letra “D” significa duration (duración), las letras “L” y “H” significan low (bajo) y high (alto) respectivamente, el termino final Q75 representa caudales que son superados el 75% de las veces los cuales son asociados al percentil 25 y Q25 representa caudales superados el 25% de las veces asociados al percentil 75 (Richter, 1996).

Aunque los percentiles de flujo están asociados con su probabilidad de ocurrencia, la información sobre cuándo o durante cuánto tiempo ocurren tales flujos está ausente. Por lo tanto, la duración promedio de los hidrogramas por encima o por debajo de un umbral ayuda a complementar esta información (Ochoa-Tocachi et al., 2016).

## **2.2 Estado del arte**

Determinar el impacto del cambio del uso del suelo en la respuesta hidrológica de las cuencas es importante puesto que de esta forma se pueden implementar planes de manejo adecuados para la gestión de los recursos hídricos (Martinez, Coello, & Feyen, 2017). Sin embargo, conocer este impacto puede resultar complejo por la cantidad de variables que entran en estudio. Por tanto, se hace conveniente simplificar el problema y utilizar métodos, como el de cuencas pareadas, que permiten disminuir las fuentes de variabilidad, como el clima, la topografía, la forma de la cuenca y el tipo suelo que pueden afectar la respuesta hidrológica de las cuencas (Ochoa-Tocachi, Buytaert, & De Bièvre, 2016). La metodología de cuencas pareadas consiste en seleccionar dos cuencas similares en sus características geomorfológicas (pendiente, clima, forma, suelo, área, etc.) y que se encuentran adyacentes o cercanas entre sí. Luego de un periodo de monitoreo una de las dos cuencas sufre cambios en la cobertura vegetal y se determinan las alteraciones que sufre el

rendimiento de agua debido a este cambio (Brown, Zhang, McMahon, Western, & Vertessy, 2005). Sin embargo, en la práctica usar dicho procedimiento resulta en periodos muy largos de monitoreo y un control exhaustivo del uso del suelo, por tanto, en ocasiones se recurre a utilizar cuencas que ya presentan intervención humana con una similar que está en estado natural. Este enfoque resulta ser más eficiente y sencillo de implementar, además de tener la ventaja de proveer resultados más rápidos y de esta forma tomar mejores decisiones en cuanto al manejo del ecosistema (Ochoa-Tocachi et al., 2016).

Para el desarrollo de este proyecto, además de la metodología de cuencas pareadas se hizo uso del concepto del reservorio lineal y de índices hidrológicos. Por tanto, se realizó una revisión de la literatura que permitió identificar algunas investigaciones en las que se usaron estos conceptos como metodologías para cuantificar la capacidad de regulación de un ecosistema.

El alto incremento de la población y la utilización de la agricultura a gran escala como medio de sustento ha influido directamente en el incremento de la demanda de agua para diferentes usos (Crespo et al., 2014), si bien, se considera que el páramo es el principal proveedor de agua de las tierras altas andinas de Colombia y Ecuador (Buytaert et al., 2006), décadas de intervención humana han alterado el uso de la tierra de este ecosistema, siendo las principales formas el pastoreo, cultivos, forestación y construcciones (Crespo et al., 2014), es por esta razón que en Ecuador, para el año 2004 se realizaron dos estudios que buscaban determinar la capacidad de regulación de dos microcuencas haciendo uso de la metodología de cuencas pareadas y el concepto del reservorio lineal. En el primer estudio una de las microcuencas presentaba solamente pastoreo extensivo mientras que la otra presenta cultivos y pastoreo intensivo (Buytaert et al., 2004). En el segundo estudio, las microcuencas seleccionadas tenían cobertura vegetal y uso del suelo diferente, una con ganadería extensiva y la otra con vegetación predominante de pinos (Célleri Alvear, De

Bièvre, & Iñiguez, 2004). Adicionalmente, en Colombia, en el año 2011, se publicó una investigación similar, pero realizada en tres cuencas de alta montaña ubicadas en el municipio de Filandia, en las cuales los usos del suelo diferían entre sí, aunque la mayor parte del suelo era dedicado para cría extensiva de ganado lo cual generó un notorio cambio en los bosques y humedales presentes en el ecosistema (Roa-García et al., 2011).

En los casos mencionados anteriormente se utilizó el concepto de reservorio lineal para determinar la regulación de las cuencas, esta metodología requiere del uso de datos de caudal y precipitación. Para obtener estos datos, en el estudio realizado a cabo en Ecuador, las dos microcuencas fueron instrumentadas con pluviómetros de una precisión de 0.2 [mm] y vertederos triangulares junto con medidores de niveles de agua de los que podía determinarse el caudal al cierre de las microcuencas cada 15 minutos. Los datos se recolectaron por 14 meses en la primera microcuenca y por 12 meses en la otra, en donde se determinaron 24 y 18 picos de eventos de lluvia homogéneos y regulares respectivamente (Buytaert et al., 2004). Por otra parte, en otro estudio realizado en Ecuador por Célleri y demás autores, la instrumentación se realizó con pluviógrafos de precisión de 0.254 [mm] y vertederos triangulares de cresta delgada equipados con un transductor de presión para medir el nivel de agua cada 15 minutos (Célleri Alvear et al., 2004). Finalmente, en el estudio realizado en las cuencas ubicadas en Filandia, Colombia la recolección de datos se realizó usando pluviómetros y transductores de presión que medían el nivel de agua cada 15 minutos (Roa-García et al., 2011).

Para finalizar los estudios, se realizó el análisis de la información recolectada en campo y las conclusiones de acuerdo con los resultados obtenidos. En el primer estudio, realizado en Ecuador, el análisis se hizo de forma gráfica y analítica, permitiendo determinar tres valores para la constante de tiempo T, dos de los cuales correspondían a respuestas rápidas de la microcuenca y

un tercero a una respuesta más lenta. Se calcularon valores estadísticos como la media, la varianza y la diferencia porcentual, para de esta forma realizar comparaciones entre las microcuencas. Del estudio se pudo concluir que el método del reservorio lineal es adecuado para determinar cambios en las características hidrológicas debido a cambios del uso del suelo en pequeñas cuencas de montaña, en este caso, la capacidad de almacenamiento de la microcuenca intervenida era menor en un 40%. De igual forma, se concluyó que la constante de tiempo T relaciona un parámetro matemático con uno físico que en este caso es la capacidad de almacenamiento (Buytaert et al., 2004).

En la investigación realizada por Célleri Alvear, De Biévre, e Iñiguez se obtuvieron tres valores de constante de tiempo T que representan la escorrentía superficial, el flujo de agua en el borde entre el suelo y el material rocoso y la retención de agua y flujo en el perfil de suelo. Se realizó un análisis estadístico de la varianza para determinar si existían diferencias en los valores promedio de T. Se concluyó que para las microcuencas estudiadas los valores de T no eran significativamente diferentes, lo que indicaba que para eventos de lluvia similares la respuesta de las cuencas también lo era (Célleri Alvear et al., 2004).

Finalmente, el programa de análisis en las cuencas estudiadas en Colombia se dividió en dos fases, la primera consistía en determinar las diferencias de uso de la tierra en las tres cuencas y la relación que existía en cuanto a la retención de agua y la segunda la respuesta hidrológica de la cuenca frente a diferentes escalas de tiempo. Del estudio se concluyó que el agua requiere más tiempo para abandonar cuencas boscosas y que los humedales prolongan su tiempo de residencia, adicionalmente, en una de las cuencas se encontró que había menor capacidad de almacenamiento y mayor tasa de escorrentía debido a la presencia de pastizales. De acuerdo con lo anterior, podría decirse que la literatura frente a la determinación del servicio hidrológico de regulación usando el

concepto de reservorio lineal puede considerarse escasa, puesto que, el conocimiento sobre los procesos hidrológicos de las cuencas de captación de pequeñas montañas tropicales se puede considerar limitado (Roa-García et al., 2011).

Por otra parte, la metodología de cuencas pareadas puede ser utilizada para evaluar la regulación hídrica en términos de otros conceptos como los índices hidrológicos. En la investigación realizada por Ochoa y demás autores, en el año 2016, en la cual se hizo uso de los índices DLQ75 y DHQ25 para determinar la capacidad de regulación de las cuencas (Ochoa-Tocachi et al., 2016), se instrumentaron y monitorearon 25 cuencas de áreas entre 0.5 y 7.8 km<sup>2</sup> distribuidas a lo largo de los Andes tropicales, con altitudes entre 2682 y 4840 msnm. Se encontró la presencia de biomas de tipo páramo, bosque, puna seca, jalca y puna húmeda, en donde se identificó que los principales usos del suelo eran conservación, pastoreo, reforestación o cultivo. Al igual que en los estudios anteriormente mencionados, se instalaron medidores de caudal y precipitación para la recolección de datos. En lo referente al caudal se usaron vertederos triangulares para caudales bajos y vertederos rectangulares para caudales altos cada uno equipado con un transductor de presión en el cierre de las cuencas para medir el flujo cada 5 minutos con un máximo de 15 minutos en algunas de ellas. Adicionalmente se usó un mínimo de dos pluviómetros por cuenca, cada uno con precisiones de 0.254, 0.5 o 0.1 mm. Del estudio, se pudo concluir que el DLQ75 es ligeramente inferior en las cuencas forestadas, el DHQ25 es dos veces más alto en el páramo y jalca forestados, pero solo la mitad en la puna forestadas (Ochoa-Tocachi et al., 2016).

### 3. Metodología

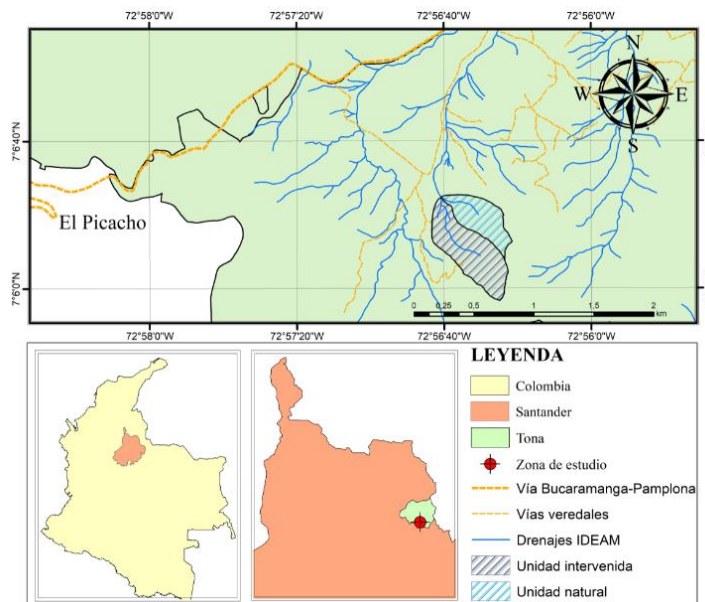
#### 3.1 Descripción de la zona de estudio

Los páramos son ecosistemas únicos de alta montaña (Sarmiento Pinzón, Cadena Vargas, Sarmiento Giraldo, & Zapata Jiménez, 2013) ubicados principalmente en las montañas tropicales de Centro y Sur América (Díaz-Granados Ortiz, Navarrete González, & Suárez López, 2005), en países como Colombia, Venezuela, Ecuador, Perú y Costa Rica (Morales Rivas et al., 2007). Estos ecosistemas se caracterizan por encontrarse en altitudes entre los 3,000 msnm y 4,500 msnm y presentar una gran riqueza ecológica. En Colombia los páramos ocupan cerca de 14,000 km<sup>2</sup> de área lo cual equivale al 1.3% del territorio nacional, ahora bien, del área total de páramos cerca del 9.4% se encuentra en el departamento de Santander (Díaz-Granados Ortiz et al., 2005). El presente estudio fue realizado en dos unidades hidrológicas pertenecientes al páramo de Berlín ubicado en el municipio de Tona, departamento de Santander, Colombia, el cual hace parte de la unidad biogeográfica conocida como complejo Santurbán, en donde se desarrollan actividades productivas que corresponden a la agricultura y la ganadería, siendo el cultivo de cebolla y papa las principales actividades (CORPONOR, CDMB, & Instituto Humboldt, 2008). La Figura 1 presenta la localización de las unidades hidrológicas objeto de estudio y la Tabla 1 sus principales características geomorfológicas.

Tabla 1

*Características de las dos unidades hidrológicas que fueron monitoreadas*

ID Unidad:	Natural (UHN)	Intervenida (UHI)
Área:	15.91 ha	20.88 ha
Perímetro:	2225 m	3275 m
Uso de suelo:	Vegetación propia de la zona y ganadería extensiva	Cultivos de cebolla, papa y ganadería extensiva
Rango altitudinal:	3431-3501 msnm	3431-3565 m



*Figura 1.* Localización de las unidades hidrológicas (intervenida y natural), Páramo de Berlín, Santander, Colombia

### 3.2 Revisión de la literatura

Se realizó una revisión de la literatura con el fin de recopilar información que permitiera conocer el estado actual de la investigación frente al uso del concepto del reservorio lineal y de los índices hidrológicos como metodologías que permiten evaluar la regulación hídrica en un ecosistema de páramo. El proceso de búsqueda se realizó haciendo uso de algunas de las bases de datos

proporcionadas por la Universidad Industrial de Santander, *Scopus*, *Science Direct* y *Scholar Google*. Las palabras clave que se emplearon fueron “paramo”, “linear reservoir”, “hydrologic services”, “hydrological indices”, “water regulation”. Estas palabras clave permitieron encontrar información general de los temas a investigar. Adicionalmente, se emplearon combinaciones de dichas palabras con el fin de encontrar información específica que sirviera como apoyo en la investigación.

