

Análisis del efecto de las actividades agrícolas sobre indicadores hidrológicos de regulación  
DHQ25, DLQ75, QVAR, R2FDC e IRH en dos unidades hidrográficas del páramo de Berlín

Carlos Miguel Barrera Gómez

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero civil

Director

Edgar Ricardo Oviedo Ocaña

PhD en Ingeniería Sanitaria y Ambiental

Codirector

Daniela Cristina Rey Romero

MSc. Planificación y desarrollo de recursos hidráulicos

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Programa Académico

Bucaramanga

2023

### **Dedicatoria**

*Quiero dedicar este trabajo a mi madre Isabel Cristina y a mi hermana Daniela Fernanda, que gracias a ellas influyeron y apoyaron para mi formación profesional y poder lograr esta meta.*

*A ustedes mil gracias.*

### **Agradecimientos**

*Agradezco al grupo de investigación de recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental (GPH), especialmente a los profesores Edgar Ricardo Oviedo y Daniela Cristina Rey, que me dieron la oportunidad de para desarrollar este proyecto y me guiaron para el correcto desarrollo de este.*

**Tabla de Contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	10
1. Objetivos .....	14
2.1 Objetivo General .....	14
2.2 Objetivos Específicos.....	14
2. Metodología .....	15
2.1 Zona de estudio .....	15
2.2 Gestión de información hidroclimática.....	16
2.2.1 Caracterización pluviométrica .....	16
2.2.2 Caracterización hidrométrica .....	17
2.2.3 Caracterización hidrométrica .....	19
2.2.4 Generación de hidrogramas de caudal diario.....	21
2.3 Aplicación de índices hidrológicos .....	21
2.4 Gestión de alternativas .....	24
3.1 Estimación rendimiento hídrico y análisis de curvas CDC .....	25
3.2 Análisis de Índices hidrológicos .....	27
3.3 Gestión de alternativas .....	34
5. Conclusiones .....	36
Referencias Bibliográficas .....	37
Apéndices.....	42

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1 Características físicas, geomorfológicas y de uso de suelo de las unidades hidrográficas a estudiar.....	15
Tabla 2 Valores de rendimiento hídrico de los percentiles de las curvas de duración de caudal (CDC) de las unidades hidrográficas .....	21
Tabla 3 Clasificación ENA del índice de regulación hidrológica IRH.....	24
Tabla 4 Comparación de resultados obtenidos con antecedentes de diferentes periodos de estudio de este proyecto.....	28
Tabla 5 Comparación de resultados obtenidos con indicadores determinados en otras unidades hidrográficas de páramo.....	28

**Lista de Figuras**

	<b>Pág.</b>
Figura 1 Zona de cultivo de papa y cebolla de rama en el páramo de Berlín.....	11
Figura 2 Pluviómetro tipo cubeta basculante WatchDog 1120 .....	17
Figura 3 Canal de sección triangular instalado en la unidad hidrográfica intervenida (UHI). ....	17
Figura 4 Comparación entre estado de limpieza del canal de la unidad hidrográfica intervenida: limpio (A) y colmatado (B).....	20
Figura 5 Curvas de duración de caudal de UHI y UHN. ....	25
Figura 6 Comparación de las CDC obtenidas con respecto a antecedentes de las mismas unidades. .....	26
Figura 7 Registro periodo de flujos altos UHN. ....	30

**Lista de Apéndices**

	<b>pág.</b>
Apéndice A Zona de estudio.....	42
Apéndice B Representación gráfica volúmenes curva de duración de caudal.....	43
Apéndice C Rendimiento hídrico unidades hidrográficas .....	44
Apéndice D Análisis de resultados .....	45

## Resumen

**Título:** Análisis del efecto de las actividades agrícolas sobre indicadores hidrológicos de regulación DHQ25, DLQ75, QVAR, R2FDC e IRH en dos unidades hidrográficas del páramo de Berlín.

**Autor:** Carlos Miguel Barrera Gómez

**Palabras Clave:** Índices hidrológicos, impacto, uso de suelo, agricultura, páramo, regulación y retención hídrica.

**Descripción:** El incremento en las actividades agrícolas en el páramo de Berlín afecta los servicios hidrológicos de regulación y suministro de agua que ofrece este ecosistema. El presente trabajo estudió el impacto hidrológico generado por el cambio de uso de suelo por las actividades agropecuarias realizadas en la zona del Páramo de Berlín; para tal efecto, se compararon dos unidades con uso de suelo diferente (natural e intervenida por actividades antrópicas). Dentro de los hallazgos se destacó una disminución del tiempo promedio de flujos de la unidad intervenida en contraste con la unidad natural, representado por una reducción de los indicadores DHQ25 y DLQ75 del 5.41% y 17.07% respectivamente; del mismo modo la unidad intervenida presentó una baja retención hídrica y dispersión por disminución del 4.42% del IRH y del 43.36% del QVAR, así como un aumento de flujos superficiales dado por un incremento del 158% en la pendiente del indicador R2FDC. Esto indica que el cambio en el uso de suelo debido a actividades agropecuarias en el Páramo de Berlín ha tenido un impacto negativo en los servicios hidrológicos de la zona, para lo cual se propusieron dos alternativas, como el traslado de cultivos y nuevos sistemas de riego.

\* Trabajo de grado

\*Facultad de ingeniería fisicomecánicas. Escuela de ingeniería civil. Director: Edgar Ricardo Oviedo Ocaña. Codirector: Daniela Cristina Rey Romero.

### Abstract

**Title:** Analysis of the Effect of Agricultural Activities on Hydrological Regulation Indicators DHQ25, DLQ75, QVAR, R2FDC and IRH in Two Watershed Units of the Berlín Páramo\*

**Author(s):** Carlos Miguel Barrera Gómez\*\*

**Key Words:** Hydrological index, impact, land use, agriculture, paired catchment, water retention and regulation.

**Description:** The increase in agricultural activities in the Berlín páramo affects the hydrological services of water regulation and supply provided by this ecosystem. This study investigated the hydrological impact generated by land use change due to agricultural activities carried out in the Berlín páramo area. To achieve this, two units with different land uses (natural and affected by anthropogenic activities) were compared. Among the findings, a decrease in the average flow time in the affected unit was highlighted, in contrast to the natural unit, represented by a reduction of 5.41% and 17.07% in the DHQ25 and DLQ75 indicators, respectively. Similarly, the affected unit showed reduced water retention and dispersion, with a decrease of 4.42% in IRH and 43.36% in QVAR, as well as an increase in surface flows indicated by a 158% increase in the R2FDC indicator slope. This indicates that land use change due to agricultural activities in the Berlín páramo has had a negative impact on the hydrological services of the area. Two alternatives were proposed to address this issue, including crop relocation and the implementation of new irrigation systems.

---

\* Bachelor Thesis

\*\*Facultad de ingeniería fisicomecánicas. Escuela de ingeniería civil. Director: Edgar Ricardo Oviedo Ocaña. Codirector: Daniela Cristina Rey Romero.

## Introducción

Los páramos son ecosistemas tropicales de alta montaña ubicados en alturas mayores a bosques andinos. Estos ecosistemas generalmente se caracterizan por presentar suelos de origen volcánico, así como una variada y diversa vegetación, los cuales, por medio de la altura, el clima y su precipitación, tienen la función de ser agentes fundamentales de regulación y abastecimiento de agua (Cortez Duque, 2013). En Colombia, los páramos son ecosistemas primordiales para la regulación y abastecimiento hídrico del país. De acuerdo con el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, este ecosistema contribuye con 70% del abastecimiento hídrico de la población nacional (Páramos - Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, s.f.).

El páramo de Berlín localizado dentro del complejo de páramos Santurbán – Berlín, funciona como actor fundamental para la regulación y el abastecimiento de agua para la población de los departamentos de Santander y Norte de Santander. Dentro de este ecosistema, se desarrollan actividades antrópicas con fines de sostenimiento económico, entre ellas se encuentra el desarrollo de actividades agropecuarias (i.e., siembra de cultivos de papa y cebolla de rama) (Figura 1). Estas actividades generan impactos ambientales asociados con procesos de erosión del suelo, pérdida de cobertura vegetal y de especies nativas, compactación y volcamiento de los suelos, liberación de carbono en forma de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, pérdida de nutrientes del suelo, alteración en la calidad del agua y deterioro en los servicios de regulación y retención hídrica (Vargas Rios, 2022), (Cabrerá, 2022).

**Figura 1**

*Zona de cultivo de papa y cebolla de rama en el páramo de Berlín.*



En este contexto, desde 2008 hasta hoy se han realizado diversos estudios enfocados a medir el impacto de la agricultura sobre los servicios hidrológicos del páramo. Para ello, se ha implementado el uso de índices hidrológicos para la medición de los niveles de regulación y abastecimiento hídrico, comparando los resultados entre unidades hidrográficas naturales e intervenidas por actividades antrópicas.

