



**DEPARTAMENTO  
DE POSGRADOS**



Co-funded by the  
Erasmus+ Programme  
of the European Union



## **DEPARTAMENTO DE POSGRADOS**

### **Maestría en Cambio Climático, Agricultura y Desarrollo Rural Sostenible – MACCARD**

**Efecto de la estructura de los modelos hidrológicos en la  
simulación de los procesos hidrológicos de una cuenca de  
montaña andina con lagunas.**

**Título de cuarto nivel a obtener:**

Magíster en Cambio Climático, Agricultura y Desarrollo Rural Sostenible

**Autor:**

Julio Cesar Torres Elizalde

**Directora del Trabajo:**

Paola Fernanda Montenegro Díaz

**Cuenca, Ecuador 2026**

## **DEDICATORIA**

Quiero dedicar este trabajo y todo el esfuerzo que he puesto en él a mi querida familia, quienes me han acompañado a lo largo de este gratificante y constructivo proceso educativo.

## **AGRADECIMIENTO**

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mi familia por el apoyo en los momentos en los que más lo necesité. A mis compañeros por su amistad, que me ha permitido compartir gratos momentos juntos y que me ha llevado a tener un pensamiento más crítico sobre el mundo que nos rodea.

Al Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales (IDRHICA) de la Universidad de Cuenca por facilitar la información para el desarrollo de esta investigación.

Así también a la Paola Montenegro y Ana Elizabeth Ochoa por toda la guía en este proceso.

## RESUMEN

La información referente al funcionamiento de los modelos hidrológicos en cuencas de montaña es limitada pero indispensable para la gestión de los recursos hídricos en contextos de escasez de información. El objetivo fue evaluar el desempeño de dos modelos hidrológicos para la simulación del caudal mensual en una cuenca de páramo ubicada en la cordillera de los Andes. Teniendo en cuenta un enfoque de gestión de cuencas de páramo, los modelos seleccionados fueron SWAT+ y WEAP; estos fueron calibrados y validados en una cuenca de 73 Km<sup>2</sup> ubicada en los Andes del sur del Ecuador entre los 4433 y 3321 m.s.n.m. Un tercer modelo HEC–HMS previamente implementado en la cuenca de estudio se utilizó como referencia para una comparación con los modelos y los datos observados. Es importante mencionar que HEC-HMS hidrológicos está orientado a comprender procesos hidrológicos, mientras que WEAP y SWAT+ tienen un enfoque de manejo. Se utilizaron cuatro años de datos hidrometeorológicos (2015-2018) distribuidos de la siguiente manera: un año para warm-up, dos años para calibración y un año para validación. El desempeño de los modelos se evaluó con: Coeficiente de determinación R<sup>2</sup>, Porcentaje del sesgo (PBIAS), Coeficiente de eficiencia de Nash–Sutcliffe (NSE) y el Coeficiente de eficiencia de Kling-Gupta (KGE). Los resultados indican que WEAP tiene un mejor desempeño en la simulación de caudales en calibración y validación (R<sup>2</sup>: 0.90 y 0.90; PBIAS:8.60% y 18.10%; NSE: 0.88 y 0.80 y KGE: 0.88 y 0.81), en segundo lugar HEC–HMS (R<sup>2</sup>: 0.76 y 0.89; PBIAS:2.40% y 18.80%; NSE: 0.74 y 0.79 y KGE: 0.71 y 0.79), y por último SWAT+ (R<sup>2</sup>: 0.57 y 0.03; PBIAS:12.60% y 8.10%; NSE: 0.53 y -0.09 y KGE: 0.61 y 0.04). Este desempeño a escala mensual sugiere su aplicabilidad para estudios enfocados en la planificación y gestión de recursos hídricos. Sin embargo, se sugiere probar la eficiencia de WEAP con un set más largo de datos para calibración y validación y utilizarlo para analizar escenarios de cambio climático y de uso de suelo.