### **3.3 Monitoreo de las variables hidrológicas**

Las variables monitoreadas para el desarrollo de este proyecto fueron el caudal y la precipitación. Los puntos en los cuales irían ubicados los instrumentos necesarios para la medición de estas variables fueron previamente establecidos por el Grupo de investigación en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental (GPH) teniendo en cuenta factores como la topografía y seguridad de la zona, esto con motivo de que la instalación fuese lo más sencilla posible, así como para evitar posibles hurtos o vandalización de los aparatos de medida. Adicionalmente, mediante inspecciones del terreno realizadas por el grupo GPH se identificaron 3 puntos de extracción de agua en la unidad intervenida, las cuales son usadas por los residentes de la zona para consumo y riego. El proceso de monitoreo se realizó de la siguiente manera:

- Monitoreo del caudal

Para la medición del caudal se utilizaron dos vertederos triangulares y tres transductores de presión de referencia *U20L-04*, de los cuales dos fueron ubicados en los cierres de las unidades hidrológicas y uno instalado en el terreno circundante para medir la presión atmosférica, cada uno de los transductores fue programado para tomar la presión absoluta cada 5 minutos, aunque para la aplicación de las metodologías del reservorio lineal y de los índices hidrológicos se utilizaron

los datos cada 15 minutos, puesto que, este es el intervalo de tiempo que utilizan en otros estudios en los que se han aplicado estas metodologías. En cuanto a los vertederos, la puesta en marcha se llevó a cabo en tres fases: diseño y ensamblaje, instalación y calibración.

*Diseño y ensamblaje:* Los vertederos fueron diseñados por el grupo GPH. Para el ensamblaje se usaron láminas de acrílico de 1 cm de espesor que fueron cortadas a medida y aseguradas entre sí mediante tornillos en los laboratorios de diseño industrial de la Universidad Industrial de Santander como se aprecia en la Figura 2.



*Figura 2.* Ensamblaje del vertedero

*Instalación:* Una vez culminada la fase de diseño y ensamblaje se realizó la de instalación; para el desarrollo de esta fase fue necesario realizar varias salidas de campo a la zona de estudio para acondicionar el terreno en el que estarían ubicados los vertederos. En un principio se presentaron una serie de filtraciones debajo de los canales, las cuales fueron solucionadas mediante el uso de plásticos negros (Figura 4), anclados en la parte posterior de los canales, con los cuales se impermeabilizó la zona. Adicionalmente, se colocó una cama de rocas aguas arriba con el fin de que los posibles sedimentos arrastrados por la corriente se depositaran allí.



*Figura 3.* Adecuación del terreno

*Calibración:* Una vez se comprobó el correcto funcionamiento de los canales se procedió con la calibración de las ecuaciones de estos, para lo cual se realizaron una serie de salidas de campo en las que se hicieron aforos volumétricos y se registraron las alturas de la lámina de agua en el mismo instante de tiempo. Cabe resaltar que las salidas de calibración no eran realizadas con una periodicidad regular, pero si se hacían todos los meses con el fin de tener datos suficientes que permitieran corroborar el correcto funcionamiento de los transductores y que la calibración de las ecuaciones de los vertederos fuera la más adecuada.



*Figura 4.* Adecuación final del vertedero

El resumen de las salidas de campo necesarias para la ejecución de cada una de las fases descritas anteriormente se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2  
*Descripción de las salidas de campo*

Salida	Fecha	Descripción
1	21/07/2019	Instalación de los vertederos
2	26/07/2019	Adecuación de los vertederos
3	4/08/2019	
4	7/08/2019	
5	9/08/2019	
6	1/10/2019	Aforos volumétricos para calibración
7	8/10/2019 *	
8	17/10/2019	
9	30/10/2019	
10	2/11/2019 **	Reinstalación de diver
11	16/11/2019	Aforos volumétricos para calibración
12	20/12/2019	
13	4/01/2020	

\* El diver de la unidad natural es reemplazado por uno nuevo.

\*\* El diver de la unidad intervenida tuvo que ser reinstalado por falla del dispositivo presentada el 30 de octubre de 2019.

- Monitoreo de la precipitación

Para la medición de la precipitación se usó una estación meteorológica de referencia *Watchdog 2900ET* equipada con un pluviómetro automático programado para tomar datos cada 5 minutos. Por consideraciones de seguridad dicha estación se ubicó a pocos metros de una vivienda habitada, localizada en la unidad intervenida (ver Figura 5).

- Monitoreo de las extracciones

En un principio, se tenía planteado realizar un aforo de extracciones en cada uno de los puntos descritos en la Figura 5, durante un periodo de 5 días consecutivos, para luego hacer aforos individuales cada 15 días. Sin embargo, el monitoreo de las extracciones se realizó solo en dos ocasiones y se complementó con datos recolectados anteriormente por el grupo GPH. Esto debido a la necesidad de destinar mayor tiempo a la instalación y calibración de las unidades de medición

de niveles, así como a dificultades de orden social, por molestias ocasionadas a los usuarios de las extracciones debido a las interrupciones constantes que se presentaban en el servicio junto con el incremento considerable en los sedimentos del agua durante los aforos. Por esta razón, la información cuantitativa que alcanzó a recogerse fue complementada con información cualitativa, suministrada por el habitante de la vivienda en la unidad hidrológica intervenida, quien proporcionó datos acerca de la dinámica de las extracciones, tales como su uso y funcionamiento. Esta información se presenta mas detallada en el numeral 3.4.3 de este documento.

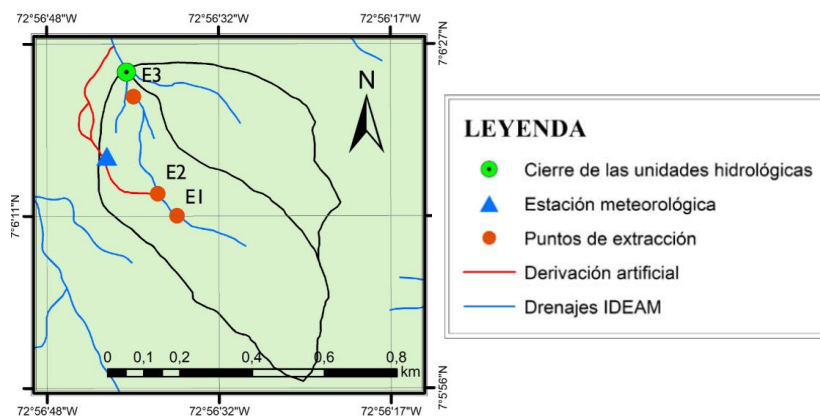


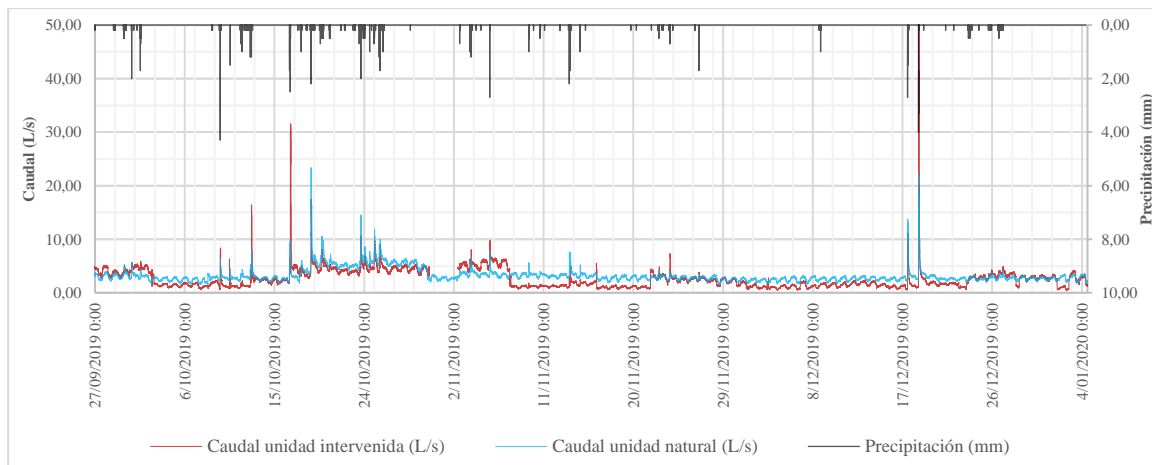
Figura 5. Detalle unidades hidrológicas

### 3.4 Análisis de la información recolectada

Para el análisis de la información se revisaron los datos recolectados durante el periodo de monitoreo de las variables hidrológicas (caudal y precipitación) el cual tuvo una duración de 4 meses y 14 días comprendidos entre el 19/08/2019 y el 04/01/2020. Sin embargo, durante dicha revisión se tuvieron que descartar los datos recolectados entre el 19/08/2019 y el 26/09/2019 equivalentes a 39 días de monitoreo debido a mediciones erróneas suministradas por el transductor de presión instalado en el canal de la unidad natural provocadas por un fallo en el dispositivo el cual se reemplazó posteriormente. La unidad intervenida no tuvo problemas durante este periodo,

pero por motivos de comparación se decidió usar los mismos periodos de tiempo en ambas unidades quedando así un periodo de análisis de 3 meses y una semana comprendido entre el 27/09/2019 al 04/01/2020 como se aprecia en la Figura 6.

**3.4.1 Reservorio lineal.** En el caso del reservorio lineal, se identificaron 9 eventos en los cuales fue posible aplicar el concepto. El criterio de selección se basó en identificar aquellos eventos en los que después de un periodo de lluvia se presentase un pico de caudal apreciable en el hidrograma y que este fuera seguido de un periodo sin precipitación, de al menos 1 día, con el fin de garantizar que cada una de las etapas de la descarga de los reservorios se desarrollara. Al establecer los eventos que serían estudiados, se separaron los hidrogramas y se aplicó logaritmo natural al eje del caudal de forma tal que fueran apreciables los cambios en la trayectoria de la curva y por ende los tramos en los que se encontraban las constantes de tiempo T1, T2 y T3. A continuación, se presenta el cálculo tipo para el evento ocurrido el 9 de octubre de 2019.



*Figura 6.* Hidrogramas de las dos unidades estudiadas  $\Delta t=15$  min

Como se puede observar en la Figura 7, se presentan los hidrogramas de la unidad hidrológica intervenida y natural junto con el comportamiento de la precipitación durante el evento.

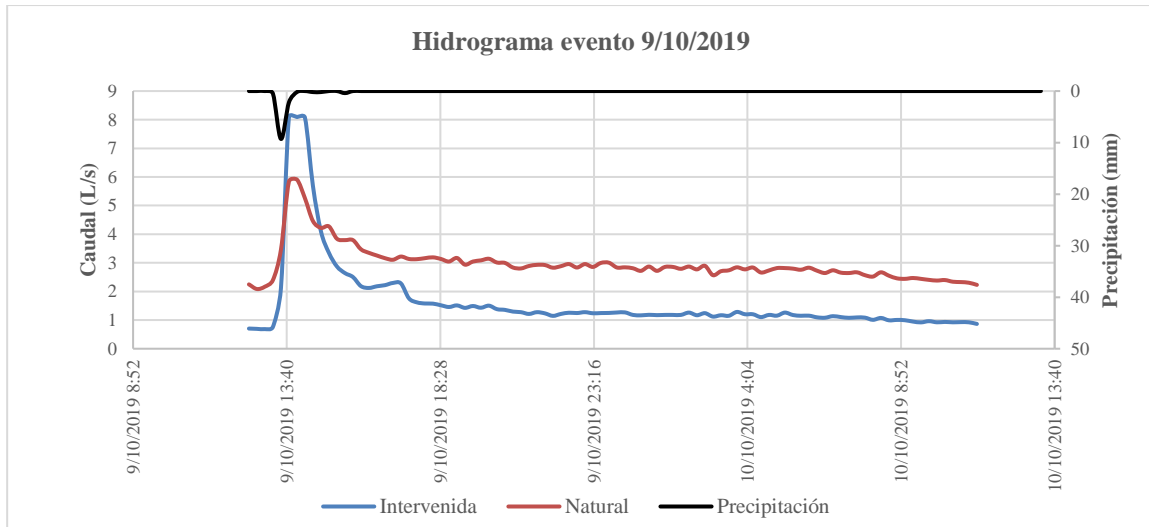


Figura 7. Hidrograma de la UHI y la UHNI del evento ocurrido el 9/10/2019  $\Delta t=15$  min

Para la rápida identificación de los segmentos lineales se usó la escala semilogarítmica como se muestra en la Figura 8.