La zona de estudio del presente trabajo corresponde a dos unidades hidrográficas de interés localizadas en el municipio de Tona – Santander, específicamente en la vereda Parra y Juan Rodríguez, ubicada en el complejo de páramo Santurbán-Berlín, en la zona del páramo de Berlín (Celis Vargas, 2022). Esta zona ha sido considerada en estudios previos del Grupo de Investigación en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental (GPH) de la Universidad Industrial de Santander (UIS). Las unidades hidrográficas (UH) escogidas para este estudio presentan diferencias en cuanto a usos de suelo, siendo para la unidad intervenida antrópicamente (UHI) un suelo con un

porcentaje significativo de actividades agropecuarias, y para la unidad natural (UHN) un uso de suelo en su mayoría destinado a la conservación del ecosistema.

En un estudio efectuado en esta zona entre los años 2019 y 2020, se investigó en las UH los índices de duración promedio de flujos altos (DHQ25) y duración promedio de flujos bajos (DLQ75), en el cual no se encontró un impacto generado por las actividades agropecuarias, obteniendo en los resultados de los indicadores un aumento en los dos índices por parte de la unidad intervenida (Arias Castellanos, 2020). En 2020, se realizó la estimación del índice de regulación y retención hídrica (IRH), el cual reflejó una mejor capacidad de regulación y retención hídrica en la unidad natural al presentar un mayor valor en este indicador, presentando en este índice una categoría baja, siendo mejor a la unidad intervenida que obtuvo una categoría muy baja (Prieto Jimenez, 2020). Posteriormente, para el año 2021, se realizó un estudio en el cual se determinaban los índices de retención y regulación hídrica (IRH), variabilidad de flujo (QVAR), esorrentía y pendiente de la curva de duración de flujo CDC (R2FDC), obteniendo peor rendimiento en la UHN que en la UHI al presentar un aumento de valor por parte de esta última en los indicadores R2FDC y QVAR, y una disminución en el índice IRH, destacando en este un cambio de categoría en cada unidad, teniendo para la natural y la intervenida, la categoría muy baja (Castro Caro, 2021). Finalmente, en el periodo comprendido entre noviembre de 2019 y abril de 2021, se determinaron los índices enfocados a la regulación hídrica, en donde fueron abarcados en este conjunto los índices: IRH, R2FDC, Qvar, DHQ25 y DLQ75; los cuales contrastaron peor desempeño de regulación en la unidad intervenida a la hora de ser comparada con los resultados obtenidos por la unidad natural por medio de estos índices (Celis Vargas, 2022).

Los antecedentes de estudio en las cuencas bajo diferentes periodos de tiempo han permitido conocer el comportamiento y propiedades hidrológicas en diversas condiciones temporales y bajo diferentes factores externos a las cuales están expuestas. Sin embargo, la variabilidad en los resultados obtenidos también demuestra la necesidad de aumentar los tiempos comprendidos en la realización de los análisis para un mejor estudio general de las propiedades hidrológicas de cada unidad hidrográfica. Por lo anterior, el presente trabajo de grado se realizó con el objetivo general de determinar el efecto de las actividades agrícolas sobre los indicadores hidrológicos DHQ25, DLQ75, QVAR, R2FDC e IRH en el periodo contenido desde el año 2019 hasta septiembre de 2022 en dos unidades hidrográficas del páramo de Berlín, para abordar este propósito se estimaron los caudales por medio del monitoreo en campo de las estaciones de tipo hidro climático, y se calcularon los indicadores hidrológicos ya mencionados para las dos unidades hidrográficas estudiadas.

## **1. Objetivos**

### **2.1 Objetivo General**

Determinar el efecto de las actividades agrícolas sobre los indicadores hidrológicos DHQ25, DLQ75, QVAR, R2FDC e IRH en el periodo contenido desde el año 2019 hasta septiembre de 2022 en dos unidades hidrológicas del páramo de Berlín.

### **2.2 Objetivos Específicos**

Estimar los caudales por medio del monitoreo en campo de las estaciones de tipo hidro climático.  
Calcular los indicadores hidrológicos DHQ25, DLQ75, QVAR, R2FDC e IRH en las dos unidades hidrológicas objeto de estudio

## 2. Metodología

Las tablas se deben presentar sin colores y sin líneas verticales, solo deben hacerse visible las líneas horizontales. El numero de la tabla a margen izquierdo, en negrilla y sin cursiva. El título de la tabla debajo a margen izquierdo sin negrilla y en cursiva. Luego va centrada la tabla y por último a margen izquierdo va la nota.

### 2.1 Zona de estudio

Para la determinación de estas unidades hidrográficas por parte del grupo de investigación de recursos hídricos y saneamiento ambiental (GPH), estas debieron cumplir con el concepto de cuencas pareadas para poder realizar un correcto contraste entre unidades con el fin de analizar los impactos generados por del cambio de uso de suelo actividades antrópicas; para ello, estas unidades debieron presentar similitudes en su propiedades físicas y geomorfológicas, estas propiedades se pueden observar en la Tabla 1.

**Tabla 1**

*Características físicas, geomorfológicas y de uso de suelo de las unidades hidrográficas a estudiar.*

Variable	Unidad Intervenida [UHI]	Unidad No Intervenida [UHN]
Área [ha]	18.9	11.1
Perímetro [m]	3018.8	2347.4
Altitud media [m.s.n.m]	3549.7	3538.1
Pendiente media [°]	24.3	27.1
Uso de suelo	Barbecho (14.9%) Cultivos (3.3%) Pastoreo (5.7%) Conservación (75.7%) Zona habitable (0.4%)	Pastoreo (8%) Conservación (92%)

*Nota: Adaptado de Célis, 2022.*

Por otro lado, la zona en la cual se encuentran las unidades hidrográficas, se caracterizó debido a su fácil acceso a la zona, lo cual permitió la instalación de diferentes estaciones de monitoreo para la toma de datos de tipo hidroclimático en cada una de ellas. La localización geográfica de estas estaciones, junto con la zona de estudio se puede visualizar en el Apéndice A.

## **2.2 Gestión de información hidro climática**

Esta fase consistió en la obtención y procesamiento de los datos de caudal de las UH y de la información pluviométrica de la zona. Para ello, la gestión de información hidroclimática se dividió en las siguientes actividades: caracterización hidrométrica, caracterización pluviométrica y limpieza de datos. Las actividades de caracterización hidrométrica y pluviométrica consistieron en salidas de campo a la zona de estudio para la toma de los datos obtenidos de los medidores utilizados para cada caracterización. Estas visitas a la zona de estudio se realizaron de manera periódica por parte de otros trabajos de investigación desde el año 2019 hasta abril de 2021, los datos de campo recolectados en este periodo fueron integrados a una base de datos que contiene la información obtenida por cada una de las estaciones. El presente trabajo contribuyó aumentando este periodo hasta septiembre de 2022, donde se realizó una visita y se obtuvo la información de las estaciones para ese mes, la que se anexó directamente a la base de datos ya existente y complementó la información hidroclimática necesaria para la estimación de los caudales en los periodos comprendidos del presente estudio.

### **2.2.1 Caracterización pluviométrica**

Consistió en la captura de datos de precipitación de la zona, usando para su medición el pluviómetro de tipo cubeta basculante WatchDog 1120 (Figura 2), el cual se programó para la toma de datos de precipitación en intervalos de 5 minutos entre el periodo del 20 de julio de 2019

hasta el 18 de mayo de 2020, e intervalos de 15 minutos desde el 18 de mayo de 2020 hasta la actualidad.

### **Figura 2**

*Pluviómetro tipo cubeta basculante WatchDog 1120*



### **2.2.2 Caracterización hidrométrica**

La caracterización hidrométrica se basó en la obtención de caudales por medio de la lectura de presiones en dos canales ubicados cada uno en el cierre de las unidades hidrográficas estudiadas (Figura 3). Estas estructuras consisten en dos canales de acrílico de sección triangular con medidas de 20x50x120 cm y un ángulo interior de 30° (Prieto Jimenez, 2020).

### **Figura 3**

*Canal de sección triangular instalado en la unidad hidrográfica intervenida (UHI).*



Para la captura de los registros de caudal en cada canal, se usaron tres transductores de presión absoluta HOBO U20L-04, de los cuales dos fueron sumergidos en los canales de las unidades hidrográficas y uno se instaló al aire libre. De esta manera, se midieron las presiones absolutas del fondo de los canales y la presión barométrica. Con los registros de presión se realizó la resta de la presión barométrica menos la presión absoluta del fondo de cada canal, obteniendo la presión manométrica, la cual se puede expresar como el producto del peso específico del agua por la altura (Ecuación 1), determinando así el nivel del agua en los intervalos de los registros de cada UH, despejando la variable  $h$  en dicha expresión.

$$P_{Mano} = \rho \cdot g \cdot h \quad (1)$$

$$Q = c \cdot \frac{8}{15} \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot h^{\frac{5}{2}} \quad (2)$$

Por medio del nivel del agua del canal y la inclinación de este, se procedió a calcular por medio de la ecuación de vertedero triangular (Ecuación 2) (Villón Bejar, 2008) los registros de flujo de cada una de las unidades hidrográficas.