**Palabras clave:** Modelación hidrológica, Andes, SWAT+, HEC–HMS, WEAP.

## ABSTRACT

Information regarding the performance of hydrological models in mountain basins is limited but essential for water resource management in contexts of data scarcity. The objective was to evaluate the performance of two hydrological models for simulating monthly flow in a páramo basin located in the Andes Mountains. Considering a páramo basin management approach, the selected models were SWAT+ and WEAP; these were calibrated and validated in a 73 km<sup>2</sup> basin located in the southern Andes of Ecuador between 4433 and 3321 meters above sea level. A third model, HEC-HMS, previously implemented in the study basin, was used as a reference for comparison with the models and observed data. It is important to mention that hydrological HEC-HMS is oriented towards understanding hydrological processes, while WEAP and SWAT+ have a management focus. Four years of hydrometeorological data (2015-2018) were used, distributed as follows: one year for warm-up, two years for calibration, and one year for validation. Model performance was evaluated using the coefficient of determination ( $R^2$ ), percentage bias (PBIAS), Nash-Sutcliffe efficiency coefficient (NSE), and Kling-Gupta efficiency coefficient (KGE). The results indicate that WEAP has a better performance in flow simulation in calibration and validation ( $R^2$ : 0.90 and 0.90; PBIAS: 8.60% and 18.10%; NSE: 0.88 and 0.80 and KGE: 0.88 and 0.81), followed by HEC-HMS ( $R^2$ : 0.76 and 0.89; PBIAS: 2.40% and 18.80%; NSE: 0.74 and 0.79 and KGE: 0.71 and 0.79), and finally SWAT+ ( $R^2$ : 0.57 and 0.03; PBIAS: 12.60% and 8.10%; NSE: 0.53 and -0.09 and KGE: 0.61 and 0.04). This monthly-scale performance suggests its applicability to studies focused on water resource planning and management. However, it is recommended to test WEAP's efficiency with a longer dataset for calibration and validation and to use it to analyze climate change and land-use scenarios.

**Keywords:** Hydrological modeling, Andes, SWAT+, HEC-HMS, WEAP.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA.....	I
AGRADECIMIENTO .....	II
RESUMEN.....	III
ABSTRACT .....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO .....	V
ÍNDICE DE FIGURAS .....	VII
ÍNDICE DE TABLAS .....	VIII
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	4
2.1. Área de estudio.....	4
2.2. Metodología.....	5
2.2.1. Disponibilidad y tratamiento de la información.....	5
2.2.2. Selección de modelos.....	6
2.2.2.1. SWAT+ (Soil and Water Assessment Tool).....	6
2.2.2.2. HEC–HMS (Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System).....	7
2.2.2.3. WEAP (Water Evaluation and Planning System).....	8
2.2.3. Calibración y validación de los modelos.....	10
2.2.3.1. Coeficiente de determinación ( $R^2$ ).....	11
2.2.3.2. Porcentaje de sesgo (PBIAS).....	12
2.2.3.3. Coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE).....	12
2.2.3.4. Coeficiente de eficiencia de Kling-Gupta (KGE).....	13

<b>3. RESULTADOS.....</b>	<b>14</b>
<b>3.1. Calibración de parámetros.....</b>	<b>14</b>
<b>3.2. Hidrograma de la fase de Calibración.....</b>	<b>16</b>
<b>3.3. Hidrograma de la fase de Validación.....</b>	<b>17</b>
<b>3.4. Métricas de desempeño de los modelos.....</b>	<b>19</b>
<b>4. DISCUSIÓN.....</b>	<b>19</b>
<b>4.1. Análisis gráfico.....</b>	<b>20</b>
<b>4.2. Análisis estadístico.....</b>	<b>20</b>
<b>4.3. Estructura de los modelos.....</b>	<b>22</b>
<b>4.4. Sensibilidad de parámetros.....</b>	<b>24</b>
<b>5. CONCLUSIÓN.....</b>	<b>24</b>
<b>6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>25</b>

**ÍNDICE DE FIGURAS**

<b>Figura 1.</b> Ubicación de la cuenca Quinuas .....	4
<b>Figura 2.</b> Conceptualización del método de humedad del suelo en el módulo hidrológico de WEAP. ....	9
<b>Figura 3.</b> Precipitación y caudal diario registrados en la estación Quinuas. ....	11
<b>Figura 4.</b> Flujograma del proceso de modelación hidrológica en la cuenca Quinuas.....	14
<b>Figura 5.</b> Hidrogramas simulados en la cuenca Quinuas para el periodo de calibración. ...	17
<b>Figura 6.</b> Caudal acumulado simulado y observado en la cuenca Quinuas para calibración. ....	17
<b>Figura 7.</b> Hidrogramas simulados en la cuenca Quinuas para el periodo de validación. ....	18
<b>Figura 8.</b> Caudal acumulado simulado y observado en la cuenca Quinuas para validación. ....	18