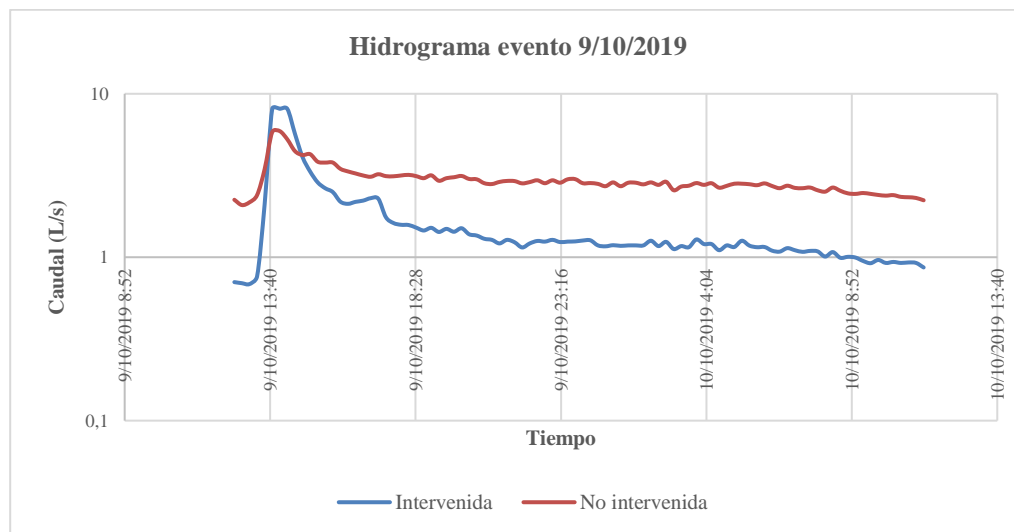


Figura 8. Hidrograma de la UHI y la UHNI del evento ocurrido el 9/10/2019 en escala semilogarítmica

Mediante este ajuste fue posible identificar tres segmentos lineales visibles en el hidrograma, sobre todo en el de la unidad natural en donde dichos tramos se ven más marcados. Estos segmentos representan tres reservorios cada uno con su constante de tiempo  $T$ . Una vez identificados los segmentos rectos y determinada su fecha de inicio y fin, como se muestra en la

Figura 9 y la Tabla 3 para la unidad natural (UHN) e intervenida (UHI), en donde, el criterio usado para la determinación de estos puntos consistió en observar de forma gráfica los lugares en la escala semilogarítmica en los cuales se apreciaba un cambio en la pendiente, una vez establecidos estos puntos se aplicaba una regresión lineal de forma tal que el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) fuera lo más cercano a 1. Finalmente, se procede con el cálculo de las regresiones lineales de dichos tramos teniendo en cuenta que el eje “y” debe estar recalculado como “ $\ln(y)$ ” con el fin de obtener un hidrograma linealizado acorde con la Ecuación 5.

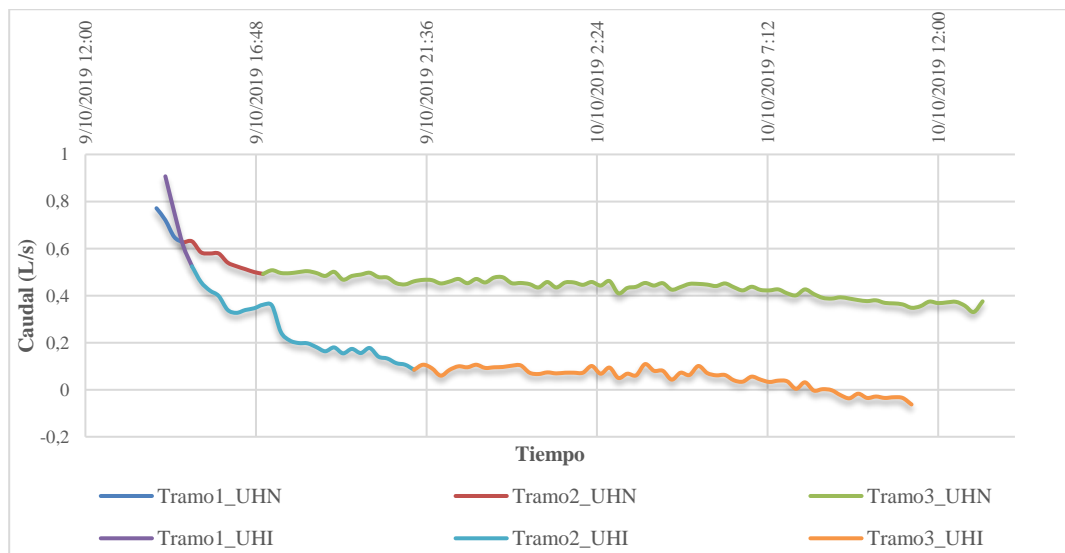


Figura 9. Tramos de estudio para UHI y UHNI. 9 de octubre de 2019

Tabla 3

Tramos de estudio para UHI y UHNI. 9 de octubre

Unidad Hidrológica	Tramo 1		Tramo 2		Tramo 3	
	Inicio	Fin	Inicio	Fin	Inicio	Fin
Natural	9/10/2019 14:00	9/10/2019 14:45	9/10/2019 14:45	9/10/2019 17:00	9/10/2019 17:00	10/10/2019 13:15
Intervenida	9/10/2019 14:15	9/10/2019 15:00	9/10/2019 15:00	9/10/2019 21:15	9/10/2019 21:15	10/10/2019 11:15

Una vez determinadas las pendientes de las rectas que conformaban cada hidrograma y teniendo en cuenta que la constante de tiempo T es el inverso de este valor, se calcularon T1, T2 y T3.

Finalmente, se realizó un análisis estadístico en el que se estableció la media, varianza, diferencia y valor p utilizando una prueba de hipótesis de T-test con el fin de realizar comparaciones entre las constantes obtenidas para cada unidad y de esta forma determinar si una presentaba un mejor servicio de regulación en comparación con la otra. En el Anexo 1 se presentan las gráficas correspondientes a todos los eventos analizados.

**3.4.2 Índices hidrológicos.** El cálculo de los índices DHQ25 y DLQ75 descritos en el numeral 2.1.4 involucró en primera instancia el cálculo de los percentiles 75 y 25 para cada una de las unidades hidrológicas tanto la intervenida como para la natural. Para este cálculo se usaron todos los datos (recolectados cada 15 minutos) disponibles del monitoreo del caudal y se hizo uso de la Ecuación 6.

$$Px = \frac{x * N}{100} \quad (6)$$

Donde, Px es la posición del percentil de un conjunto ordenado de menor a mayor, x el percentil (25 o 75) y N es el número total de datos recolectados en el periodo de análisis (Triola, 2009). Los datos recolectados para la UHI fueron 9281 y para la UHN 9558 (recolectados cada 15 minutos), puesto que, durante el periodo comprendido entre las 12:45 pm del 30 de octubre de 2019 y las 8:00 am del 2 de noviembre de 2019 no se monitoreo el caudal en la unidad intervenida por problemas técnicos presentados en el transductor de presión. Los percentiles calculados se resumen en la Tabla 4.

Tabla 4  
*Percentiles calculados*

UH	Caudal [L/s]	
	Percentil 25	Percentil 75
Natural	2.52	3.35
Intervenida	1.28	3.60

Posteriormente, se establecieron los tramos sobre los hidrogramas en donde el valor del caudal superase el percentil 75 o por el contrario quedase por debajo del percentil 25, una vez identificados dichos tramos, se tomó nota de cuántos periodos de tiempo cumplían con estas características, así como su duración en minutos. Mediante la Ecuaciones 7 y 8 se obtuvieron los dos índices objeto de análisis.

$$DLQ75 = \frac{SUM(DQ < Q75)}{NQ < Q75} \quad (7)$$

$$DHQ25 = \frac{SUM(DQ > Q25)}{NQ > Q25} \quad (8)$$

En donde, los factores  $SUM(DQ < Q75)$  y  $SUM(DQ > Q25)$  representan la sumatoria de las duraciones de todos los tramos que tuviesen caudales por debajo del percentil 25 o por encima del percentil 75 respectivamente, y  $N(Q < Q75)$  y  $N(Q > Q25)$  representan el número de tramos resultantes para cada uno de los percentiles en cada unidad hidrológica estudiada. Estos datos pueden encontrarse en el Anexo 2.

Finalmente, una vez calculados los índices en cada unidad se compararon teniendo en cuenta el estudio realizado por Ochoa-Tocachi y demás autores quienes encontraron que el  $DLQ75$  suele tener valores más pequeños en cuencas forestadas y por ende es un indicador de una mejor capacidad de regulación y adicionalmente que el  $DHQ25$  suele ser mayor en cuencas forestadas de páramo (Ochoa-Tocachi et al., 2016), y se verificó si en efecto esto ocurría en las unidades en estudio.

**3.4.3 Análisis de extracciones.** Mediante la información obtenida del administrador de la finca, los datos recolectados en las jornadas de aforo de extracciones y observaciones visuales en campo se pudo analizar y determinar un comportamiento aproximado en cada extracción, así como también el uso que se le daba.

E1: Esta extracción es la que se encuentra a mayor altitud, por ella pasa un caudal medio de 1.63 L/s cuando se encuentra en funcionamiento y consiste en una especie de zanja relativamente profunda de la cual sale una manguera de 2” de diámetro, que rara vez funciona debido a que solo se usa para el riego de cultivos en temporada seca. En dicha temporada no se usa más de dos días por semana y mientras no se necesite riego se pone una bolsa plástica en la entrada de la manguera para evitar que siga succionando agua. De todos los aforos que se realizaron, solo una vez, en el aforo del 03/12/2019 se encontró la extracción en funcionamiento. Sin embargo, para el segundo recorrido de ese mismo día la manguera se había obstruido naturalmente por sedimento que tapó la rejilla en el inicio de la manguera, haciendo que fuese aún más incierto su funcionamiento. Cabe aclarar que para el cálculo del caudal medio se tuvo que retirar la bolsa plástica en las ocasiones que se encontrase puesta en la manguera.



*Figura 10.* Detalle extracción E1

E2: Esta extracción se encuentra a unos pocos metros de la E1, lleva un caudal promedio de 1.81 L/s y funciona mediante un pequeño desvío del cauce con el uso de una zanja la cual conecta

a un tanque que es usado para repartir el agua a la finca ubicada en la unidad intervenida junto con otras fincas cercanas. Esta agua es netamente para consumo humano.



*Figura 11. Detalle extracción E2*

E3: Esta extracción se encuentra en la parte más baja de la unidad intervenida, consiste en dos mangueras de 2" conectadas a una pequeña presa de concreto, la manguera 1 lleva un caudal medio de 2.27 L/s y la 2 de 2.63 L/s cuando se encuentran funcionando a tubo lleno (ver Figura 12), dichas mangueras son usadas netamente para consumo humano. Mediante los aforos de extracciones se observó que la mayoría de las veces solo funcionaba una de las mangueras ya sea la 1 o la 2. Se pudo observar también que mientras una funcionaba a tubo lleno la otra tenía caudales muy pequeños de entre 0.29 L/s y 0.59 L/s para la manguera 1 y 2 respectivamente.



*Figura 12. Detalle extracción E3*

#### 4. Resultados y discusión

Mediante el uso del concepto del reservorio lineal se logró determinar las constantes de tiempo  $T$  para cada uno de los eventos de precipitación ocurridos a lo largo del periodo de análisis de 3 meses y una semana comprendido entre el 27/09/2019 y el 04/01/2020, que cumplieren los criterios de selección establecidos y los cuales fueron analizados conforme con lo indicado en el numeral 3.4. Las constantes de tiempo  $T_1$ ,  $T_2$  y  $T_3$  calculadas para cada evento se presentan en la Tabla 5. Como se mencionó anteriormente, el análisis de las unidades hidrológicas se realizó teniendo en cuenta cálculos estadísticos (media, varianza, diferencia porcentual respecto a UHN y valor  $P$ ). Los resultados se pueden apreciar en la Tabla 6. Una vez finalizado el análisis estadístico se puede apreciar que las constantes de tiempo  $T$  obtenidas para la unidad hidrológica natural son en promedio más grandes que las de la unidad hidrológica intervenida, lo cual indicaría una descarga más lenta y prolongada en la unidad natural, sin embargo, al observar la diferencia porcentual obtenida en el caso de la constante  $T_3$ , esta no es significativa, esto se confirma al realizar la prueba de hipótesis  $T$ -test para valores agrupados y varianzas poblacionales desconocidas (Mendenhall & Sincich, 2016), en donde se tomó como hipótesis nula la igualdad de las medias de las constantes entre las dos unidades analizadas arrojando como resultado el valor  $P$ , el cual significa la probabilidad de que ocurra la hipótesis anteriormente descrita.