Donde  $Q$  equivale al caudal del intervalo de tiempo,  $\theta$  al ángulo interior de la sección y  $c$  corresponde a la constante de vertedero, la cual fue hallada por medio de la calibración de los canales por aforo volumétrico. Dichos aforos se realizaron múltiples veces en las diferentes visitas

a la zona, cada uno en intervalos de cada 5 minutos, obteniendo que las constantes para la unidad hidrográfica natural e intervenida son 1.27094 y 1.13176 respectivamente (Prieto Jimenez, 2020). A partir de esto se tomaron los registros de cada canal. Finalmente, los caudales obtenidos se dividen sobre el área de cada unidad hidrográfica para obtener los valores de rendimiento, y así comparar los niveles de flujo reales entre UHI y UHN.

### **2.2.3 Caracterización hidrométrica**

Debido a la exposición a factores ambientales del páramo, como la precipitación y el arrastre de sedimentos en las unidades hidrográficas, la información de presiones obtenidas en campo se vio afectada en diversos periodos de tiempo, generando un cambio en las condiciones de estudio de las de las unidades (UHI y UHN) y creando irregularidades en los resultados de caudal obtenidos. Con base en esto, para evitar la alteración de resultados debido a datos inconsistentes, se identificaron las posibles causas y se dividieron en dos grupos: por colmatación y por rebosamiento de canales.

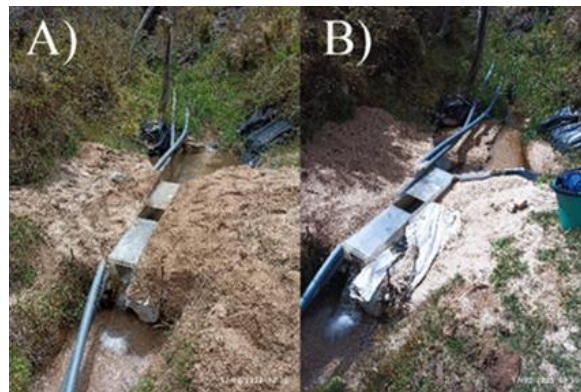
- Irregularidades por colmatación de las canales

El concepto de colmatación se debe al arrastre de sedimentos generado por cada UH, el cual, al llegar a los canales, se acumula al interior de cada uno, creando una capa del material arrastrado dentro de estos (Figura 4). Al presentarse esta capa de sedimentos se genera el aumento del nivel del agua y con ello el aumento de la presión en los transductores, lo que altera la condición de estudio inicial. Para evitar este fenómeno, durante las visitas a campo, se realizó de forma manual la eliminación de dicha capa de sedimentos para evitar la alteración de los datos de presión, sin embargo, aunque esta actividad se realizó de manera constante con una frecuencia mensual, se presentaron cortos periodos de tiempo, específicamente los días antes de la visita a la zona, en los

cuales dicha colmatación llegó a generar irregularidades en los registros de presión, los cuales debieron ser eliminados de los registros.

#### **Figura 4**

*Comparación entre estado de limpieza del canal de la unidad hidrográfica intervenida: limpio (A) y colmatado (B).*



Para identificar la ocurrencia de este fenómeno, se estudiaron los hietogramas e hidrogramas, en los que se identificó un aumento drástico y constante del caudal ante eventos de precipitación considerable en que se presentaron durante instantes de tiempo determinado, siendo que, al pasar dicho evento de lluvia, el caudal real del canal disminuye, pero se mantiene una lectura constante de un alto flujo debido al depósito de sedimentos dentro del canal.

- Irregularidades por rebosamiento de canales

Este fenómeno está asociado con el incremento en los niveles de agua, que en diferentes momentos de en el periodo de estudio, sobrepasa la altura máxima de los canales, generando inconsistencia en estos datos debido a que, al haber un mayor nivel de agua, esto significaría que hay desbordamiento de la estructura, impidiendo el registro del flujo verdadero presentado en ese instante. Para evitar esta irregularidad en el estudio, se tomó la altura de dichos canales con el fin de contrastarlos con los niveles de la columna de agua en cada instante de los hidrogramas, bajo

esta comparación, se eliminaron los datos que presentaron niveles de agua mayores al de la dimensión de los canales.

#### **2.2.4 Generación de hidrogramas de caudal diario**

Realizada la limpieza de los registros finales de caudal, se procedió a estimar el rendimiento hídrico diario para cada día usando los rendimientos cada 5 y 15 minutos registrados para cada fecha, obteniendo hidrogramas de caudal diario para cada unidad hidrográfica, los cuales serán la base para la determinación y el análisis de los indicadores hidrológicos a desarrollar.

#### **2.3 Aplicación de índices hidrológicos**

Por medio de los datos de rendimiento hídrico diario obtenido de los hidrogramas desarrollados anteriormente, se ordenó de manera descendente estos conjuntos de datos y se procedió a generar para los registros de rendimiento de UHI y UHN la curva de duración de caudal (CDC). Así mismo, se determinó para cada unidad, el caudal promedio y la desviación estándar, datos principales de estadística descriptiva que fueron usados posteriormente para los índices de regulación hídrica y variabilidad de flujo. Posteriormente, se hallaron los percentiles 25, 33, 66 y 75 de cada CDC para lo cual se usó la ecuación 3.

$$n(x) = \frac{x*N}{100} \quad (3)$$

Dicha ecuación calcula la posición de un valor en un conjunto ordenado de datos, donde  $x$  equivale al percentil a buscar y  $N$  el número total de datos en el conjunto. Con base en esto, la posición y valor de cada percentil se pueden visualizar en la Tabla 2.

#### **Tabla 2**

*Valores de rendimiento hídrico de los percentiles de las curvas de duración de caudal (CDC) de las unidades hidrográficas*

Percentil	Posición	R. hídrico Unidad no intervenida [L/s*ha]	R. hídrico Unidad intervenida [L/s*ha]
25	203	0.312	0.202
33	268	0.284	0.166
66	535	0.218	0.084
75	608	0.205	0.070

Con los valores de los percentiles de la Tabla 2, se procedió a determinar los índices de duración promedio de flujos altos y bajos (DHQ25 y DLQ75). Para ello se realizó para cada uno la sumatoria de los periodos de días en los que el caudal supera el percentil 25 o que está por debajo del valor del percentil 75; posteriormente, estas sumatorias se dividen cada una en el número de periodos en que se presenta este evento, obteniendo así el tiempo promedio en el cual sucede cada uno de estos eventos. Estos índices se pueden expresar mediante las ecuaciones 4 y 5.

$$DHQ25 = \frac{\sum t_{Q>Q25}}{n_{Q>Q25}} \quad (4)$$

$$DLQ75 = \frac{\sum t_{Q<Q75}}{n_{Q<Q75}} \quad (5)$$

Donde t equivale a intervalos de tiempo de medición de caudal en donde el flujo está en los rangos mayores al percentil 75 o menores al percentil 25, y n es el número de periodos en que ocurre este evento en el registro.

Para el cálculo de la pendiente de la curva de duración de caudal (R2FDC), se utilizó la expresión planteada por Ochoa Tocachi (Ochoa-Tocachi et al., 2016) (Ecuación 6), la cual utiliza los valores de los percentiles 33 y 66 para una cuantificación de la pendiente de la curva en escala logarítmica.

$$R2FDC = \frac{\log(Q_{66} - Q_{22})}{66 - 33} \quad (6)$$

El índice de variabilidad de caudal tiene como concepto calcular el nivel de dispersión de los valores de caudal en los registros de UHI y UHN, bajo esa idea, este índice se halla de manera

estadística como el cociente de la desviación estándar de la muestra sobre el valor promedio del conjunto de datos, como se aprecia en la Ecuación 7.

$$QVAR = \frac{\sigma_Q}{|Q|} \quad (7)$$

Finalmente, el índice de regulación hidrológica (IRH), es el cociente del volumen parcial equivalente al área bajo la curva de duración de caudal y que está por debajo de la línea de caudal promedio del registro ( $V_p$ ), sobre el volumen total equivalente al área total debajo de la curva de duración de caudal ( $V_t$ ) (Apéndice B). Para el cálculo de estos volúmenes, se estimó para cada unidad hidrográfica su caudal medio. Una vez obtenido este valor, se revisó en el conjunto de datos su posición y el porcentaje de excedencia que este presentó, determinando los volúmenes por medio de las Ecuaciones 8 y 9 propuestas por el IDEAM (*Índice de Retención y Regulación Hídrica (IRH) - IDEAM, s.f.*).

$$V_t = \sum Q_i \cdot (P_i - P_{i-1}) \quad (8)$$

$$V_p = \sum \begin{cases} Q_{med} \cdot (P_i - P_{i-1}) & \text{si } Q_i \geq Q_{med} \\ Q_i \cdot (P_i - P_{i-1}) & \text{si } Q_i \leq Q_{med} \end{cases} \quad (9)$$

En donde  $Q_{med}$  es igual al caudal medio,  $Q_i$  el caudal en un instante  $i$  y  $P_i$  que es el porcentaje de excedencia en un instante  $i$ .