**ÍNDICE DE TABLAS**

<b>Tabla 1.</b> Distribución de la cobertura vegetal en la cuenca Quinuas. ....	5
<b>Tabla 2.</b> Estaciones de monitoreo hidro-climatológico de la cuenca Quinuas. ....	5
<b>Tabla 3.</b> Reclasificación del uso de suelo en la cuenca Quinuas para el modelo SWAT+. ...	6
<b>Tabla 4.</b> Parámetros calibrados del modelo SWAT+. Clasificados por tipo de suelo y horizonte. ....	15
<b>Tabla 5.</b> Parámetros calibrados del modelo WEAP. Clasificados por tipo de cobertura. ....	15
<b>Tabla 6.</b> Parámetros calibrados del modelo HEC-HMS. ....	16
<b>Tabla 7.</b> Índices de eficiencia de los modelos utilizados. ....	19

## 1. INTRODUCCIÓN.

Los páramos son ecosistemas de alta montaña distribuidos en los Andes tropicales (región andina de Venezuela, Colombia, Ecuador y Norte de Perú) y algunas zonas de Costa Rica, entre los 3000 y 4700 msnm (Castañeda-Martín & Montes-Pulido, 2017; Correa et al., 2020; Minaya Maldonado, 2016). En estos ecosistemas predominan los suelos de tipo Andosol e Histosol (Buytaert et al., 2005; Castañeda-Martín & Montes-Pulido, 2017) que poseen una alta capacidad de retención de agua por su alto contenido de materia orgánica (Quichimbo et al., 2012). La vegetación está compuesta principalmente por gramíneas nativas o pajonal de baja demanda hídrica (Buytaert et al., 2006; Meyers et al., 2023). El clima es frío y húmedo, con la constante presencia de niebla y llovizna (Berrones et al., 2022). La precipitación se caracteriza por una poco marcada estacionalidad. Generalmente se observan uno o dos picos de lluvia durante el año, con intensidades influenciadas por la topografía, la altitud y los vientos húmedos del Pacífico o Amazonas. En el páramo y alta montaña la precipitación suele ser persistente, de tipo convectivo y orográfico, puede variar entre 700 mm y 3000 mm (Padrón et al., 2015). Los caudales extremos son poco probables por la alta capacidad de almacenamiento de agua de los suelos y en época de estiaje son sostenidos por el aporte continuo de agua desde el suelo y subsuelo (Mosquera et al., 2015).

Los páramos son considerados como un elemento clave en el desarrollo económico de las poblaciones andinas. De hecho, en Ecuador proporcionan servicios hidrológicos como la provisión de agua para generación de hidroelectricidad, riego, consumo doméstico e industrial y para la conservación de la biodiversidad. Es por ello que, instituciones académicas y gubernamentales realizan esfuerzos científicos, económicos y técnicos para implementar redes de monitoreo hidrológico en las cuencas de montaña. Sin embargo, la densidad y la distribución de estaciones de medición sigue siendo insuficiente, y por consiguiente, para entender la hidrología de los páramos es necesario usar herramientas alternativas.

Con el propósito de cubrir las brechas de conocimiento y mejorar el manejo de recursos hídricos, se han diseñado modelos hidrológicos para comprender la hidrología de las cuencas y proponer escenarios de manejo (Majumder et al., 2010; Ranit et al., 2014). Los modelos hidrológicos son considerados como una aproximación a la realidad, en la que se considera al ciclo hidrológico de la cuenca como un sistema con entradas (precipitación) y salidas (evapotranspiración, escorrentía e infiltración) relacionadas mediante ecuaciones (Chow et al., 1988; Ranit et al., 2014). Por lo tanto, se puede afirmar que los modelos hidrológicos se han convertido en valiosas herramientas para representar los componentes del ciclo hidrológico. Es importante mencionar que existen varios tipos de modelos hidrológicos, cada uno con sus particularidades, y requerimientos específicos. Existen, por ejemplo, modelos

físicos agregados, semidistribuidos y distribuidos cuando se quiere describir la distribución espacial de los fenómenos.

Esto se traduce en que no existe un único modelo aplicable a todos los escenarios (por ejemplo a los tipos de cuencas e información disponible). Se necesita evaluar el desempeño de cada modelo para la cuenca de interés, puesto que la eficiencia de cada modelo depende de cuan congruentes son las características ambientales (es decir topografía, suelos, vegetación, clima) del área de estudio con la estructura del modelo en sí (Clark et al., 2008; Ocampo & Vélez Upegui, 2014), especialmente en un ecosistema tan complejo en interacciones ecohidrológicas como el páramo.