Tabla 5  
*Constantes de tiempo  $T$*

Evento	Fecha	Unidad hidrológica natural (UHN)			Unidad hidrológica intervenida (UHI)		
		$T_1$ [h]	$T_2$ [h]	$T_3$ [h]	$T_1$ [h]	$T_2$ [h]	$T_3$ [h]
1	9/10/2019	2.13	6.71	64.10	0.84	7.19	44.82
2	12/10/2019	2.92	7.13	36.60	1.46	3.64	14.10
3	16/10/2019	1.61	4.87	61.57	1.13	(-)	44.78

4	25/10/2019	(-)	6.57	40.80	(-)	3.94	37.56
5	3/11/2019	3.03	7.94	60.76	2.40	(-)	70.80
6	5/11/2019	3.38	21.09	61.70	2.86	18.42	67.42
7	13/11/2019	2.17	8.57	40.38	1.11	4.32	59.67
8	23/11/2019	4.59	11.21	(-)	1.50	4.23	63.48
9	17/12/2019	1.50	6.37	40.49	1.43	3.36	22.51

*Nota:* \* El símbolo (-) indica que las constantes no se desarrollan en el hidrograma, posiblemente debido a imprecisiones en la medición de los instrumentos que generaban fluctuaciones en los datos y gráficamente en el hidrograma no eran apreciables los tres tramos lineales.

Tabla 6  
*Análisis estadístico*

	Media UHN	Varianza	Media UHI	Varianza	Diferencia Porcentual	Valor P
T1 [h]	2.67	1.06	1.59	0.47	40%	0.028
T2 [h]	8.94	23.86	6.44	29.52	28%	0.351
T3 [h]	50.80	146.80	47.24	399.44	7%	0.668

Por esta razón, se reitera que el comportamiento en términos de la constante T3 tiende a ser similar en las unidades en estudio. Teniendo en cuenta que las constantes T1, T2 y T3 representan la respuesta de la cuenca en períodos cortos, medios y largos de tiempo respectivamente (Roa-García et al., 2011) o a su vez la escorrentía superficial, el flujo de agua entre el suelo y la roca y la retención de agua en el perfil de suelo (Célleri Alvear et al., 2004). Se podría decir, que el cambio del uso del suelo ha generado efectos negativos principalmente sobre los flujos rápidos que se presentan después de los eventos de lluvia, es decir en la escorrentía superficial la cual ha aumentado en un 40% en la unidad intervenida. Esto se puede deber a la presencia de surcos en las zonas de cultivo que desvían el agua y favorecen el flujo de esta actuando como si fueran canales. Por otro lado, de acuerdo con los resultados se puede decir que los efectos del cambio del uso del suelo tienden a ser menores en los flujos más profundos como los que representa la constante T3. Adicionalmente, la capacidad de amortiguamiento de la UHN es 25% mayor comparada con UHI. Cabe resaltar que para el cálculo de las constantes de tiempo T no se

consideraron los cambios entre periodos, ya sea secos o húmedos esto conforme con el estudio que realizaron Buytaert y otros autores, en donde se buscaba determinar un comportamiento global en la regulación de las cuencas, para esto se usaron periodos de análisis de entre 12 y 14 meses (Buytaert et al., 2004) y solo se obtuvo un valor promedio para T1, T2 y T3 los cuales representan de forma general la descarga de las cuencas sin considerar la estacionalidad.

Por otro lado, con el uso de los índices hidrológicos DLQ75 y DHQ25 se pudo identificar la duración promedio de los flujos que superaban el percentil 75 (flujos altos) o que quedaban debajo del percentil 25 (flujos bajos) en cada una de las unidades hidrológicas estudiadas. La Tabla 7 presenta los valores obtenidos.

Tabla 7  
*Índices hidrológicos calculados*

	UHN	UHI	Diferencia Porcentual
DLQ75 [h]	6.79	8.52	25%
DHQ25 [h]	14.65	16.99	16%

Los índices DLQ75 y DHQ25 pueden ser indicadores de la capacidad de retención de las unidades hidrológicas. Por tanto, teniendo en cuenta los estudios realizados por otros autores y conforme con el análisis propuesto en el numeral 3.4.2 de este documento, se podría decir que el comportamiento es el esperado en el caso del DLQ75 puesto que este es mayor en un 25% en la unidad intervenida predominando así los pulsos bajos. Esto indicaría teóricamente que esta unidad tiende a retornar a su caudal base más rápido después de un evento de precipitación en comparación con la unidad natural, lo cual sugeriría una disminución en la capacidad de regulación de la unidad intervenida. Sin embargo, si se observa el índice DHQ25 su comportamiento es contrario al esperado ya que este es mayor en la unidad intervenida generando como resultado una mayor capacidad para mantener por más tiempo los caudales altos generados por eventos de lluvia. Sin embargo, esto no es coherente con lo encontrado con el reservorio lineal en donde se evidenció

que las constantes T1 y T2 asociadas a periodos cortos y medios de tiempo después de un evento de precipitación eran mayores en la unidad natural indicando que esta libera más lenta y prolongadamente el recurso hídrico. Las alteraciones en los valores esperados de los índices pueden ser producto de la dinámica variable y compleja que hay en los puntos de extracción. Al observar los valores de los caudales más bajos que se presentaron durante el periodo de análisis en cada unidad se encontró que en el caso de UHN es de 1.51 [L/s] y en UHI es de 0.43 [L/s], la diferencia es de 71%, esta reducción significativa en el caudal de la unidad intervenida genera que al analizar los percentiles, en el caso del 75, el valor obtenido sea menor y por ende las duraciones de los periodos de tiempo en los cuales el caudal tiende a ser mayor que el del percentil 75 se vuelven más largas. Adicionalmente, con observaciones de campo fue posible identificar que el efecto de las extracciones es notorio en el caudal que llega al cierre de la cuenca, puesto que, en una salida en la que se estaban caracterizando extracciones y los tres puntos se encontraban funcionando era evidente la disminución que tenía el caudal. Por tanto, es posible decir que el uso de los índices en este caso no fue concluyente y por lo tanto no fueron efectivos para evaluar la regulación en un entorno donde las extracciones estaban presentes. Los resultados no son consecuentes con la literatura, pero esto se puede atribuir al hecho de que las unidades hidrológicas son más pequeñas que las cuencas que normalmente se estudian. Adicionalmente, en ninguna investigación encontrada donde se trabaje esta metodología se especifica si existen o no extracciones y si estas influyen en el comportamiento de los resultados, como en este caso, que al ser caudales tan pequeños el efecto de las extracciones es notorio.

Una vez finalizados los cálculos y analizados los resultados obtenidos se encontró que estos, en el caso del reservorio lineal, cumplen con el comportamiento esperado puesto que las constantes en la unidad natural son mayores que en la intervenida. Sin embargo, es importante tener en cuenta

que, al no presentarse diferencias significativas en el análisis estadístico, en el caso de T3, se abre la posibilidad de creer que la regulación en las cuencas pueda ser similar, esta duda podría solucionarse al analizar por un periodo de tiempo más largo y verificar si en efecto el comportamiento de las constantes sigue siendo el mismo. Sin embargo, esto se sale del alcance del estudio actual. En cuanto al efecto de las extracciones no se considera relevante en esta metodología pues son eventos que abarcan períodos cortos de tiempo. Por otro lado, en cuanto a los índices hay cierta incertidumbre frente al comportamiento de las unidades puesto que al utilizar esta metodología hay discrepancia en los resultados obtenidos, ya que, uno de los índices cumple con lo esperado mientras que el otro no.

Es importante resaltar que durante el desarrollo del proyecto se presentaron una serie de dificultades que retrasaron la toma de datos, en primera instancia, la puesta en marcha de los vertederos que necesitó más tiempo de lo planificado debido a filtraciones. Así mismo, aproximadamente un mes después de la instalación de los transductores de presión, el transductor ubicado en la unidad natural presentó fallas técnicas que fueron verificadas con pruebas controladas de balde. En el caso del reservorio, podría decirse que este retraso en la toma de datos pudo resultar negativo puesto que no se pudo analizar un mes (finales de agosto y septiembre), en el cual, según los datos registrados por la estación meteorológica hubo eventos de precipitación que podrían haber permitido obtener una mejor aproximación de las constantes T.

## 5. Conclusiones

Al evaluar el servicio hidrológico de regulación, se encontró que para el periodo comprendido entre el 27/09/2019 y el 04/01/2020, haciendo uso del concepto del reservorio lineal se pudo determinar que los efectos antrópicos tienen incidencia en la capacidad de regulación de las unidades hidrológicas, sin embargo, al analizar los resultados obtenidos mediante los índices hidrológicos estos no resultaron ser los esperados y por ende esta metodología no resultó adecuada para evaluar el servicio de regulación en un caso donde las extracciones estaban presentes y eran apreciables.

El uso del modelo de reservorio lineal mostró que los cambios de uso del suelo tienen incidencia en la capacidad de regulación de cuencas de páramo, en este caso, se encontró que la unidad hidrológica natural tiene una capacidad de regulación 25% mayor que la unidad intervenida. Sin embargo, aún existe incertidumbre sobre el efecto real que tienen en los flujos más profundos, puesto que, la diferencia porcentual encontrada en la constante T3 que los representa no es significativa, indicando que es importante analizar durante un periodo de tiempo más largo y determinar si en efecto el comportamiento sigue siendo el mismo.

Los resultados obtenidos a través de los índices hidrológicos no resultaron ser los esperados para el periodo analizado, puesto que para afirmar que exista una mejor regulación en la unidad natural, el índice DLQ75, que representa la duración promedio de flujos bajos, debe ser menor en la unidad intervenida y DHQ25, que representa la duración promedio de flujos altos, debe ser mayor en la unidad natural. Sin embargo, en este estudio se encontró incoherencia puesto que DLQ75 cumple con el comportamiento esperado mientras que DHQ25 no. Por lo tanto, se abre la posibilidad de creer que el efecto de las extracciones sobre la unidad intervenida, en donde los

caudales de la corriente disminuyen a menos de 1 L/s en la temporada más seca del periodo analizado, genera efectos negativos sobre esta clase de metodologías en las que es necesario incluir todos los datos del periodo de análisis.

En estudios futuros, es importante considerar que en periodos de tiempo cortos puede existir incertidumbre sobre los resultados que se obtienen, pues a medida que los bancos de datos son más amplios los resultados se aproximan más al comportamiento real. Por otra parte, el aporte que tiene la investigación actual en términos del impacto que puede generar en la comunidad radica en entender que las prácticas agrícolas de alguna forma están generando afectaciones en el ecosistema, pero que estas pueden disminuirse si se implementan actividades más sostenibles.

### Referencias

- Bonnesoeur, V., Locatelli, B., Guariguata, M. R., Ochoa-Tocachi, B. F., Vanacker, V., Mao, Z., ... Mathez-Stiefel, S.-L. (2019). Impacts of forests and forestation on hydrological services in the Andes: A systematic review. *Forest Ecology and Management*, 433, 569–584. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.11.033>
- Brauman, K. A., Daily, G. C., Duarte, T. K., & Mooney, H. A. (2007). The nature and value of ecosystem services: An overview highlighting hydrologic services (M. P.A. & G. A., Eds.). *Annual Review of Environment and Resources*, Vol. 32, pp. 67–98. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.32.031306.102758>
- Brown, A. E., Zhang, L., McMahon, T. A., Western, A. W., & Vertessy, R. A. (2005). A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation. *Journal of Hydrology*, 310(1), 28–61. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.12.010>
- Buytaert, W., Céleri, 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. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.06.002>
- Buytaert, W., De Bièvre, B., Wyseure, G., & Deckers, J. (2004). The use of the linear reservoir concept to quantify the impact of changes in land use on the hydrology of catchments in the Andes. *Hydrology and Earth System Sciences*, 8(1), 108–114. Recuperado de <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-2542423897&partnerID=40&md5=e7f36d819e6092bd9f789641a90bfb1f>
- Buytaert, W., Wyseure, G., De Bièvre, B., & Deckers, J. (2005). The effect of land-use changes

- on the hydrological behaviour of Histic Andosols in south Ecuador. *Hydrological Processes*, 19(20), 3985–3997. <https://doi.org/10.1002/hyp.5867>
- Cárdenas, M. F., & Tobón, C. (2017). Rehabilitation of hydrological functioning of paramo ecosystems in Colombia. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 20(2), 403–412. Recuperado de [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0123-42262017000200018&lng=en&nrm=iso&tlng=es](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-42262017000200018&lng=en&nrm=iso&tlng=es)
- Céleri Alvear, R., De Bièvre, B., & Iñiguez, V. (2004). *Efectos de la cobertura vegetal en la regulación hidrológica de microcuencas de páramo*.
- CORPONOR, CDMB, & Instituto Humboldt. (2008). *Declaratoria de un área de manejo especial en el páramo de Berlín*.
- Crespo, P., Céleri, R., Buytaert, W., Ochoa, B., Cárdenas, I., Iñiguez, V., ... De Bièvre, B. (2014). *Impactos del cambio de uso de la tierra sobre la hidrología de los páramos húmedos andinos*.
- Díaz-Granados Ortiz, M. A., Navarrete González, J. D., & Suárez López, T. (2005). Páramos: Hidrosistemas Sensibles. *Revista de Ingeniería*, 22, 64–75.
- Dingman, S. L. (1994). *Physical Hydrology*. Nueva York, Estados Unidos: Macmillan.
- Hein, L., van Koppen, K., de Groot, R. S., & van Ierland, E. C. (2006). Spatial scales, stakeholders and the valuation of ecosystem services. *Ecological Economics*, 57(2), 209–228. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2005.04.005>
- Jiménez, E. H., & Materón, M. (1986). *Hidrología Básica. Tomo III*. Cali, Colombia.
- Ley No. 1930. Disposiciones para la gestión integral de los páramos en Colombia, Bogotá D.C, Colombia, 27 de julio de 2018.
- Martinez, E., Coello, C., & Feyen, J. (2017). Análisis comparativo del comportamiento de la

escorrentía de tres microcuencas andinas con diferente régimen de precipitación y cobertura vegetal. *Maskana*, 8(1).