Con base a concepto del Estudio Nacional del Agua publicado en el año 2018 (ENA 2018), el índice IRH describe dentro de una unidad hidrográfica qué tanto nivel de humedad puede retener y regular esta misma, en donde para ello influye la interacción existente entre el suelo y la vegetación presente en este, incluyendo las condiciones climáticas y las características físicas y morfológicas de la zona (*Índice de Retención y Regulación Hídrica (IRH) - IDEAM, s.f.*). Por medio de este concepto, se puede clasificar el nivel de retención y regulación de cada curva de duración de caudal por medio de la tabla 3.

**Tabla 3**

*Clasificación ENA del índice de regulación hidrológica IRH*

<b>Categoría ENA</b>	<b>Rango</b>
Muy alta	>0.85
Alta	0.75-0.85
Moderada	0.65-0.75
Baja	0.50-0.65
Muy baja	<0.50

*Nota: Tomado de Índice de Retención y Regulación Hídrica (IRH) – IDEAM, s.f..*

Finalmente, para analizar los resultados obtenidos de las unidades hidrográficas estudiadas, preliminarmente se realizó una caracterización de proyectos y de antecedentes con diferentes periodos de tiempo de estudio que abordaran información sobre los indicadores hidrológicos determinados en este trabajo, posteriormente, se contrastaron dichos resultados con los obtenidos en este estudio, para la realización de este análisis.

## **2.4 Gestión de alternativas**

Con base a los resultados obtenidos de los indicadores hidrológicos y el análisis de estos, se procedió a la generación de alternativas de remediación de los servicios de retención y regulación hídrica para la unidad hidrográfica intervenida; para ello, se estudió la zona en donde se desarrollan las actividades agrícolas y las características de cómo se desarrollan estas, bajo este estudio se realizó una búsqueda de alternativas en las bases de datos de Scopus, Google Scholar y FAO bajo las palabras clave: “Agricultura de conservación”, “Manejo del agua” y “Alta montaña”, donde se revisaron más de 30 trabajos enfocados a las vulnerabilidades ambientales en los procesos agrícolas y alternativas de agricultura sostenible, obteniendo así ocho estudios los cuales permitieron el desarrollo de dos alternativas viables para la zona en contexto.

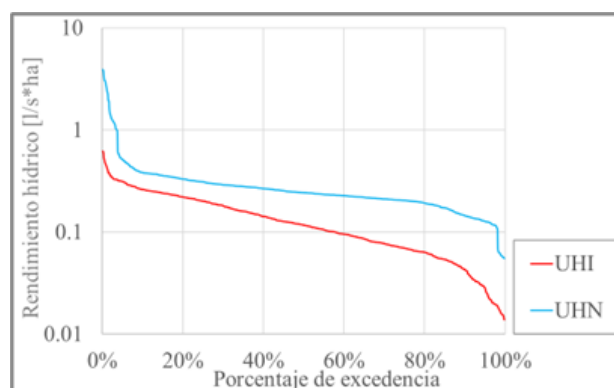
### 3. Resultados y discusión

#### 3.1 Estimación rendimiento hídrico y análisis de curvas CDC

En el análisis de los rendimientos hídricos obtenidos para cada unidad hidrográfica, se puede observar que la UHN obtiene mayores valores de rendimiento al compararse con respecto a los de la UHI en el periodo de tiempo estudiado (Apéndice C), indicando así una mayor productividad hídrica por parte de la unidad hidrográfica natural. Por otro lado, respecto de las curvas de duración de rendimiento hídrico (Figura 6), se observó que los porcentajes de excedencia de la unidad hidrográfica intervenida es menor en todo momento a la unidad hidrográfica natural y presenta a su vez una mayor pendiente en la gráfica. Teniendo como base a diferentes estudios realizados para unidades hidrográficas en ecosistemas de páramo (Ochoa Tocachi et al., 2016; Cabrera-Balarezo et al., 2022; Gordillo & Pineda, 2021), este resultado obtenido entre unidades hidrográficas que tienen propiedades morfológicas similares y usos de suelo diferentes es el esperado, en donde se infiere que dicho comportamiento refleja un deterioro de los servicios de retención y regulación hídrica, presentando así en el caudal total un aumento del flujo superficial y una disminución en el flujo base.

#### Figura 5

*Curvas de duración de caudal de UHI y UHN.*

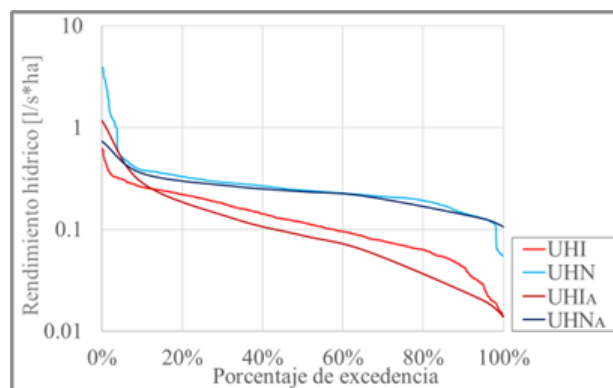


*UHI: Unidad hidrográfica intervenida; UHN: Unidad hidrográfica natural.*

Realizando un contraste de las curvas de rendimiento hídrico obtenidas en este estudio con respecto a su antecedente realizado en la zona de estudio en el periodo comprendido entre noviembre de 2019 y abril de 2021 (Celis Vargas, 2022) (Figura 7), se observó un comportamiento similar en estas curvas, en donde solo difieren en los porcentaje de excedencia iniciales al presentar la UHI de ese periodo mayores valores de rendimiento hídrico a los obtenidos por la UHN, sin embargo esto se corrige al irse aumentando este porcentaje debido a la alta pendiente negativa por parte de la unidad hidrográfica intervenida, demostrando así el deterioro en los niveles de retención y regulación hídrica de esta unidad hidrográfica en dos estudios bajo diferentes intervalos de tiempo.

### Figura 6

*Comparación de las CDC obtenidas con respecto a antecedentes de las mismas unidades.*



*UHI: Unidad hidrográfica intervenida; UHN: Unidad hidrográfica natural; UHIA: Antecedente Unidad hidrográfica intervenida; UHNA: Antecedente Unidad hidrográfica natural*

Adicionalmente, se compararon las CDC del presente trabajo con las obtenidas de la búsqueda bibliográfica, realizando dos tipos de comparaciones: con unidades no intervenidas, evaluadas en ecosistemas de páramo en las zonas de Jatunhuaycu, Paute y Piura, ubicadas

respectivamente en el norte, centro y sur de la cordillera de los andes de Ecuador (Ochoa-Tocachi et al., 2016); y con intervenidas, las cuales, presentan usos de suelo de: ganadería y agricultura, que son las usadas para la comparación de resultados con respecto a las UHN anteriormente mencionadas (ver apéndice D). Al estudiar las CDC, se puede visualizar diferentes comportamientos en cada una de ellas, presentando diferentes rendimientos hídricos, estos están asociados directamente a la precipitación anual, de tal manera que a mayor precipitación mayor rendimiento (Ochoa Tocahi et al., 2016; Rodríguez-Morales et al., 2019), lo que se ve reflejado en la comparación de las CDC, en donde al ordenarse las unidades por rendimiento hídrico, se obtuvo que las mejores fueron las de la zona de páramo en Piura (PIU), seguidas por las de Paute (PAU), posteriormente la de Lloa (LLO) y por último la de Jatunhuaycu (JTU); al comparar los rendimientos de la zonas mencionadas con la proporción de precipitación en las mismas se evidenció una relación directamente proporcional siendo la medición de precipitación en cada una de estas zonas de: 2239mm, 1092mm, 1091mm y 849mm respectivamente (Ochoa-Tocachi et al., 2016). Con base en esta relación se pudo observar que los rendimientos de las UH del estudiadas del Páramo de Berlin presentan una alta precipitación (1101 mm) y por tanto un gran rendimiento hídrico sobrepasando el de las UH referidas en la revisión bibliografía, siendo sólo superadas por las de la zona de Piura.

### **3.2 Análisis de Índices hidrológicos**

Por medio de los resultados obtenidos en los indicadores hidrológicos para cada unidad hidrográfica, se realizó una comparación de estos con base a los resultados obtenidos en los otros estudios realizados en las mismas UH pero bajo diferentes temporalidades de estudio (Tabla 4), además, se realizó un contraste en estos indicadores con base en otros estudios realizados en

ecosistemas de páramo bajo diferentes usos de suelo (Tabla 5). Por medio de estas tablas se analizó el comportamiento esperado en los índices hidrológicos al presentarse un impacto por actividades antrópicas y el obtenido por parte de los resultados de este estudio.