Sin embargo, como menciona Cabrera-Balarezo et al. (2019), son pocos los modelos hidrológicos desarrollados para ser utilizados en ecosistemas de montaña y específicamente en los páramos. Ecosistemas con caudales variables y baja estacionalidad, una característica que no suele ser representada adecuadamente por modelos diseñados para ecosistemas de llanura, donde los caudales se mantienen relativamente estables. Es por este motivo es que se han empezado a desarrollar investigaciones que buscan evaluar el desempeño de los modelos en ecosistemas de páramo, a pesar de que fueron desarrollados para escenarios distintos. Lo que se busca es identificar el más adecuado para utilizarse en cuencas poco monitoreadas, para en lo posterior modificarlos según las necesidades y/o probar escenarios de manejo y uso de suelo alternativos o incluso de cambio climático.

En cuencas de páramo del Ecuador se han probado los modelos HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System) (Cabrera-Balarezo et al., 2019; Duque & Zambrano, 2015) y HBV-light (Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning) (Cabrera-Balarezo et al., 2022; Sucozhañay & Célleri, 2018) para simular la escorrentía; mientras que en las cuencas de montaña de Perú, Colombia y Ecuador se han probado los modelos WEAP (Water Evaluation And Planning) (Flores-López et al., 2016; Moncada et al., 2021), InVEST (Seasonal Water Yield Model) (Hamel et al., 2020) y SWAT+ (The Soil & Water Assessment Tool) (Jarrin-Perez et al., 2024) para simular los flujos de agua.

Los modelos mencionados lograron un desempeño entre satisfactorio y aceptable para el periodo de validación, pero con ciertas limitaciones que deberán ser tomadas en cuenta en sus posteriores aplicaciones. Por ejemplo, HEC-HMS tuvo limitaciones para simular los caudales más altos (Cabrera-Balarezo et al., 2019), SWAT+ tuvo inconvenientes al simular caudales extremadamente bajos (Jarrin-Perez et al., 2024) y los modelos HBV e InVEST fallaron en estimar el volumen de la escorrentía (Sucozhañay & Célleri, 2018; Cabrera-Balarezo et al., 2022; Hamel et al., 2020). Un hito importante es el uso de modelos hidrológicos combinados con información recopilada mediante trazadores. Como en el caso de Pesántez et al., (2023) quien utilizó modelos hidrológicos asistidos por trazadores químicos para identificar las zonas de procedencia y el porcentaje de aporte de agua al cauce principal en las cuencas de páramo. Sin embargo, la complejidad de implementación y

necesidad de datos especializados, como los modelos que incluyen trazadores químicos, hace que SWAT+, HEC-HMS o WEAP sean preferidos por las instituciones gubernamentales encargadas del manejo de los recursos hídricos. En esta investigación se escogieron, por tanto, los modelos SWAT+, HEC-HMS y WEAP, de los cuales se describen brevemente algunas de sus características.

Soil and Water Assessment Tool (SWAT+) es un modelo semidistribuido y físicamente basado que requiere de datos de clima, vegetación, propiedades del suelo y topografía del terreno (Neitsch et al., 2011; Ochoa-Tocachi et al., 2022). Para propósitos de modelación SWAT+ divide la cuenca en subcuencas espacialmente relacionadas y subdivididas en unidades de respuesta hidrológica (HRU). La modelación se divide en dos fases: 1) la fase terrestre y 2) la fase de enrutamiento (Neitsch et al., 2011). Mientras en la primera se determina la cantidad de agua que llega al canal principal de cada subcuenca, en la segunda se representa el movimiento de dicha agua a través de la red de drenaje hacia el punto de desagüe (Jarrin-Perez et al., 2024).

El Sistema de Modelado Hidrológico del Centro de Ingeniería Hidrológica (HEC-HMS) es un modelo semidistribuido diseñado para simular los procesos de precipitación y escorrentía en sistemas de cuencas hidrográficas dendríticas. El funcionamiento de HEC-HMS se basa en la simulación modular de los componentes del ciclo hidrológico: las pérdidas (infiltración, interceptación), la transformación de lluvia en escorrentía, el flujo base y el transporte de caudal a través de los cauces. Cada módulo puede implementarse con distintos métodos numéricos (SCS-CN o Soil moisture accounting para pérdidas, Clark o Snyder para transformación, Muskingum para routing), lo que proporciona flexibilidad para adaptarse a diferentes condiciones de cuenca y escalas temporales (Scharffenberg, 2016).

Water Evaluation And Planning (WEAP) es una herramienta computacional desarrollada por el Stockholm Environment Institute y el Tellus Institute, con el fin de apoyar a la planificación de los recursos hídricos balanceando la oferta y demanda de agua. Dentro de WEAP se encuentra integrado un modelo hidrológico conceptual semidistribuido, que requiere de datos de entrada de temperatura, precipitación, humedad relativa y velocidad del viento para estimar los componentes del balance hidrológico. Este modelo cuasi físico unidimensional, con dos receptáculos de balance de agua para cada tipo de uso de suelo, reparte el agua entre escorrentía superficial, infiltración, evaporación, flujo base y percolación (Sieber, 2015).