Mendenhall, W. M., & Sincich, T. L. (2016). *Statistics for Engineering and the Sciences* (6th ed.).

Millennium Ecosystem Assessment. (2005). *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis* (Island Press, Ed.). Washington DC, Estados Unidos: Island Press.

Morales Rivas, M., Otero García, J., Van der Hammen, T., Torres Perdígón, A., Cadena Vargas, C. E., Pedraza Peñaloza, C. A., ... Cárdenas Valencia, L. (2007). *Atlas de páramos de Colombia*. Bogotá D.C, Colombia: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.

Naciones Unidas. (2018). *La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe*. Retrieved from (LC/G.2681-P/Rev.3)

Ochoa-Tocachi, B. F., Buytaert, W., & De Bièvre, B. (2016). Regionalization of land-use impacts on streamflow using a network of paired catchments. *Water Resources Research*, 52(9), 6710–6729. <https://doi.org/10.1002/2016WR018596>

Ochoa-Tocachi, B. F., Buytaert, W., De Bièvre, B., Célleri, R., Crespo, P., Villacís, M., ... Arias, S. (2016). Impacts of land use on the hydrological response of tropical Andean catchments. *Hydrological Processes*, 30(22), 4074–4089. <https://doi.org/10.1002/hyp.10980>

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. <https://doi.org/10.1002/rra.700>

Ongley, E. D. (1997). *Lucha contra la contaminación agrícola de los recursos hídricos*. Recuperado de <http://www.fao.org/3/W2598S/w2598s00.htm>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2011). *El*

*estado de los recursos de tierras y aguas del mundo para la alimentación y la agricultura. La gestión de los sistemas en situación de riesgo.* (M. Roma y Mundi-Prensa, Ed.). Madrid, España: M.Roma y Mundi-Prensa.

Richter, B. D. (1996). A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems . *Conservation Biology*, 10(4), 1163–1174. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.1996.10041163.x>

Roa-García, M. C., Brown, S., Schreier, H., & Lavkulich, L. M. (2011). The role of land use and soils in regulating water flow in small headwater catchments of the Andes. *Water Resources Research*, 47(5). <https://doi.org/10.1029/2010WR009582>

Sarmiento Pinzón, C. E., Cadena Vargas, C. E., Sarmiento Giraldo, M. V., & Zapata Jiménez, J. A. (2013). *Aportes a la conservación estratégica de los páramos de Colombia: Actualización de la cartografía de los complejos de páramo a escala 1:100.000*. Bogotá D.C, Colombia: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.

Triola, M. F. (2009). *Estadística* (10th ed.).

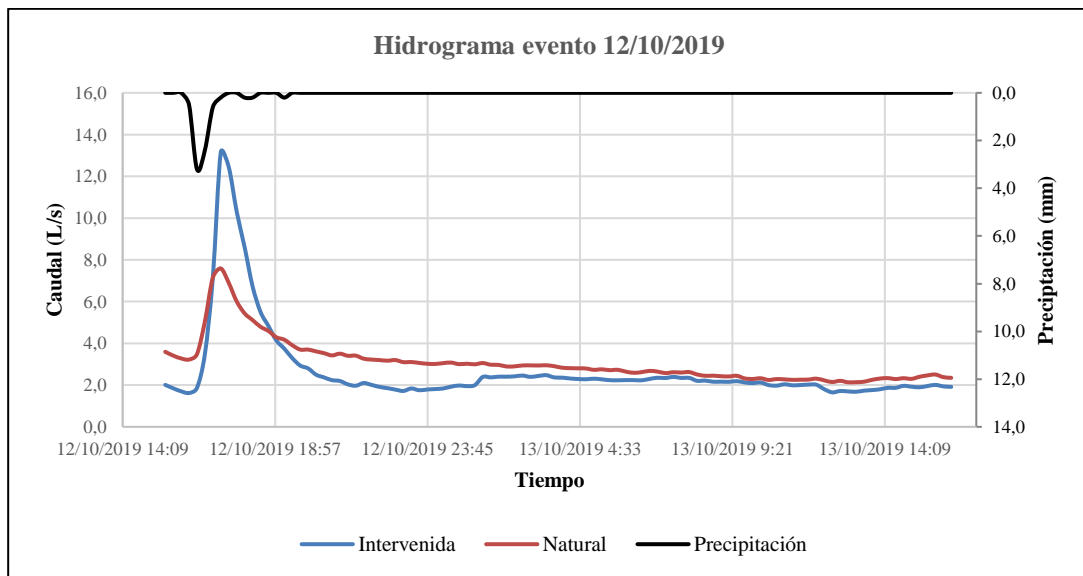
WWAP (Programa Mundial de las Naciones Unidas de Evaluación de los Recursos Hídricos). (2018). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2018: Soluciones basadas en la naturaleza para la gestión del agua*. Paris, Francia: UNESCO.

Apéndices

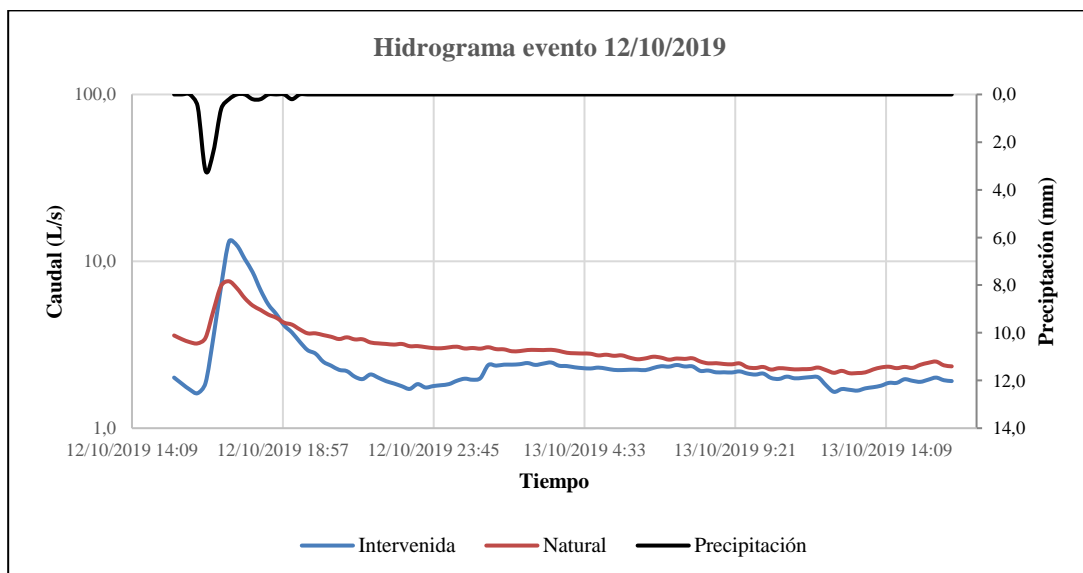
Apéndice A. Gráficas de eventos analizados para el reservorio lineal