Tabla 4

*Comparación de resultados obtenidos con antecedentes de diferentes periodos de estudio de este proyecto.*

Periodo de estudio	Tipo de unidad	DHQ25 [días]	DLQ75 [días]	QVAR [N/A]	R2FDC [N/A]	IRH [N/A]
Sep. 2019 – Sep. 2022 (Presente trabajo)	Intervenida [UHI]	5.46	4.93	0.661	-0.903	0.735
	Natural [UHN]	5.77	5.94	1.167	-0.35	0.769
Sep. 2019 – ene. 2020 (Arias Castellanos, 2020)	Intervenida [UHI]	16.99	8.52	-	-	-
	Natural [UHN]	14.65	6.79	-	-	-
Nov. 2019 – dic. 2019 (Prieto Jimenez, 2020)	Intervenida [UHI]	-	-	-	-	0.3
	Natural [UHN]	-	-	-	-	0.58
Nov. 2019 – oct. 2020 (Castro Caro, 2021)	Intervenida [UHI]	-	-	0.65	-0.75	0.27
	Natural [UHN]	-	-	0.2	-0.31	0.43
Nov. 2019 - abr. 2021 (Celis, 2022)	Intervenida [UHI]	5.53	4.8	1.163	-0.964	0.633
	Natural [UHN]	5.73	4.56	0.33	-0.3	0.87

Tabla 5

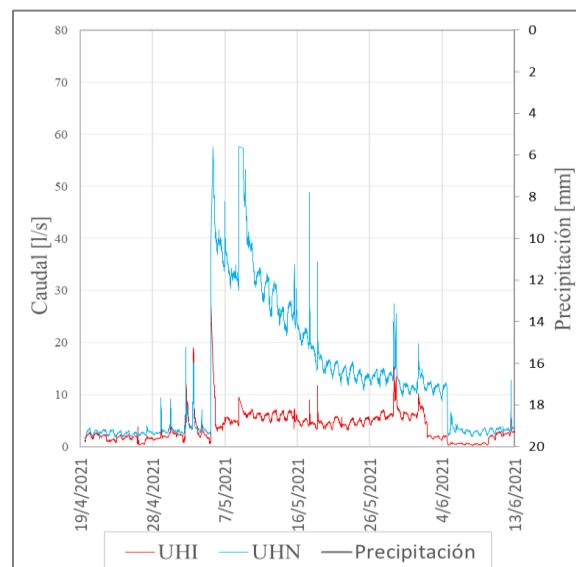
*Comparación de resultados obtenidos con indicadores determinados en otras unidades hidrográficas de páramo*

	Estación	Uso de suelo	DHQ25 [días]	DLQ75 [días]	QVAR [N/A]	R2FDC [N/A]	IRH [N/A]
Presente trabajo	Intervenida [UHI]	Cultivo	5.46	4.93	0.661	-0.903	0.735
	Natural [UHN]	Natural	5.77	5.94	1.167	-0.35	0.769
Unidades hidrográficas en ecosistema de páramo. Estudio Ochoa Tocachi (Ochoa Tocachi, 2019)	JTU_01	-	7.56	13.13	0.31	-0.41	0.91
	JTU_02	Pastoreo	4.18	8.87	1.44	-0.99	0.46
	JTU_03	Natural	4.74	7.52	0.86	-0.59	0.63
	JTU_04	Cultivo	5.88	12.6	1.05	-0.32	0.63
	LLO_01	Pastoreo	8.56	8.8	0.54	-0.46	0.74
	LLO_02	Pastoreo	9.58	14	0.57	-0.6	0.71
	PAU_01	Natural	5.13	19.6	0.85	-0.7	0.63
	PAU_02	Natural	8.16	10.45	0.79	-0.73	0.62
	PAU_03	Forestación	15.39	8.6	1.14	-1.12	0.47
	PAU_04	Cultivo	3.1	7.33	1.33	-1.05	0.43
	PIU_01	Natural	3.07	5.55	1.09	-1.28	0.46
	PIU_02	Pastoreo	3.98	19.35	1.15	-1.32	0.44
	PIU_03	-	54.5	5.67	1.85	-1.63	0.18
	PIU_04	Forestación	22.71	8.86	1.05	-0.7	0.52
Unidades hidrográficas en ecosistemas de páramo. Estudio H.K. Chow (Chou, 2019)	PIU_07	Ganadería	11.42	15.22	1.58	-0.48	0.4
	JTU_03	Natural	-	-	0.9	-0.51	-
	JTU_02	Pastoreo	-	-	1.44	-1.03	-
	LLO_01	Pastoreo	-	-	0.68	-0.69	-
	LLO_02	Restauración	-	-	0.6	-0.53	-
	PAU_01	Natural	-	-	0.87	-0.74	-
	PAU_04	Cultivo	-	-	1.34	-1.11	-
	PAU_02	Natural	-	-	0.73	-0.68	-
	PAU_03	Forestación (pinos)	-	-	0.97	-0.9	-
	PIU_01	Natural	-	-	1.09	-1.29	-
PIU_02	Pastoreo	-	-	1.15	-1.37	-	
Unidad hidrográfica en ecosistema de páramo, caso Río Paute (Sari Guambaña, 2022)	Río Paute	Natural	8.48	18.42	0.47	-0.46	0.81

El índice de variabilidad de caudal o QVAR, indica el grado de dispersión que hay en los valores de caudal de las unidades en el tiempo estudiado; en este estudio, la UHN presenta una mayor dispersión con un valor de QVAR de 1.167, en contraste con la UHI, que tiene una variabilidad de caudal de 0.661, presentando una disminución del 56.64%. Se compararon los resultados obtenidos de otros estudios realizados en otras zonas con ecosistema de páramo, el comportamiento obtenido del trabajo actual es contrario al esperado, siendo la variabilidad de caudal mayor en las unidades intervenidas antrópicamente a comparación de las naturales (Ochoa Tocachi, 2019; Chou, 2019), generando incongruencia entre resultados. Se analizaron los supuestos que pudieron generar dicha incongruencia, en donde se encontró en los hidrogramas de la unidad natural, un periodo en el cual los valores de caudal, aumentan abruptamente, los cuales se mantienen constantes entre los periodos del 5 de mayo y 5 de junio de 2021, teniendo valores semejantes a los valores por creciente debido a periodos de altas precipitaciones de otros periodos (Figura 7).

### Figura 7

*Registro periodo de flujos altos UHN.*



Este fenómeno no se pudo incluir como irregularidad por colmatación de canales, ya que este ocurre en un periodo de tiempo entre dos visitas a la zona de estudio, en donde el caudal vuelve a sus valores normales antes de la visita a la zona. Sin embargo, al eliminar dicho periodo para el análisis de los indicadores hidrológicos, el coeficiente de variabilidad de caudal (QVAR) de la unidad natural disminuye a gran escala obteniendo un valor de 0.344 menor al obtenido por parte de la unidad intervenida el cual aumentó su valor a 0.663, semejante al comportamiento obtenido en trabajos con iguales indicadores. En el análisis de lo que pudo haber ocurrido durante este periodo, se observó una gran cantidad de altos valores de precipitación, lo que incrementó los caudales de cada unidad, y como consecuencia hubo un mayor arrastre de sedimentos, que posiblemente produjo una colmatación en los canales, al presentarse la colmatación esta aumentaría los valores de presión y, por ende, los valores de flujo de las unidades hidrográficas. Con el transcurso del tiempo, y debido a las persistentes precipitaciones, es probable que esta capa de sedimento se haya drenado a través de los altos caudales registrados.

Con respecto al índice R2FDC, se puede dictaminar que la curva de la unidad UHI presenta un peor desempeño al presentar un valor de -0.903, teniendo un valor 2.58 veces mayor al ser comparada con la unidad natural, el cual presenta un valor de -0.35. Este mismo comportamiento se puede observar con los resultados de la literatura (Ochoa Tocachi, 2019; Chou, 2019), en el cual determinaron que las unidades semejantes con un uso de suelo para actividades agropecuarias presentan mayores valores de pendiente, siguiendo por las UH con vegetación de prado y finalmente las que tienen un uso de suelo destinado a vegetación endémica (Chou, 2019). Por otro lado, la unidad de estudio natural presenta un índice promedio del tercer medio mayor a 0.7 ( $R2FDC > 0.7$ ), lo cual indica un comportamiento poco amortiguado (Sari Guambaña, 2022), lo que significa un bajo desempeño en la retención hídrica en la unidad intervenida, presentándose

en el caudal total una mayor presencia de flujo superficial sobre el flujo base (Trancoso et al., 2016), lo cual afecta de manera inversamente proporcional los niveles de servicio de regulación y retención hídrica, al haber un rápido drenado del recurso hídrico (Torres Romero & Proaño Santos, 2018).