La revisión bibliográfica, indica que el uso de modelos para estimar los componentes de balance hídrico en cuencas de montaña en los Andes está aumentando debido a la necesidad de mejorar el manejo de recursos hídricos frente a las presiones globales como el cambio de uso de suelo y el cambio climático. En ese sentido, el objetivo de esta investigación es evaluar el desempeño de dos modelos en la simulación de caudales para una cuenca de páramo de alta montaña con un sistema de lagunas. Y con ello cubrir el vacío de conocimiento respecto a la disponibilidad de un modelo hidrológico validado específicamente

para la cuenca Quinuas, enfocado en el manejo del recurso hídrico. A través de este análisis comparativo de los modelos hidrológicos, se podrá determinar qué modelo y estructura asociada se ajusta mejor al contexto de la cuenca andina bajo estudio. Permitiendo así poner a disposición de tomadores de decisiones gubernamentales, la comunidad científica y sociedad modelos hidrológicos de eficiencia probada para una cuenca de páramo, contribuyendo de esta manera al manejo sostenible de los recursos hídricos.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS.

### 2.1. Área de estudio.

La cuenca Quinuas se encuentra, parcialmente dentro del Parque Nacional Cajas, en la provincia Azuay ubicada en el sur del Ecuador (Figura 1). Esta unidad hidrográfica cuyo punto de aforo es la estación hidrológica Quinuas, abarca una superficie de 73.16 Km<sup>2</sup> y su rango altitudinal varía entre los 4433 y 3321 m.s.n.m. La precipitación media anual fluctúa entre los 991 y 1244 mm, la temperatura media anual es de 6.8 °C y la humedad relativa media anual es de 91% (Carrillo-Rojas et al., 2016). Con respecto a la cobertura vegetal (Tabla 1), está compuesta por pajonal (tussock grass), plantas de cojín (cushion plants/wetlands), bosque natural que incluyen bosques de Polylepis y bosque montano y coberturas antrópicas como pastos cultivados y plantaciones de pino. En cuanto al suelo, dentro de la cuenca se han identificado dos tipos: Andosoles e Histosoles (Tenelanda Patiño et al., 2018). Estos están fuertemente ligados a las coberturas vegetales, por lo general se encuentran en cobertura de pajonal sobre Andosoles y coberturas de plantas de cojín sobre Histosoles (Mosquera et al., 2015).

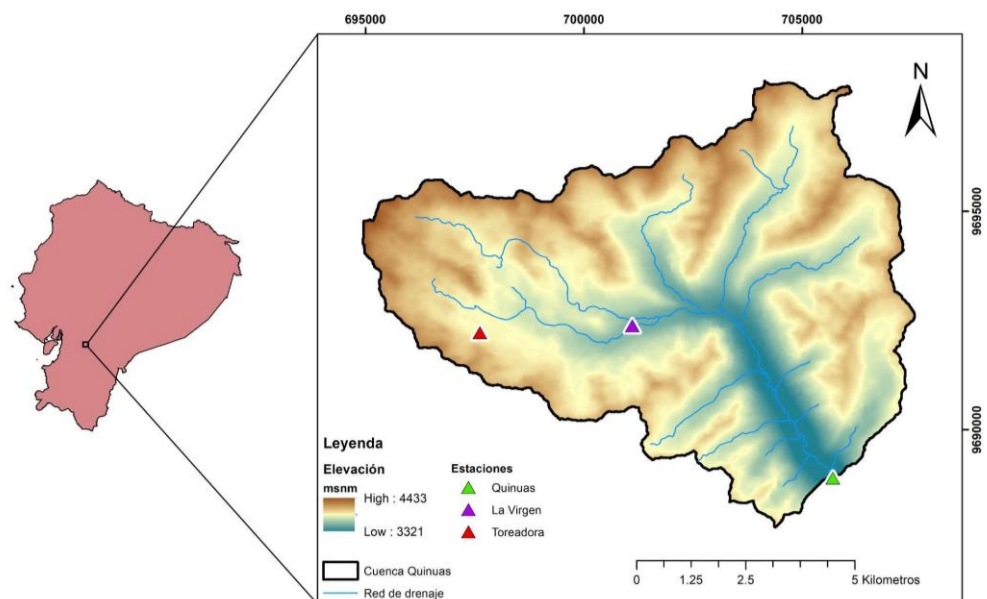


Figura 1. Ubicación de la cuenca Quinuas.