- **Fecha:** 12 de octubre de 2019

Hidrograma del evento 12/10/2019

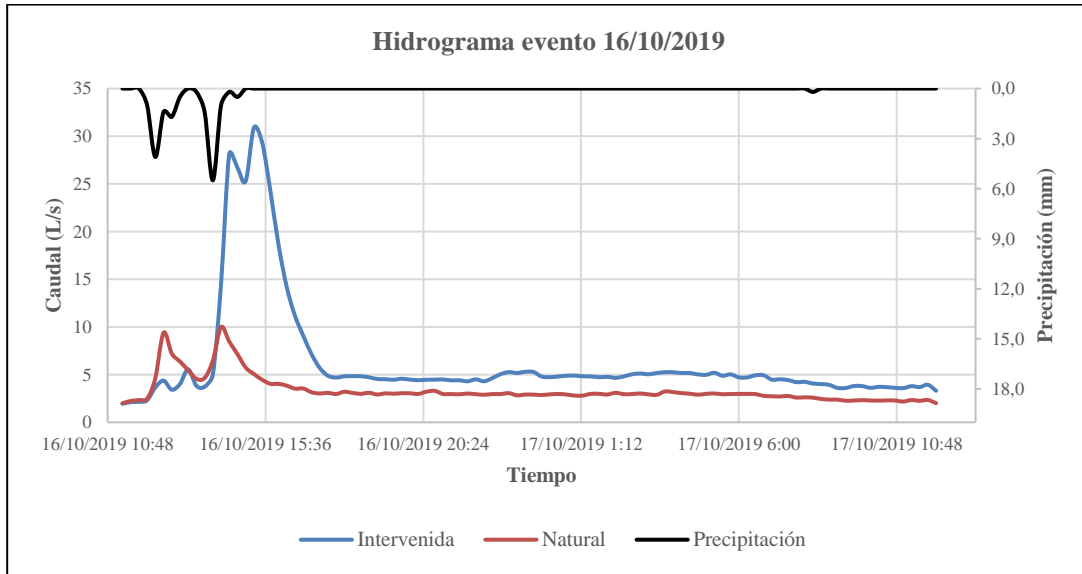


Hidrograma en escala logarítmica del evento 12/10/2019

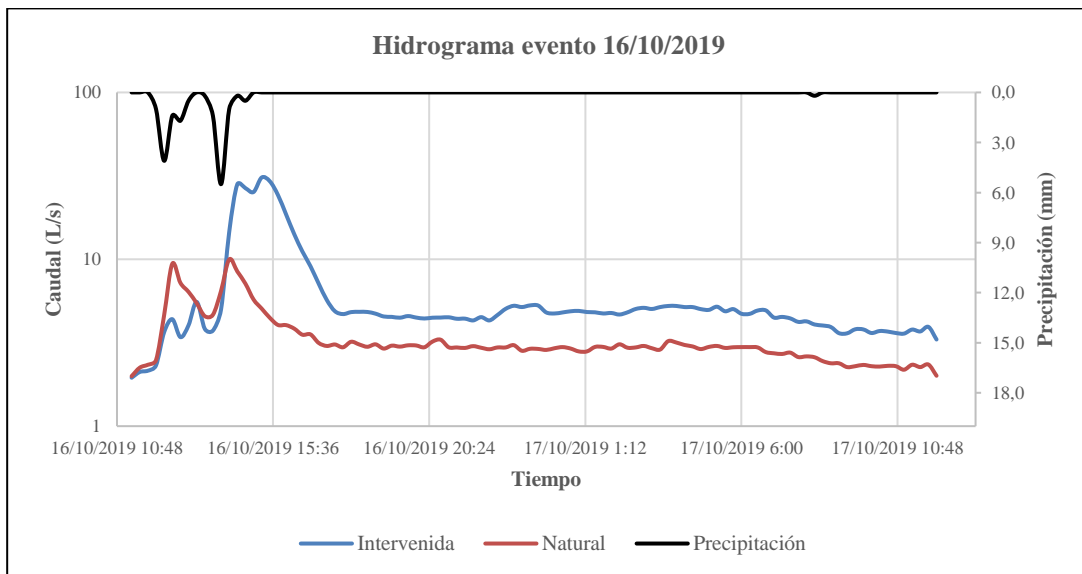


- **Fecha:** 16 de octubre de 2019

Hidrograma del evento 16/10/2019

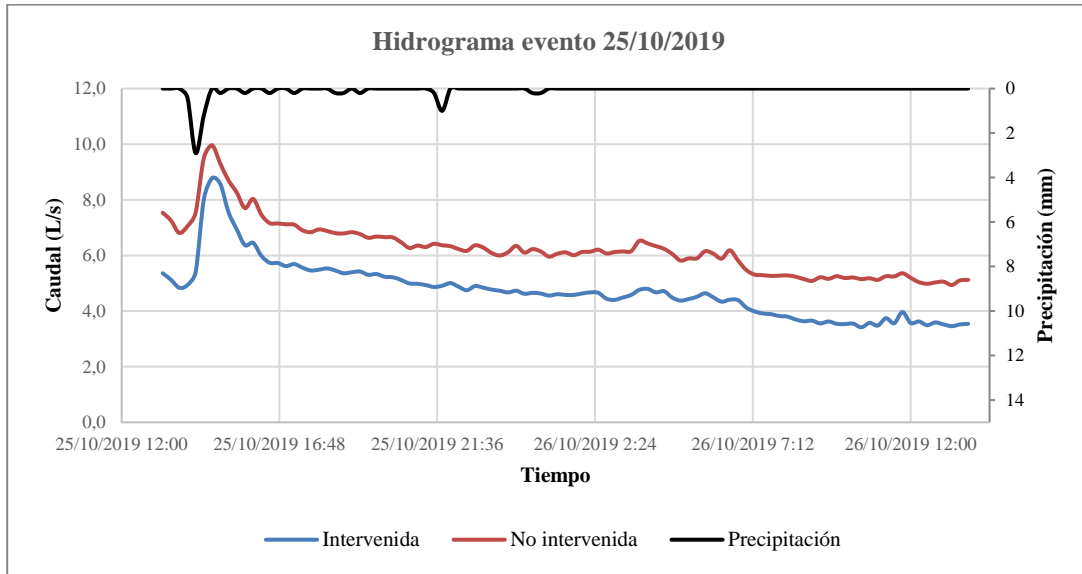


Hidrograma en escala logarítmica del evento 16/10/2019

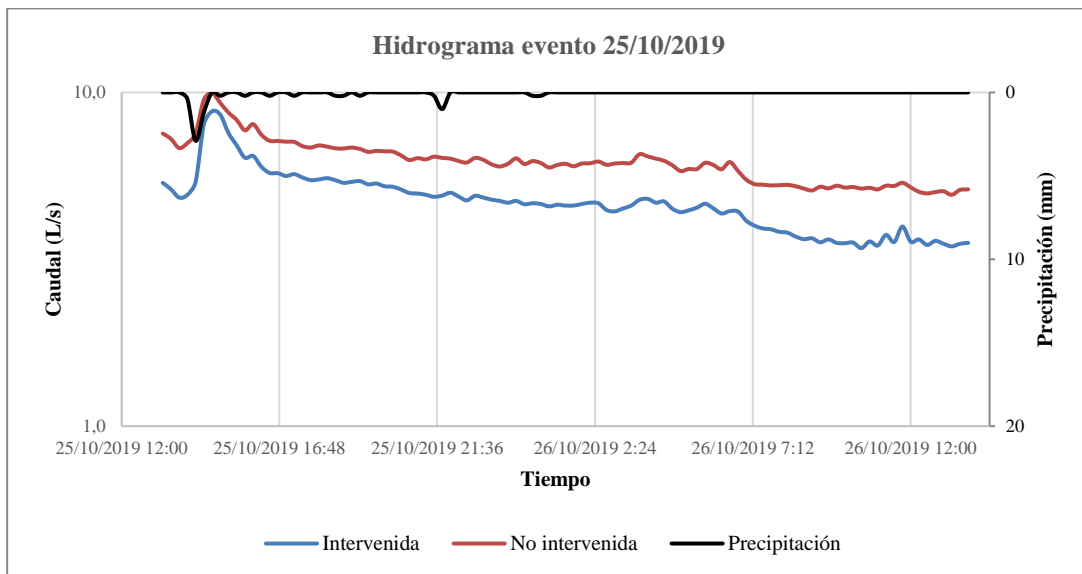


- **Fecha:** 25 de octubre de 2019

Hidrograma del evento 25/10/2019

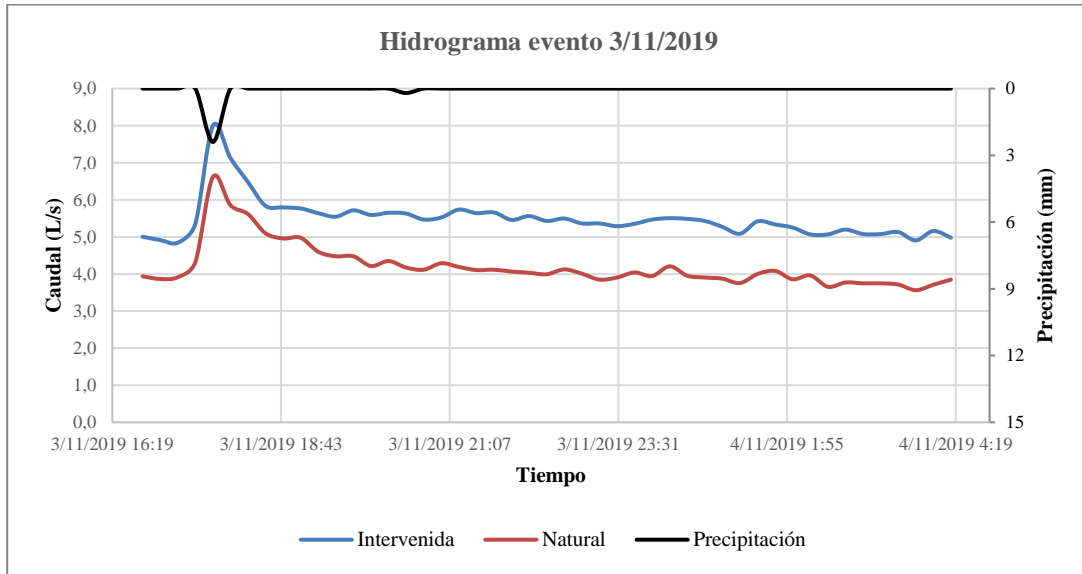


Hidrograma en escala logarítmica del evento 25/10/2019

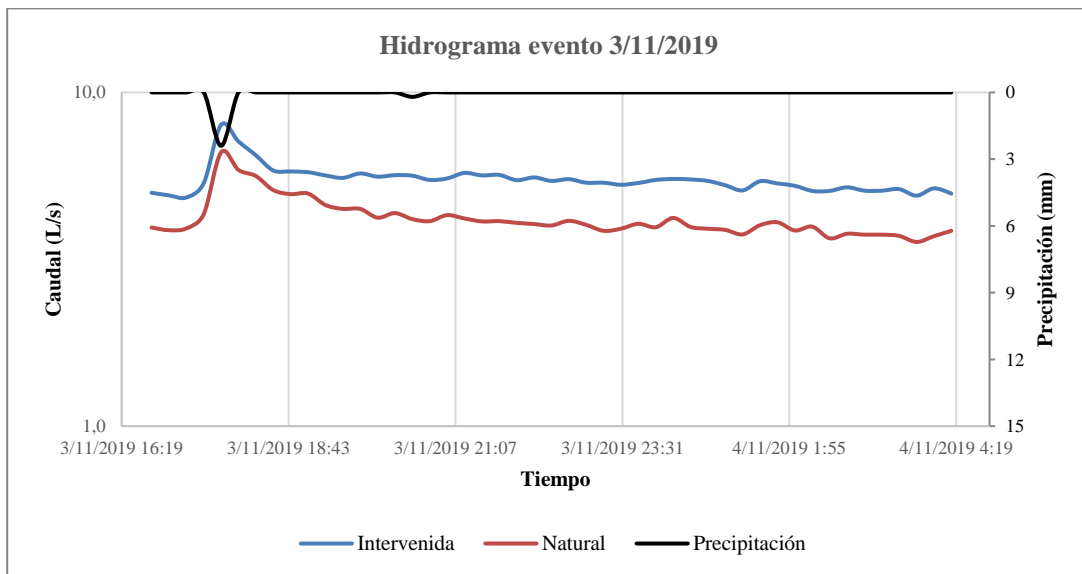


- **Fecha:** 03 de noviembre de 2019

Hidrograma del evento 3/11/2019

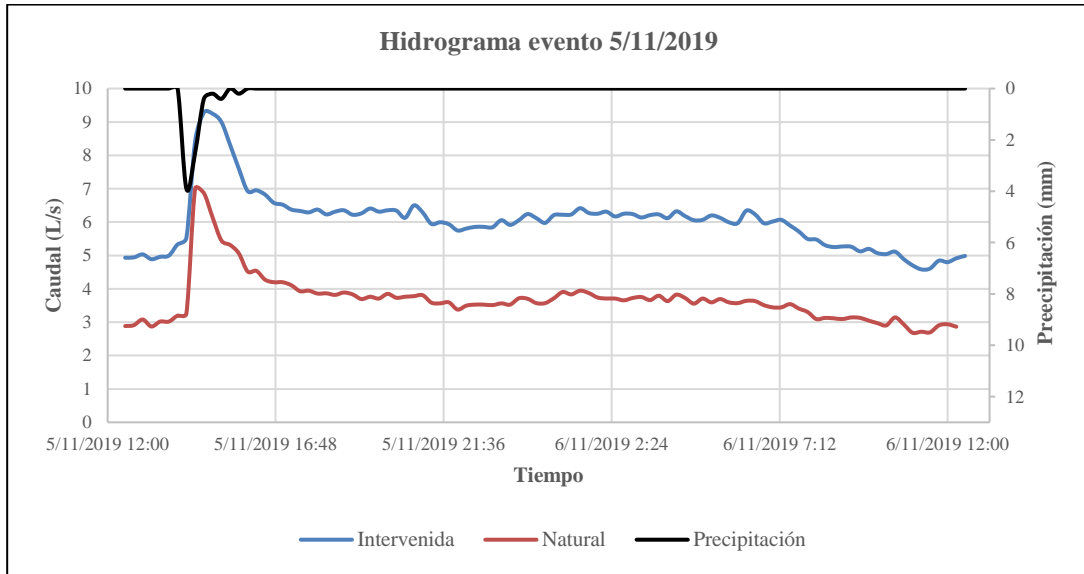


Hidrograma en escala logarítmica del evento 3/11/2019

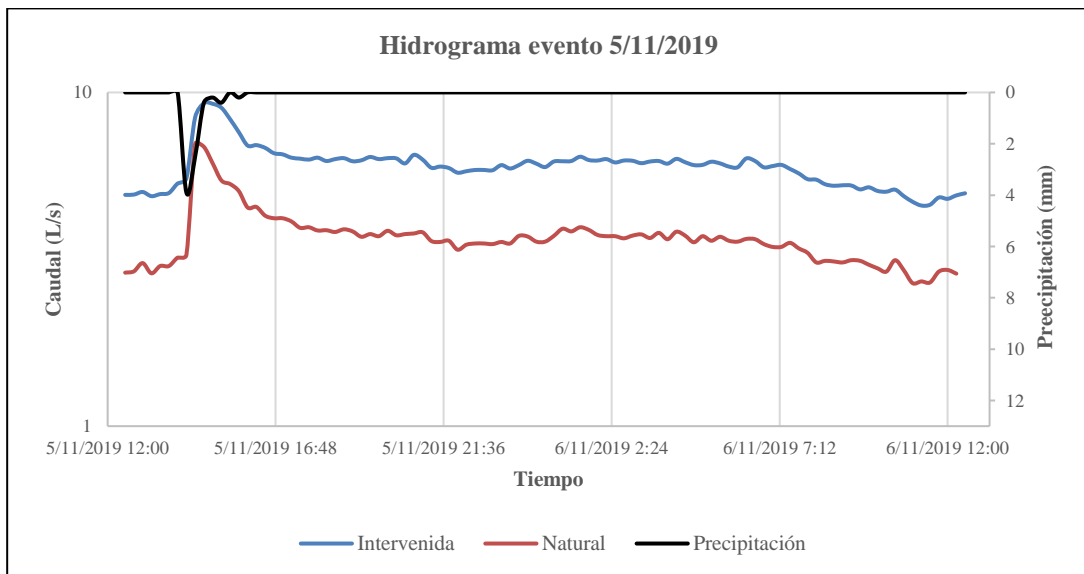


- **Fecha:** 05 de noviembre de 2019

Hidrograma del evento 5/11/2019

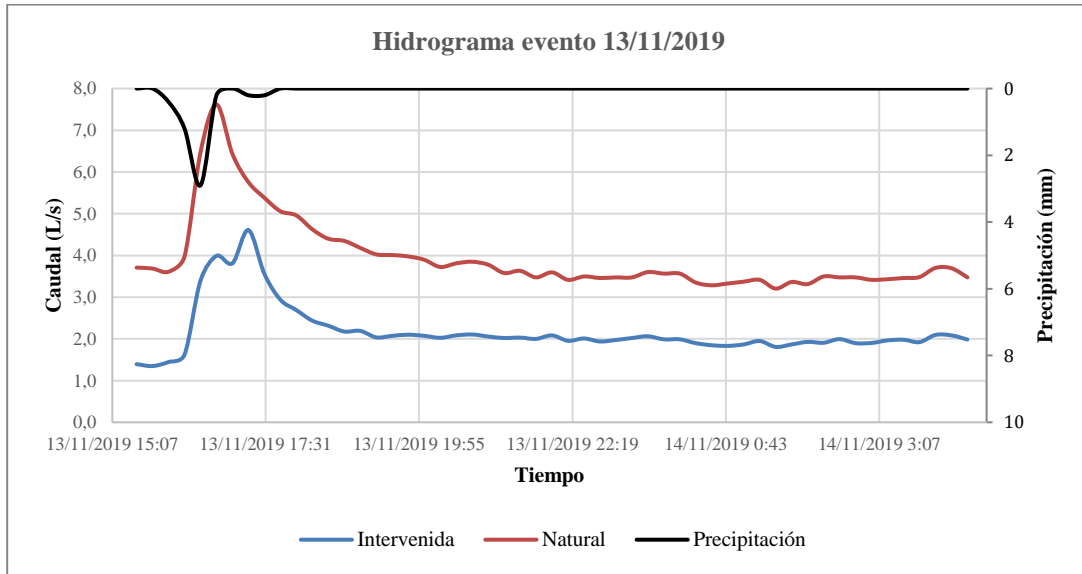


Hidrograma en escala logarítmica del evento 5/11/2019

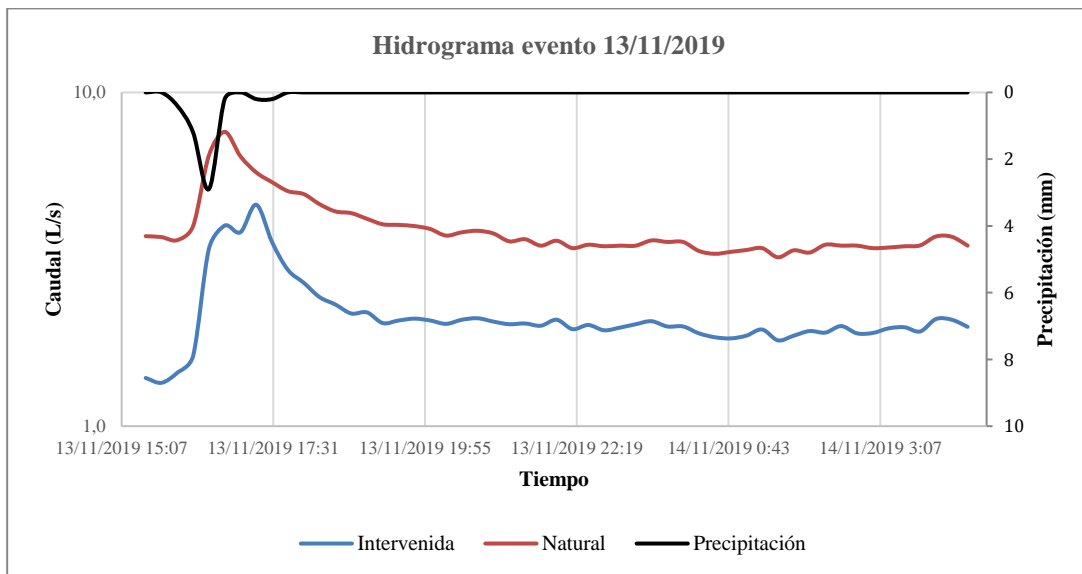


- **Fecha:** 13 de noviembre de 2019

Hidrograma del evento 13/11/2019

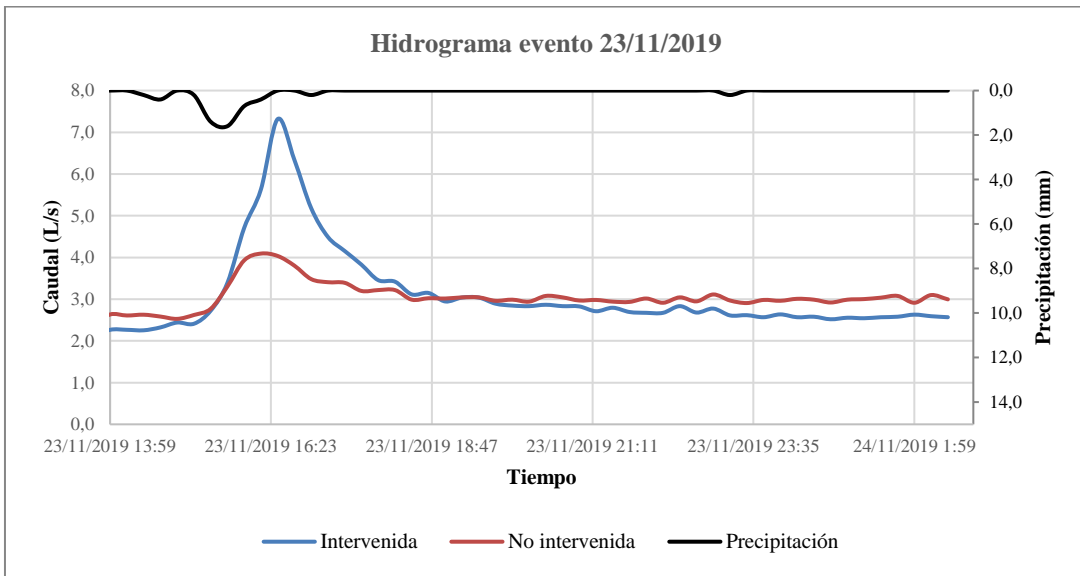


Hidrograma en escala logarítmica del evento 13/11/2019

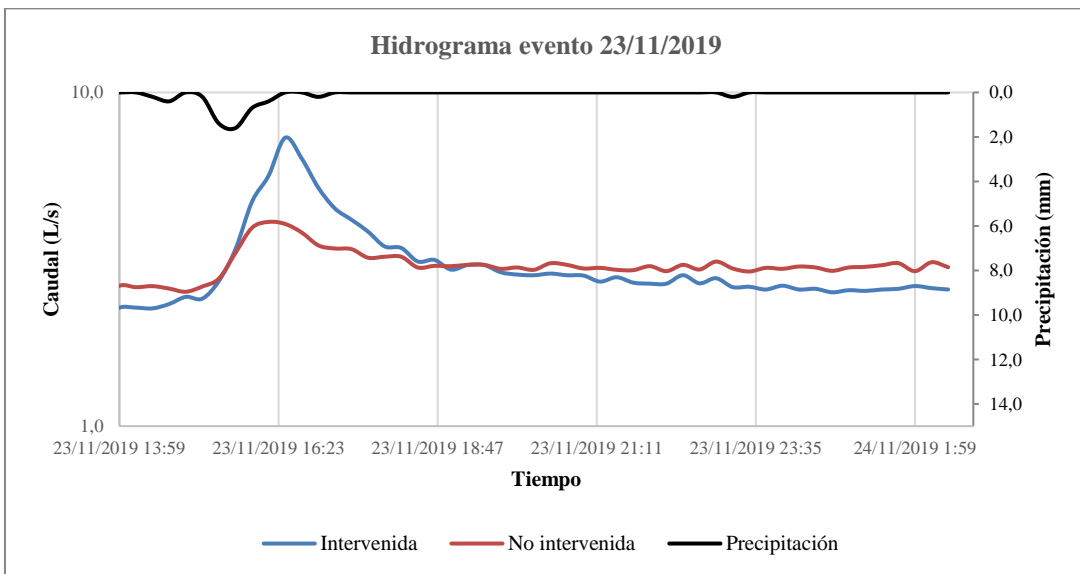


- **Fecha:** 23 de noviembre de 2019

Hidrograma del evento 23/11/2019

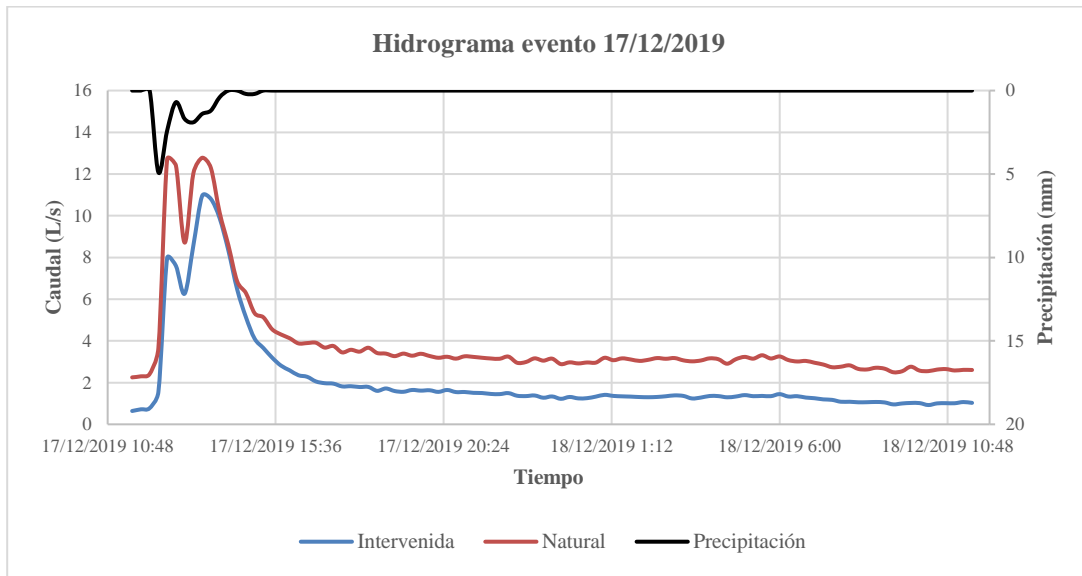


Hidrograma en escala logarítmica del evento 23/11/2019

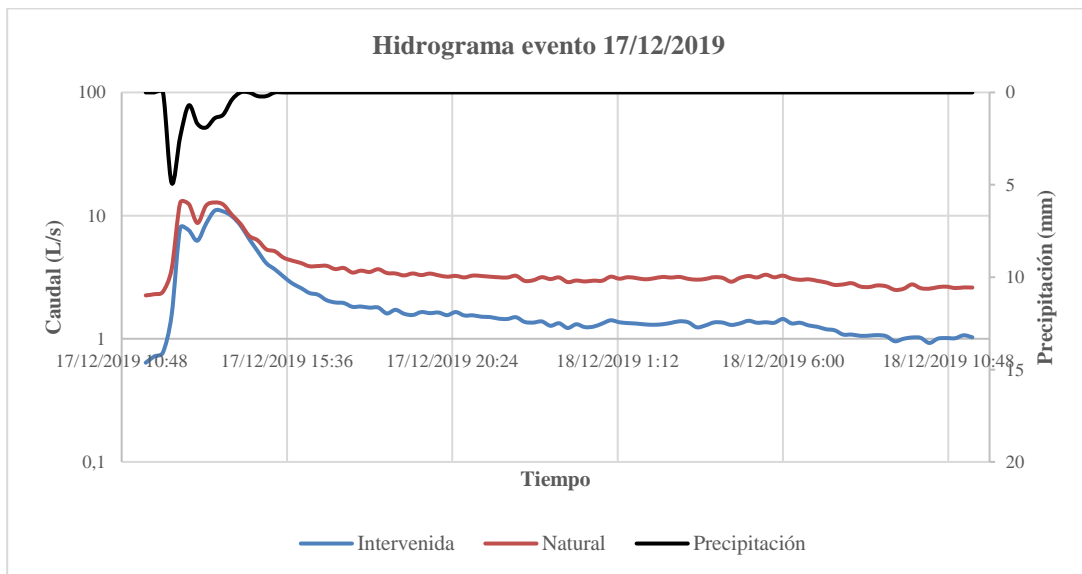


- **Fecha:** 17 de diciembre de 2019

Hidrograma del evento 17/12/2019



Hidrograma en escala logarítmica del evento 17/12/2019