En los índices de promedio de flujos DHQ25 y DLQ75, la unidad hidrográfica natural presentó un mayor tiempo promedio tanto en flujos altos como bajos (5.8 y 5.9 días respectivamente) en comparación con la unidad intervenida donde hubo una disminución del 5.41% y 17.07% de los flujos mencionados. Al comparar los resultados en este trabajo con los de los estudios realizados previamente, con diferente temporalidad y en la misma UH, se encontró una variabilidad en el comportamiento de los flujos, siendo que, para un primer trabajo comprendido entre noviembre del 2019 y abril de 2021, se presentó una disminución en el índice DHQ25 y un aumento en el DLQ75, mientras que para el segundo estudio realizado entre septiembre 2019 y enero de 2020, se presentó un aumento de ambos índices. En contraste al valorar estudios realizados en diferentes unidades hidrográficas de distintos páramos, se evidenció igualmente una variabilidad en cuanto a los resultados obtenidos, que se encuentra directamente relacionada con las precipitaciones y las propiedades hidrológicas de cada UH (Ochoa Tocachi, 2019); por ejemplo en el páramo de Jatunhuaycu (JTU) con la adecuación del suelo para actividades agropecuarias, se presentó una disminución del 11.81% del índice DHQ25 y un aumento del 17.95% del DLQ75, mientras que en la zona de páramo en Paute (PAU), con los cambios en el uso del suelo para distintas actividades, se presentó una disminución tanto del DHQ25 como del DLQ 75, siendo del 39.57% y 62.60% respectivamente. Finalmente, con la amplia variabilidad de comportamientos en los flujos de las UH del presente estudio y las evaluadas en otros trabajos, se puede resaltar que la unidad natural tendrá un mayor tiempo de

flujo promedio en ambos flujos en todos los casos, sin embargo, no es posible identificar un patrón que determine un deterioro en los servicios de regulación y retención hídrica.

Respecto del indicador IRH, se obtuvo un valor de 0.735 por parte de la UHI y 0.769 por parte de la UHN, esto significó una disminución del 4.42% por parte de la unidad hidrográfica intervenida, al analizarse estos resultados con respecto a estudios previos en la zona y en otros estudios realizados en otras unidades hidrográficas en ecosistemas de páramo se puede observar el mismo comportamiento llegando a obtener disminuciones entre el 4.35% y 24.19% por parte de la unidad hidrográfica intervenida indicando así de manera cuantitativa una menor capacidad de retención y regulación del recurso hídrico (Ochoa Tocachi, 2019). Finalmente, en la clasificación ENA (Tabla 3), se pudo determinar por medio del indicador IRH una menor clasificación por parte de la UHI, teniendo la categoría de nivel de retención y regulación hídrica moderada, la cual está por debajo de la obtenida por parte de la UHN que obtuvo una clasificación de nivel de retención y regulación hídrica alta, indicando una desmejora en niveles de servicio por medio de esta clasificación.

Basados en los resultados obtenidos de los anteriores indicadores hidrológicos se pudo visualizar un deterioro por parte de los servicios de retención y regulación hídrica en la unidad hidrográfica intervenida, al analizar las posibles causas se identificaron diversos factores influidos por las prácticas agrícolas desarrolladas en la zona, como lo son: el aumento de la demanda hídrica, el cambio de la cobertura vegetal, el aumento de evapotranspiración y la alteración de las propiedades hidrofísicas del suelo (Mosquera et al., 2023); este último siendo el que principalmente favorece el deterioro de los servicios mencionados (Buytaert et al., 2006). Las principales propiedades del suelo que se vieron afectadas fueron: la reducción de la retención de humedad, el aumento de densidad relativa, la disminución de carbono orgánico y la disminución

de porosidad de suelo; estas son alteradas por los procesos de labrado y preparación de la tierra, en los cuales se elimina la vegetación nativa y se compacta la superficie de la misma, destruyendo los sistemas superficiales de filtración de agua y generando así una impermeabilidad que aumenta la conductividad con predominancia de flujos superficiales (Daza Torres et al., 2014).

### **3.3 Gestión de alternativas**

Dentro del contexto de la zona de estudio se observó que las actividades agrícolas realizadas dentro de la unidad hidrográfica intervenida tienen un desarrollo principalmente artesanal, en donde la labranza y preparación del suelo se realiza de manera manual y los procesos de cultivo se realizan por medio del conocimiento empírico de los campesinos que es pasado de generación en generación entre la comunidad (Barrera Cadena, 2022). Con base a los factores encontrados en la zona de estudio y al tipo de procesos agrícolas efectuados en ella, las alternativas para el mejoramiento y conservación del nivel de retención y regulación hídrica de la unidad hidrográfica intervenida son:

- El traslado de la zona de cultivo a un lugar más distante a la fuente hídrica de la unidad hidrográfica intervenida y que sea de menor inclinación, esto se debe a que al haberse analizado la zona de estudio en las visitas realizadas a esta se puede observar que las actividades de cultivo de cebolla y papa se desarrollan en lugares muy próximos a la fuente de agua además de presentar en el terreno una alta pendiente, significando un alto nivel de impacto por parte de la zona de cultivo sobre los servicios de retención y regulación hídrica ya que al desarrollarse este tipo de actividades en las laderas estas son elementos fundamentales para la actividad hídrica del ecosistema (Llanes et al., 2020; Campos Perdomo, 2021) donde las pendientes son primordiales para el proceso de drenaje y filtración de agua en la zona (Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográfica, s.f.), haciendo que el desarrollo de las actividades agropecuarias genere en

estos drenajes impermeabilidad y que no haya una buena retención de agua, permaneciendo poco tiempo allí.

- Realización de sistemas de pozos de captación de agua para el sistema de riego con el fin de disminuir la demanda hídrica generada sobre la UHI (Captación y almacenamiento de agua de lluvia. Santiago, Chile: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), 2013), esto con el fin de aumentar los niveles participación de flujo base en el caudal total y disminuir la predominancia de flujos superficiales en este. Para ello se plantea la realización de un pozo artificial a cercanías de la zona de cultivo bajo una cota mayor a la zona para la realización de riego, dentro de este pozo se tienen tres tipos de captadores de agua para que este se mantenga a niveles óptimos para la realización de las actividades agropecuarias, estos son: recolectores de agua-niebla, consisten en la construcción de diferentes paneles a base de tela de poliéster los cuales bajo este material recolectaran el agua de la niebla y de la lluvia horizontal presentada en la zona (García Ubaque et al., 2013); recolectores de agua por escorrentía, estos se basan en la creación de zonas impermeables que por medio de un sistema de tuberías conduzcan el agua obtenida de esta zona hasta el pozo que actuaría como un hidroacumulador, para el diseño de estas zonas impermeables sería lo recomendado realizarse por medio de la precipitación presentada en la zona (Sangüesa Pool, 2021); captador de agua por bombeo, este último se realizará solo para periodos de sequía en donde sea necesario su utilización donde se tomara por proceso de bombeo el recurso hídrico directo de la fuente de la unidad hidrográfica intervenida.

## 5. Conclusiones

En la obtención de caudales por medio del manejo de las estaciones de tipo hidro climática se pudo obtener que la unidad natural presenta un mayor rendimiento hídrico con respecto a la unidad intervenida, esto se puede visualizar gráficamente en sus registros a lo largo del tiempo, así como en su curva de duración, en donde este rendimiento es mayor la mayoría del tiempo.

Con base a la estimación y análisis de los indicadores hidrológicos abordados para el presente trabajo, se puede determinar un peor rendimiento por parte de la unidad intervenida en los indicadores IRH y R2FDC, presentando una disminución con respecto a la unidad natural en el primer índice del 4.42% y un aumento en el segundo del 158.00%; en lo que respecta al indicador QVAR, se obtuvo una disminución de la UHI frente a la UHN del 43.36%, esto debido al aumento abrupto de caudales presentado en la unidad natural en el periodo entre mayo y junio de 2021. Finalmente, para los indicadores DLQ75 y DHQ25, la unidad intervenida antrópicamente, presentó un aumento del 5.41% y 17.07% respectivamente, presentando un crecimiento de periodos de flujos altos y bajos.

Finalmente, bajo el análisis de los resultados obtenidos en este proyecto, se puede inferir que, en el periodo de estudio abarcado desde septiembre de 2019 hasta septiembre de 2022, se evidenció el impacto que tuvo las actividades agrícolas sobre los niveles de servicio de retención y regulación hídrica en la unidad intervenida antrópicamente, en comparación con los resultados registrados por la unidad natural.

### Referencias Bibliográficas

- Arias Castellanos, A. V., Castellanos Prada, F. (2020). *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* [Pregrado inédita]. Universidad Industrial de Santander.
- Barrera Cadena, M. J., Bautista Prada, E. (2022). *Influencia de las actividades agropecuarias sobre el contenido de nitrógeno en el agua superficial de una unidad hidrográfica en el páramo de berlín (Santander, Colombia)* [Pregrado inédita]. Universidad Industrial de Santander.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.06.002>
- Cabrera, M., & A., R. H. W. (2014). *Restauración ecológica de los páramos de colombia transformación y herramientas Para Su conservación*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Cabrera-Balarezo, J. J., Sucozhañay-Calle, A. E., Crespo-Sánchez, P. J., & Timbe-Castro, L. M. (2022). Applying hydrological modeling to unravel the effects of land use change on the runoff of a paramo ecosystem. *DYNA*, 89(221), 68–77. <https://doi.org/10.15446/dyna.v89n221.98132>

Campos Perdomo, A. A. (2021). *Análisis de la Capacidad de Retención Hídrica del Suelo en Zonas de Páramo. Caso de Estudio Quebrada Honda, Sibaté - Pasca* [Pregrado inédita]. Universidad Nacional Abierta y a Distancia.

*Captación y almacenamiento de agua de lluvia. Santiago, Chile: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO).* (2013). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO).