**Tabla 1.** Distribución de la cobertura vegetal en la cuenca Quinuas.

Cobertura Vegetal	Área (Km <sup>2</sup> )	Porcentaje (%)
Bosque	3.04	4.23
Lagunas	4.07	2.20
Pajonal	60.43	84.08
Pastos cultivados	2.58	3.59
Plantación de Pino	1.75	2.44
Plantas de cojín	2.49	3.47

## 2.2. Metodología.

### 2.2.1. Disponibilidad y tratamiento de la información.

Se utilizó la información hidrometeorológica de 4 años (2015 - 2018) de las estaciones indicadas en la Tabla 2, las cuales se encuentran ubicadas dentro de la cuenca Quinuas. Los datos hidrometeorológicos a escala temporal de 5 minutos fueron proporcionados por el Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales (IDRHICA) de la Universidad de Cuenca. Una vez obtenida la información, se realizaron pruebas de control de calidad de los datos para asegurar su validez para las modelaciones. Además, fue necesario realizar agregaciones de las variables según los requerimientos de cada modelo.

**Tabla 2.** Estaciones de monitoreo hidro-climatológico de la cuenca Quinuas.

Nombre de la estación	Coordenadas		Elevación (m.s.n.m.)	Variables*	Resolución temporal
	X	Y			
Toreadora	697618,73	9692227,08	3955	T, Prec, HR, R, RN, VV, DV y P	5 minutos
La Virgen	701110,74	9692382,23	3626	T, Prec, HR, R, RN, VV, DV, P y Q**	
Quinuas	705703,88	9688895,48	3298	T, Prec, HR, R, RN, VV, DV, P y Q**	

\*Temperatura (T), Precipitación (Prec), Humedad relativa (HR), Radiación solar (RS), Radiación neta (RN), Velocidad del viento (VV), Dirección del viento (DV), Presión atmosférica (P) y Caudal (Q).

\*\*Resolución horaria para la variable caudal.

Como información topográfica se utilizó el modelo de elevación digital (DEM) de ALOS (Advanced Land Observation Satellite) PALSAR cuya resolución espacial es de 12.5x12.5m. Para la cobertura vegetal y suelo se empleó información proporcionada por IGM y ETAPA-EP.

### 2.2.2. Selección de modelos.

La prioridad de este estudio fue evaluar el desempeño de dos modelos, especialmente en el comportamiento del caudal dentro de la cuenca hidrográfica, tomando en cuenta las peculiaridades de los procesos hidrológicos que acontecen en el páramo. Los modelos a utilizarse en el área de estudio fueron: SWAT+ y WEAP. Un tercer modelo HEC–HMS se utilizó para comparación.

#### 2.2.2.1. SWAT+ (Soil and Water Assessment Tool).

Este modelo integrado en la plataforma QGIS como QSWAT+ requirió 3 insumos principales: un modelo de elevación digital (DEM), capa de uso de suelos (LANDUSE) y capa de propiedades de los suelos (SOIL) (Chawanda et al., 2020). El DEM permitió delimitar el área de drenaje cuyo punto de cierre es la estación hidrometeorológica de Quinuas y los parámetros morfométricos asociados a la unidad hidrográfica. En cuanto a LANDUSE las categorías de vegetación fueron en base a las recomendaciones para cuencas andinas sugeridas por (Jarrin-Perez et al., 2024; Uribe et al., 2013). Los autores recomiendan reclasificar al pajonal como winter pastures (WPAS), plantas de cojín como bluegrass (BLUG), plantaciones de pino como bosques de pino (PINE) y el bosque de polylepis como deciduous forest (FRSD).

**Tabla 3.** Reclasificación del uso de suelo en la cuenca Quinuas para el modelo SWAT+.

COBERTURA ORIGINAL	ID SWAT	CATEGORÍA SWAT	DESCRIPCIÓN
Humedales/Cushion plants	1	BLUG	Bluegrass
Bosque/Polylepis	2	FRSD	Bosque Deciduo
Pasturas	3	PAST	Pastizales
Plantación de Pino	4	PINE	Pino
Lagos y lagunas	5	WATR	Agua
Pajonal/Tussock	6	WPAS	Winter pastures