**Apéndice B. Periodos de tiempo analizados para índices hidrológicos**

- Periodos de tiempo analizados para Unidad Hidrológica Intervenida (Inferiores al percentil 25)

<b>Periodos de tiempo</b>	<b>Inicio</b>	<b>Fin</b>	<b>Duración [h]</b>
1	3/10/2019 8:30	3/10/2019 13:15	4.75
2	3/10/2019 15:00	3/10/2019 16:30	1.5
3	4/10/2019 6:30	4/10/2019 17:45	11.25
4	5/10/2019 7:15	5/10/2019 15:15	8
5	6/10/2019 9:15	6/10/2019 11:45	2.5
6	6/10/2019 12:30	6/10/2019 17:30	5
7	7/10/2019 9:00	8/10/2019 0:00	15
8	8/10/2019 2:30	8/10/2019 10:15	7.75
9	9/10/2019 11:00	9/10/2019 13:15	2.25
10	9/10/2019 21:00	10/10/2019 13:30	16.5
11	10/10/2019 15:45	10/10/2019 17:45	2
12	10/10/2019 20:45	11/10/2019 14:45	18
13	12/10/2019 4:00	12/10/2019 5:15	1.25
14	12/10/2019 7:30	12/10/2019 9:15	1.75
15	12/10/2019 10:00	12/10/2019 13:45	3.75
16	7/11/2019 18:00	8/11/2019 3:00	9
17	8/11/2019 3:45	8/11/2019 4:15	0.5
18	8/11/2019 6:45	8/11/2019 20:45	14
19	9/11/2019 0:00	9/11/2019 4:15	4.25
20	9/11/2019 6:30	9/11/2019 12:15	5.75
21	9/11/2019 13:15	9/11/2019 20:15	7.0
22	9/11/2019 21:15	9/11/2019 22:45	1.5
23	10/11/2019 1:15	10/11/2019 2:15	1
24	10/11/2019 3:00	10/11/2019 4:00	1
25	10/11/2019 6:30	10/11/2019 15:00	8.5
26	10/11/2019 21:45	10/11/2019 22:30	0.75
27	11/11/2019 3:30	11/11/2019 5:15	1.75
28	11/11/2019 6:45	11/11/2019 20:15	13.5
29	12/11/2019 3:30	12/11/2019 4:00	0.5
30	12/11/2019 6:15	12/11/2019 15:15	9
31	13/11/2019 7:00	13/11/2019 13:45	6.75
32	16/11/2019 7:45	16/11/2019 22:30	14.75
33	16/11/2019 23:15	18/11/2019 3:15	28
34	18/11/2019 7:45	19/11/2019 1:45	18
35	19/11/2019 4:30	19/11/2019 6:00	1.5
36	19/11/2019 6:45	20/11/2019 2:30	19.75
37	20/11/2019 5:45	21/11/2019 5:45	24
38	21/11/2019 6:30	21/11/2019 17:30	11
39	28/11/2019 11:00	28/11/2019 11:30	0.5