Castro Caro, Y. C. (2021). *Análisis de indicadores hidrológicos para determinar la afectación de los servicios de regulación y suministro hídrico en cuencas de páramo debido al uso del suelo. Caso de estudio: Berlín (Santander)* [Pregrado inédita]. Universidad Industrial de Santander.

Celis Vargas, A. D. (2022). *Evaluación de los efectos del cambio de uso de suelo y cobertura sobre los servicios de abastecimiento y regulación hídrica ofertados por unidades hidrográficas de páramo* [MSc. inédita]. Universidad Industrial de Santander.

Chou, H. K. (2019). *Assessing the impacts of land-use change on the hydrology of the tropical Andes* [PhD inédita]. Universidad Imperial de Londres.

Cortés-Duque, J., & Enrique, S. P. C. (2013). *Visión socioecosistémica de los páramos y la Alta Montaña Colombiana: Memorias del Proceso de definición de criterios para la delimitación de páramos*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.

Daza Torres, M. C., Hernández Flórez, F., & Triana, F. A. (2014). Efecto del Uso del Suelo en la Capacidad de Almacenamiento Hídrico en el Páramo de Sumapaz - Colombia. *Revista*

*Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 67(1), 7189–7200. <https://doi.org/10.15446/rfnam.v67n1.42642>

García Ubaque, C. A., Vaca Bohorquez, M. L., García Ubaque, J. C. (2013). Factibilidad técnica y de salud pública de la recolección de aguas nieblas: Estudio de caso. *Revista de salud pública, 15*(3).

Gordillo, J., & Pineda, L. E. (2021). Unravelling runoff processes in Andean basins in northern Ecuador through hydrological signatures. *Hydrological Processes. https://doi.org/10.1002/hyp.14354*

*Índice de Retención y Regulación Hídrica (IRH) – IDEAM.* (s.f.). IDEAM - IDEAM. <http://www.ideam.gov.co/documents/11769/646961/3.04+HM++ndice+de+Retención+y+Regulación+Hídrica.pdf/f0d464f9-9877-4163-b5f1-14f1a6700dd4>

Llanes, G. M., Rizo Bermúdez, D. O., Mendoza Corrales, R. B., Avilés Silva, E. A., & Duarte Canales, H. A. (2020). Agricultura de conservación de suelos y su efecto en la erosión hídrica y propiedades hidrofísicas en la unidad hidrográfica Quebrada Arriba, Yalagüina, 2017. *La Calera, 20*(34). <https://doi.org/10.5377/calera.v20i34.9773>

Mosquera, G. M., Hofstede, R., Bremer, L. L., Asbjornsen, H., Carabajo-Hidalgo, A., Célleri, R., Crespo, P., Esquivel-Hernández, G., Feyen, J., Manosalvas, R., Marín, F., Mena-Vásquez, P., Montenegro-Díaz, P., Ochoa-Sánchez, A., Pesántez, J., Riveros-Iregui, D. A., & Suárez, E. (2023). Frontiers in páramo water resources research: A multidisciplinary

assessment. *Science of The Total Environment*, 164373. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164373>

Ochoa Tocachi, B. F. (2019). *Participatory hydrological monitoring to support sustainable water resources management* [PhD]. Universidad Imperial de Londres.

Ochoa-Tocachi, B. F., Buytaert, W., De Bièvre, B., Célleri, R., Crespo, P., Villacís, M., Llerena, C. A., Acosta, L., Villazón, M., Gualpa, M., Gil-Ríos, J., Fuentes, P., Olaya, D., Viñas, P., Rojas, G., & 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> (Ochoa-Tocachi et al., 2016)

*Páramos*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2022, January 14). <https://www.minambiente.gov.co/direccion-de-bosques-biodiversidad-y-servicios-ecosistemicos/paramos/>

*Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográfica*. (s.f.). Portal CVC. [https://www.cvc.gov.co/sites/default/files/Planes\\_y\\_Programas/Planes de Ordenacion y Manejo de Cuencas Hidrografica/La%20Vieja%20-%](https://www.cvc.gov.co/sites/default/files/Planes_y_Programas/Planes_de_Ordenacion_y_Manejo_de_Cuencas_Hidrografica/La%20Vieja%20-%)

Prieto Jimenez, D. L., Reyes Rodríguez, F. O. (2020). *Análisis del efecto del uso del suelo sobre la capacidad de retención y regulación hídrica en cuencas de páramo. Caso de estudio: Berlín (Santander)* [Pregrado inédita]. Universidad Industrial de Santander.

Rodríguez-Morales, M., Acevedo-Novoa, D., Machado, D., Ablan, M., Dugarte, W., & Dávila, F. (2019). Ecohydrology of the Venezuelan páramo: water balance of a high Andean

watershed. *Plant Ecology & Diversity*, 12(6), 573–591. <https://doi.org/10.1080/17550874.2019.1673494>

Sangüesa Pool, C., Vallejos Carrera, C. (2021). Diseño eficiente de Sistemas de captación de aguas lluvias en zonas rurales para su aplicación en zonas con demandas crecientes. *Aqua-LAC*, 13(2).

Sari Guambaña, F. F. (2022). *Análisis del comportamiento de una cuenca hidrográfica tropical utilizando Índices hidrológicos, Estudio de caso cuenca del Río Paute* [Pregrado inédita]. Universidad Católica de Cuenca. (Sari Guambaña, 2022, p. XXXX)

Torres Romero, S. F., & Proaño Santos, C. O. (2018). Componentes del balance hídrico en los páramos de Jatunsacha, Ecuador. *La Granja*, 28(2), 52–66. <https://doi.org/10.17163/lgr.n28.2018.04>

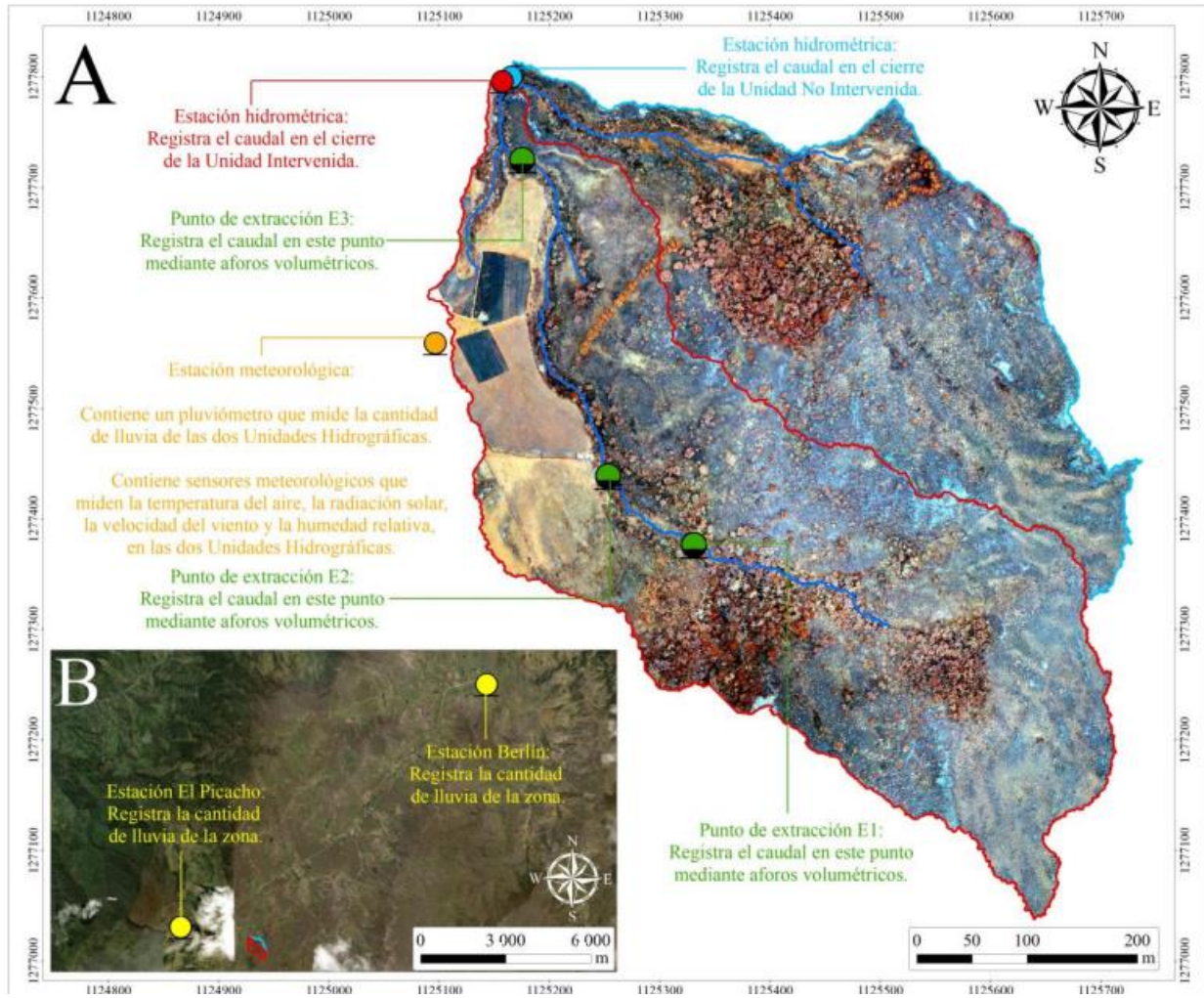
Trancoso, R., Larsen, J. R., McAlpine, C., McVicar, T. R., & Phinn, S. (2016). Linking the Budyko framework and the Dunne diagram. *Journal of Hydrology*, 535, 581–597. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.02.017>

Vargas Rios, O. (2022). *Bases ecológicas y sociales para la restauración de los páramos*. Universidad Nacional de Colombia.