Con respecto a la capa SOIL, no requirió una reclasificación, pero sí la creación de una base de datos en la que se detallan las principales propiedades hidrofísicas de cada categoría, en este caso Andosoles e Histosoles. Los estudios de Tenelanda Patiño et al. (2018), Guio Blanco et al. (2018) y Mosquera et al. (2020) se utilizaron para determinar los parámetros hidrofísicos de los Andosoles de tres horizontes: Horizonte ándico dividido en uno que representa un denso contenido de raíces ( $A_{hDRZ}$ ) y otro con bajo contenido de raíces ( $A_{hBDRZ}$ ) y Horizonte mineral (C). Para Histosoles se utilizaron valores referenciales del estudio de Jarrin-Perez et al. (2024), que consiste en un Horizonte H altamente orgánico y un Horizonte C mineral. Una vez reclasificadas, las capas LANDUSE y SOIL fueron

rasterizadas y utilizadas para la creación de las Unidades de Respuesta Hidrológica (HRUs) que representan una combinación única de uso de suelo, tipo de suelo y pendiente que para este caso se estableció en rangos de 0-5, 5-10, 10-20, 20-40 y >40. Se obtuvieron 525 HRUs como resultado de la sobreposición de las tres capas raster (DEM, LANDUSE y SOIL), cada HRUs asociada con una combinación específica de propiedades hidrofísicas y uso de suelo.

Los datos climatológicos se ingresaron a través de SWAT+ Editor, donde también se definió la ventana temporal de modelación, así como la escala temporal de los resultados. La representación del ciclo hidrológico en SWAT+ se basa en la ecuación del balance hídrico (Ecuación 1).

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{sep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

Donde:

$SW_t$  es el contenido final de agua del suelo

$SW_0$  es el contenido inicial de agua del suelo en el día  $i$

$R_{day}$  es la cantidad de precipitación el día  $i$

$Q_{surf}$  es la cantidad de escorrentía superficial en el día  $i$

$E_a$  es la cantidad de lluvia en el día  $i$

$w_{sep}$  es la cantidad de agua que ingresa a la zona vadosa en el día  $i$

$Q_{gw}$  es la cantidad de flujo de retorno en el día  $i$

#### 2.2.2.2. HEC–HMS (Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System).

El modelo HEC–HMS constó de 1) Modelo de cuenca que representa la parte física de la cuenca Quinuas con sus subcuencas, red de drenaje y punto de aforo. 2) Modelo meteorológico que enlaza y asigna los datos climáticos contenidos en el componente. 3) Datos de entrada, con las respectivas subcuencas. 4) Especificaciones de control para definir la ventana temporal en la cual el modelo realiza la simulación de caudales (Scharffenberg, 2016).

La estructura del modelo representa los procesos hidrológicos a través de varios reservorios: *Canopy* que simboliza la interceptación de la cobertura vegetal, *Surface* que representa la captación en la superficie del suelo, *Soil profile storage* dividido en 2 reservorios que corresponden al agua en tensión del suelo y el agua disponible, y finalmente *Groundwater layer storage* que también está dividido en 2 que representan las capas subsuperficiales y es de donde se origina el flujo base (Cabrera-Balarezo et al., 2019).

Dentro del modelo de cuenca se seleccionó Soil Moisture Accounting como método del módulo *Loss*, para el proceso de precipitación-escorrentía en la modelación. Clark unit hydrograph como método del módulo *Transform* que permite acumular toda la escorrentía generada en el módulo anterior para transformarla en caudal. Y finalmente Linear reservoir como método del módulo *Baseflow*, el cual representa tanto la recarga del acuífero, así como el aporte del mismo al caudal base de la cuenca.

Para este modelo en específico, se utilizaron los parámetros calibrados reportados en el estudio de Cabrera-Balarezo et al. (2019) ya que este se realizó dentro del área de estudio, en la cuenca alta y que presenta unas características y patrón de distribución espacial respecto de los tipos de coberturas y de suelo similares. Dentro del modelo de cuenca el método se *Soil Moisture Accounting* representa la generación de escorrentía por exceso de saturación del suelo y que conduce a una dominancia del flujo subsuperficial congruente en cuencas montañosas de páramo de acuerdo con (Mosquera et al., 2015). Con respecto a la evapotranspiración, fue calculada a partir del método de Penman-Monteith (Ecuación 2).