40	28/11/2019 12:15	28/11/2019 12:45	0.5
41	28/11/2019 14:30	28/11/2019 16:00	1.5
42	30/11/2019 10:15	30/11/2019 12:45	2.5
43	1/12/2019 8:15	1/12/2019 23:15	15
44	2/12/2019 8:15	3/12/2019 12:30	28.25
45	3/12/2019 14:00	4/12/2019 22:45	32.75
46	4/12/2019 23:30	5/12/2019 0:00	0.5
47	5/12/2019 7:00	5/12/2019 20:15	13.25
48	6/12/2019 7:30	6/12/2019 17:30	10
49	7/12/2019 8:00	7/12/2019 23:00	15
50	7/12/2019 23:45	8/12/2019 0:15	0.5
51	8/12/2019 7:30	8/12/2019 14:45	7.25
52	9/12/2019 8:30	9/12/2019 17:30	9
53	10/12/2019 8:30	10/12/2019 18:15	9.75
54	11/12/2019 8:45	11/12/2019 15:00	6.25
55	13/12/2019 12:00	13/12/2019 14:00	2
56	14/12/2019 9:45	14/12/2019 17:15	7.5
57	15/12/2019 8:45	15/12/2019 13:45	5
58	15/12/2019 14:30	16/12/2019 2:00	11.5
59	16/12/2019 6:30	16/12/2019 23:45	17.25
60	17/12/2019 8:30	17/12/2019 12:00	3.5
61	18/12/2019 7:00	18/12/2019 14:30	7.5
62	20/12/2019 15:00	20/12/2019 16:15	1.25
63	22/12/2019 15:45	23/12/2019 10:15	18.5
64	28/12/2019 11:15	28/12/2019 17:15	6
65	1/01/2020 12:45	2/01/2020 6:45	18
66	2/01/2020 7:30	2/01/2020 16:15	8.75
$\Sigma=$			562.25

- Periodos de tiempo analizados para Unidad Hidrológica Natural (Inferiores al percentil 25)

Periodos de tiempo	Inicio	Fin	Duración [h]
1	27/09/2019 10:00	27/09/2019 14:15	4.25
2	27/09/2019 15:15	27/09/2019 16:15	1
3	28/09/2019 11:15	28/09/2019 16:45	5.5
4	30/09/2019 12:45	30/09/2019 13:15	0.5
5	2/10/2019 8:45	2/10/2019 19:00	10.25
6	3/10/2019 8:00	3/10/2019 17:30	9.5
7	4/10/2019 7:00	4/10/2019 18:30	11.5
8	5/10/2019 6:45	5/10/2019 18:30	11.75
9	6/10/2019 7:00	6/10/2019 19:30	12.5
10	7/10/2019 7:15	7/10/2019 20:00	12.75
11	8/10/2019 0:00	8/10/2019 7:45	7.75
12	8/10/2019 13:00	8/10/2019 14:15	1.25
13	9/10/2019 8:15	9/10/2019 13:15	5

14	10/10/2019 8:45	10/10/2019 13:15	4.5
15	10/10/2019 16:30	10/10/2019 17:15	0.75
16	11/10/2019 7:45	11/10/2019 13:30	5.75
17	13/10/2019 8:15	13/10/2019 15:15	7
18	14/10/2019 7:30	14/10/2019 18:15	10.75
19	15/10/2019 7:30	15/10/2019 17:45	10.25
20	16/10/2019 7:15	16/10/2019 12:00	4.75
21	17/10/2019 8:30	17/10/2019 12:30	4
22	30/10/2019 11:00	30/10/2019 11:30	0.5
23	30/10/2019 14:30	30/10/2019 17:15	2.75
24	31/10/2019 7:15	31/10/2019 12:00	4.75
25	31/10/2019 12:45	31/10/2019 14:30	1.75
26	31/10/2019 15:15	31/10/2019 16:30	1.25
27	1/11/2019 7:15	1/11/2019 13:45	6.5
28	2/11/2019 7:15	2/11/2019 8:30	1.25
29	16/11/2019 10:45	16/11/2019 18:15	7.5
30	17/11/2019 9:00	17/11/2019 18:00	9
31	18/11/2019 9:15	18/11/2019 14:45	5.5
32	19/11/2019 9:00	19/11/2019 17:45	8.75
33	20/11/2019 8:30	20/11/2019 13:15	4.75
34	21/11/2019 9:15	21/11/2019 16:15	7
35	22/11/2019 8:15	22/11/2019 11:00	2.75
36	23/11/2019 8:45	23/11/2019 13:45	5
37	24/11/2019 9:00	24/11/2019 13:00	4
38	24/11/2019 14:45	24/11/2019 17:45	3
39	25/11/2019 8:45	25/11/2019 16:30	7.75
40	26/11/2019 9:45	26/11/2019 11:15	1.5
41	26/11/2019 12:15	26/11/2019 13:45	1.5
42	27/11/2019 7:45	27/11/2019 17:00	9.25
43	28/11/2019 9:45	28/11/2019 23:45	14
44	29/11/2019 7:15	29/11/2019 21:00	13.75
45	30/11/2019 6:30	30/11/2019 18:45	12.25
46	1/12/2019 7:00	1/12/2019 18:30	11.5
47	1/12/2019 20:15	1/12/2019 23:45	3.5
48	2/12/2019 7:15	2/12/2019 22:45	15.5
49	3/12/2019 5:45	3/12/2019 19:45	14
50	4/12/2019 8:00	4/12/2019 19:15	11.25
51	5/12/2019 7:30	5/12/2019 18:30	11
52	6/12/2019 8:00	6/12/2019 18:30	10.5
53	7/12/2019 7:15	7/12/2019 18:15	11
54	8/12/2019 7:45	8/12/2019 17:30	9.75
55	9/12/2019 8:00	9/12/2019 17:30	9.5
56	10/12/2019 8:00	10/12/2019 18:15	10.25
57	11/12/2019 8:15	11/12/2019 19:00	10.75
58	12/12/2019 8:00	12/12/2019 14:30	6.5
59	13/12/2019 9:00	13/12/2019 17:45	8.75

60	14/12/2019 7:30	14/12/2019 16:30	9
61	15/12/2019 7:45	15/12/2019 18:15	10.5
62	16/12/2019 8:30	16/12/2019 17:45	9.25
63	17/12/2019 9:00	17/12/2019 12:00	3
64	20/12/2019 11:45	20/12/2019 12:45	1
65	20/12/2019 14:00	20/12/2019 17:45	3.75
66	21/12/2019 7:00	21/12/2019 16:45	9.75
67	22/12/2019 7:00	22/12/2019 17:15	10.25
68	23/12/2019 8:15	23/12/2019 14:45	6.5
69	24/12/2019 8:30	24/12/2019 17:45	9.25
70	25/12/2019 0:00	25/12/2019 2:00	2
71	25/12/2019 7:00	25/12/2019 14:00	7
72	26/12/2019 8:15	26/12/2019 13:45	5.5
73	27/12/2019 8:15	27/12/2019 10:45	2.5
74	27/12/2019 12:15	27/12/2019 13:30	1.25
75	28/12/2019 8:30	28/12/2019 15:45	7.25
76	29/12/2019 8:45	29/12/2019 13:00	4.25
77	29/12/2019 16:00	29/12/2019 17:00	1
78	30/12/2019 8:15	30/12/2019 17:00	8.75
79	31/12/2019 8:00	31/12/2019 13:45	5.75
80	31/12/2019 14:30	31/12/2019 18:15	3.75
81	1/01/2020 8:45	1/01/2020 15:45	7
82	2/01/2020 9:30	2/01/2020 17:30	8
83	3/01/2020 9:15	3/01/2020 18:00	8.75
84	4/01/2020 9:15	4/01/2020 13:15	4
$\Sigma=$			570

- Periodos de tiempo analizados para Unidad Hidrológica Intervenida (Superiores al percentil 75)

Periodos de tiempo	Inicio	Fin	Duración [h]
1	27/09/2019 0:00	27/09/2019 9:15	9.25
2	27/09/2019 17:30	28/09/2019 8:00	14.5
3	28/09/2019 18:15	29/09/2019 7:00	12.75
4	29/09/2019 19:45	30/09/2019 8:15	12.5
5	30/09/2019 11:30	2/10/2019 13:15	49.75
6	2/10/2019 16:45	2/10/2019 17:15	0.5
7	9/10/2019 13:45	9/10/2019 14:45	1
8	12/10/2019 16:45	12/10/2019 19:15	2.5
9	16/10/2019 12:15	17/10/2019 11:45	23.5
10	17/10/2019 12:30	17/10/2019 15:45	4.25
11	17/10/2019 16:30	17/10/2019 23:30	7
12	18/10/2019 15:30	21/10/2019 10:15	66.75

13	21/10/2019 12:00	22/10/2019 9:00	21
14	22/10/2019 12:15	22/10/2019 14:15	2
15	22/10/2019 15:00	23/10/2019 8:30	17.5
16	23/10/2019 17:00	26/10/2019 9:30	64.5
17	26/10/2019 14:00	29/10/2019 11:00	69
18	29/10/2019 13:00	29/10/2019 15:30	2.5
19	29/10/2019 17:00	30/10/2019 8:30	15.5
20	2/11/2019 10:00	7/11/2019 14:15	124.25
21	13/11/2019 16:45	13/11/2019 17:15	0.5
22	21/11/2019 17:45	22/11/2019 0:15	6.5
23	22/11/2019 14:00	22/11/2019 15:30	1.5
24	23/11/2019 16:00	23/11/2019 17:45	1.75
25	17/12/2019 12:30	17/12/2019 15:15	2.75
26	18/12/2019 14:45	18/12/2019 20:00	5.25
27	25/12/2019 22:00	26/12/2019 0:30	2.5
28	26/12/2019 16:15	26/12/2019 23:00	6.75
29	27/12/2019 1:00	27/12/2019 7:00	6
30	27/12/2019 19:45	27/12/2019 21:00	1.25
31	27/12/2019 21:45	27/12/2019 22:30	0.75
32	28/12/2019 0:15	28/12/2019 5:15	5
33	3/01/2020 7:00	3/01/2020 7:45	0.75
$\Sigma=$			560.75

- Periodos de tiempo analizados para Unidad Hidrológica Natural (Superiores al percentil 75)

Periodos de tiempo	Inicio	Fin	Duración [h]
1	27/09/2019 0:00	27/09/2019 7:00	7
2	27/09/2019 21:15	28/09/2019 7:00	9.75
3	29/09/2019 0:00	29/09/2019 5:30	5.5
4	29/09/2019 21:00	30/09/2019 7:30	10.5
5	30/09/2019 16:00	1/10/2019 0:30	8.5
6	1/10/2019 13:15	1/10/2019 16:00	2.75
7	8/10/2019 8:00	8/10/2019 9:15	1.25
8	9/10/2019 13:30	9/10/2019 16:15	2.75
9	10/10/2019 13:45	10/10/2019 14:15	0.5
10	11/10/2019 18:15	11/10/2019 20:30	2.25
11	12/10/2019 14:00	12/10/2019 21:30	7.5
12	16/10/2019 12:15	16/10/2019 16:45	4.5
13	17/10/2019 13:00	30/10/2019 23:00	322
14	2/11/2019 14:00	3/11/2019 7:45	17.75
15	3/11/2019 14:30	4/11/2019 7:45	17.25
16	4/11/2019 17:15	5/11/2019 6:45	13.5
17	5/11/2019 14:30	6/11/2019 7:45	17.25
18	6/11/2019 18:45	6/11/2019 19:45	1

19	6/11/2019 20:30	7/11/2019 6:00	9.5
20	7/11/2019 17:45	8/11/2019 7:30	13.75
21	8/11/2019 18:45	9/11/2019 6:30	11.75
22	9/11/2019 12:15	10/11/2019 6:30	18.75
23	10/11/2019 15:15	11/11/2019 3:15	12
24	12/11/2019 15:45	12/11/2019 17:00	1.25
25	12/11/2019 17:45	12/11/2019 18:45	1
26	12/11/2019 19:30	13/11/2019 1:15	5.75
27	13/11/2019 2:00	13/11/2019 4:15	2.25
28	13/11/2019 5:00	13/11/2019 6:30	1.5
29	13/11/2019 14:00	14/11/2019 0:00	10
30	14/11/2019 1:00	14/11/2019 7:00	6
31	14/11/2019 16:00	15/11/2019 5:30	13.5
32	16/11/2019 0:15	16/11/2019 7:30	7.25
33	22/11/2019 13:45	22/11/2019 15:30	1.75
34	23/11/2019 16:00	23/11/2019 17:30	1.5
35	17/12/2019 12:15	17/12/2019 19:45	7.5
36	18/12/2019 14:45	19/12/2019 8:00	17.25
37	25/12/2019 22:30	25/12/2019 23:30	1
38	27/12/2019 1:15	27/12/2019 3:45	2.5
39	2/01/2020 5:00	2/01/2020 7:00	2
40	4/01/2020 0:15	4/01/2020 0:45	0.5
41	4/01/2020 5:45	4/01/2020 7:15	1.5
		$\Sigma=$	600.75