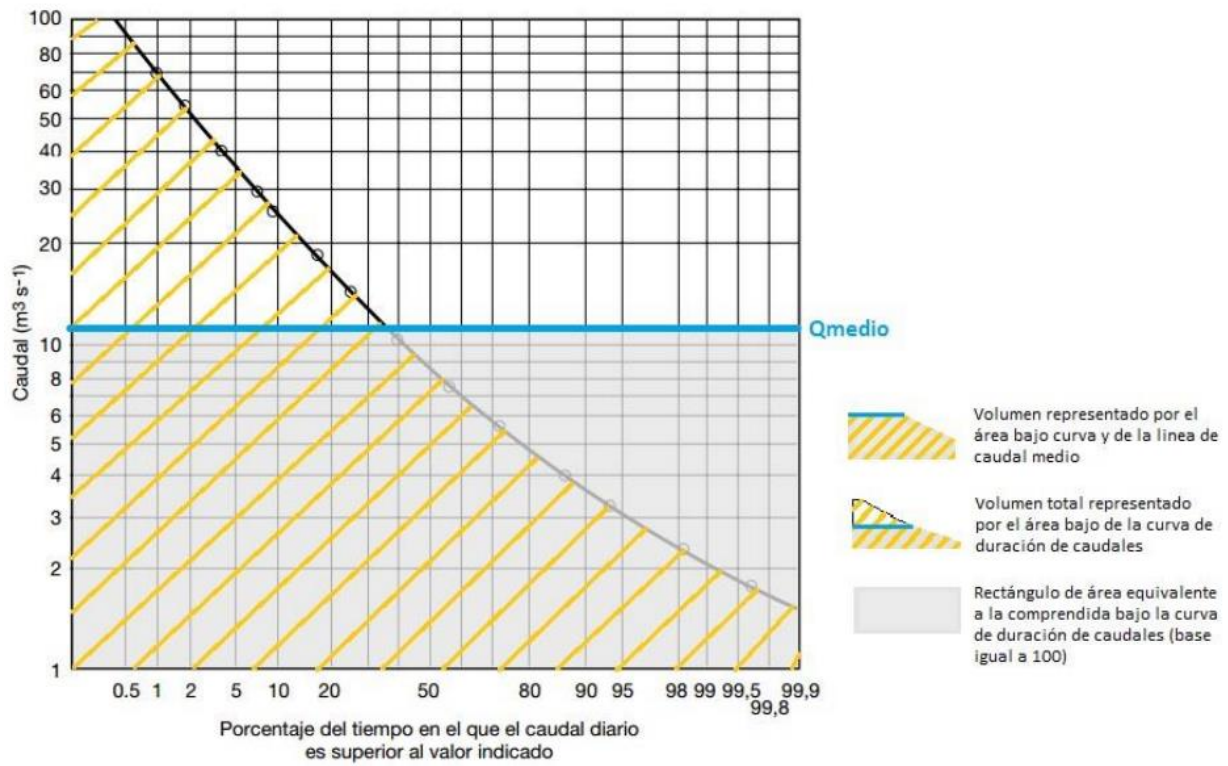
Villón Bejar, M. (2008). *Hidraulica de Canales* (2ª ed.). Editorial Tecnológica de Costa Rica.

Apéndices

Apéndice A Zona de estudio



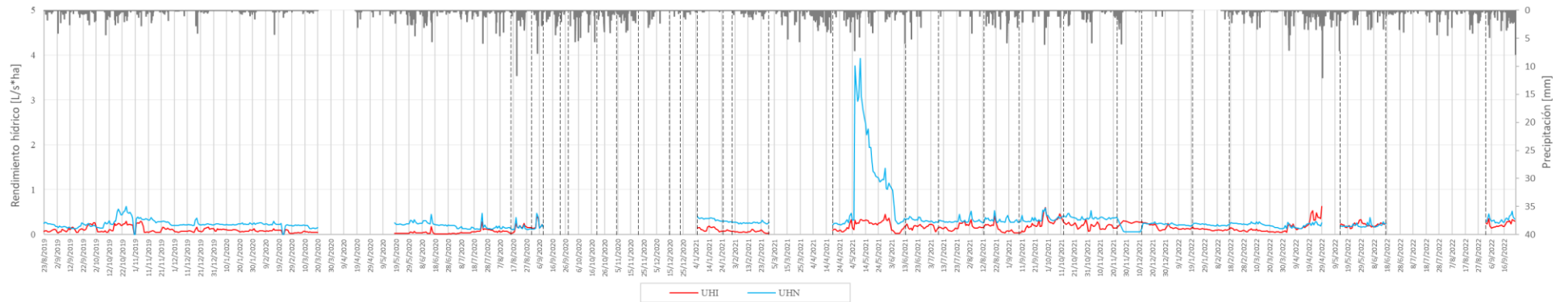
**Apéndice B** Representación gráfica volúmenes curva de duración de caudal



## Apéndice C Rendimiento hídrico unidades hidrográficas

## Figura 1

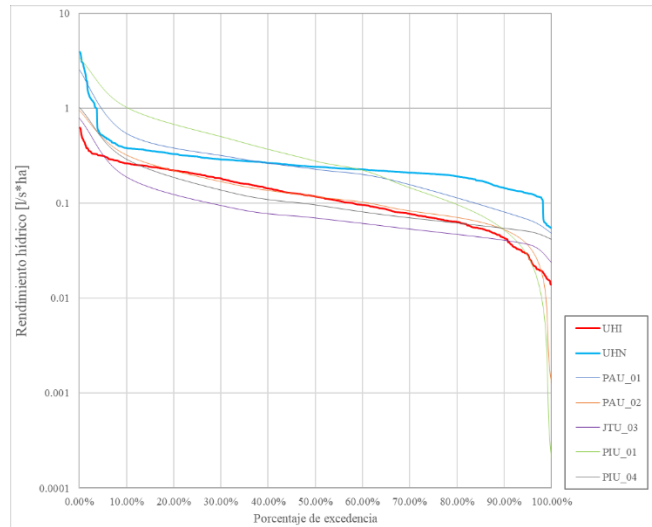
Rendimiento hídrico diario de las unidades hidrográficas para el período 19/08/2019 a 24/09/2022. Fuente: elaboración propia.



**Apéndice D** Análisis de resultados

**Figura 2.**

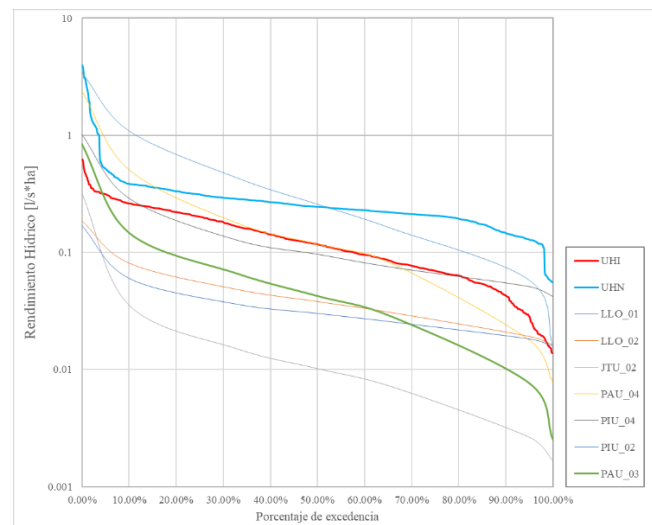
*Grafica de comparación de comportamiento de curvas de duración de caudal con respecto a otras unidades hidrográficas naturales. Fuente: Célis [5] y elaboración propia*



UHI: Unidad hidrográfica intervenida; UHN: Unidad hidrográfica natural; PAU: Zona de páramo de Paute; JTU: Zona de páramo de Jatunhuaycu; PIU: Zona de páramo de Piura; LLO: Zona de páramo de Lloa.

**Figura 2.**

*Grafica de comparación de comportamiento de curvas de duración de caudal con respecto a otras unidades hidrográficas intervenidas antrópicamente. Fuente: Célis [5] y elaboración propia*



UHI: Unidad hidrográfica intervenida; UHN: Unidad hidrográfica natural; PAU: Zona de páramo de Paute; JTU: Zona de páramo de Jatunhuaycu; PIU: Zona de páramo de Piura; LLO: Zona de páramo de Lloa.