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34 u_2)} \quad (2)$$

Donde:

$R_n$  es la radiación neta (MJ.m<sup>2</sup>/día)

$G$  es la densidad de flujo de calor del suelo (MJ.m<sup>2</sup>/día)

$\gamma$  es la constante psicrométrica (kPa/°C)

$T$  es la temperatura media diaria (°C)

$u_2$  es la velocidad del viento medida a 2 m de la superficie del suelo (m/s)

$e_s$  es la presión de saturación de vapor de agua (kPa)

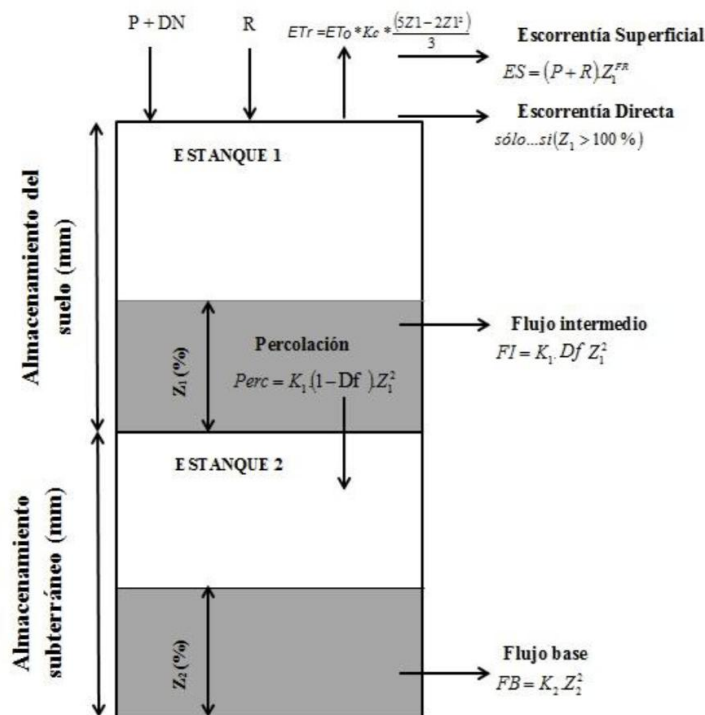
$e_a$  es la presión de vapor real (kPa)

$\Delta$  es la pendiente de la curva de presión de vapor (kPa/°C)

### 2.2.2.3. WEAP (Water Evaluation and Planning System).

El modelo WEAP empezó por la esquematización física de la cuenca, se consideraron 3 subcuencas que están conectadas por un enlace de escorrentía al cauce principal de la cuenca Quinuas que tiene como aforo la estación de Quinuas, punto que está representado en el esquema del modelo como un elemento medidor de caudal. WEAP representa el ciclo hidrológico terrestre mediante una serie de ecuaciones resueltas simultáneamente en un módulo de precipitación escorrentía.

Según el método seleccionado para representar el proceso lluvia-escorrentía, se requieren unos u otros datos de entrada al modelo. En este caso se seleccionó el método de la humedad del suelo. Este método se basa en funciones empíricas que describen el comportamiento de la evapotranspiración, escurrimiento superficial, infiltración, percolación y flujo base y de la unidad hidrográfica (Sieber, 2015). Esto a través de dos estanques verticales, tal como se puede ver en la Figura 2. El primer estanque representa el reservorio superficial, el agua retenida cerca de la superficie, que está disponible para las raíces de las plantas. El segundo estanque representa el reservorio subterráneo y el agua de éste se puede transmitir como flujo base o recarga de agua subterránea (Duque & Zambrano, 2015; Flores-López et al., 2016).



**Figura 2.** Conceptualización del método de humedad del suelo en el módulo hidrológico de WEAP. Tomado de: SEI, (2009)

El cambio de humedad del suelo en el primer estanque está dado por la precipitación efectiva menos la evapotranspiración de referencia, escorrentía superficial, infiltración y percolación. Mientras que el segundo está dado por la percolación menos el flujo base (Molina-Sánchez et al., 2022). Las ecuaciones de balance en los estanques 1 y 2 se presenta a continuación respectivamente:

$$Z_{1max} \frac{dZ_1}{dt} = \left[ Pe(t) - ET_0 K_c \frac{5Z_1 - 2Z_1^2}{3} \right] - Pe(t) 2Z_1^{FR} - Df K_1 Z_1^2 - K_2 Z_2^2 \quad (3)$$

$$Z_{2max} \frac{dZ_2}{dt} = K_2 (1 - Df) Z_1^2 - K_2 Z_2^2 \quad (4)$$

Donde:

$Z_{1max}$  es la capacidad del estanque superior (mm)

$Z$  es porcentaje de agua en el estanque (%)

$Pe$  es la precipitación y el derretimiento de nieve (mm)

$ET_0$  es la evapotranspiración de referencia (mm)

$K_c$  es el coeficiente del cultivo

$FR$  es el factor de resistencia

$Df$  es la dirección preferencial del flujo

$K$  es la conductividad hidráulica.

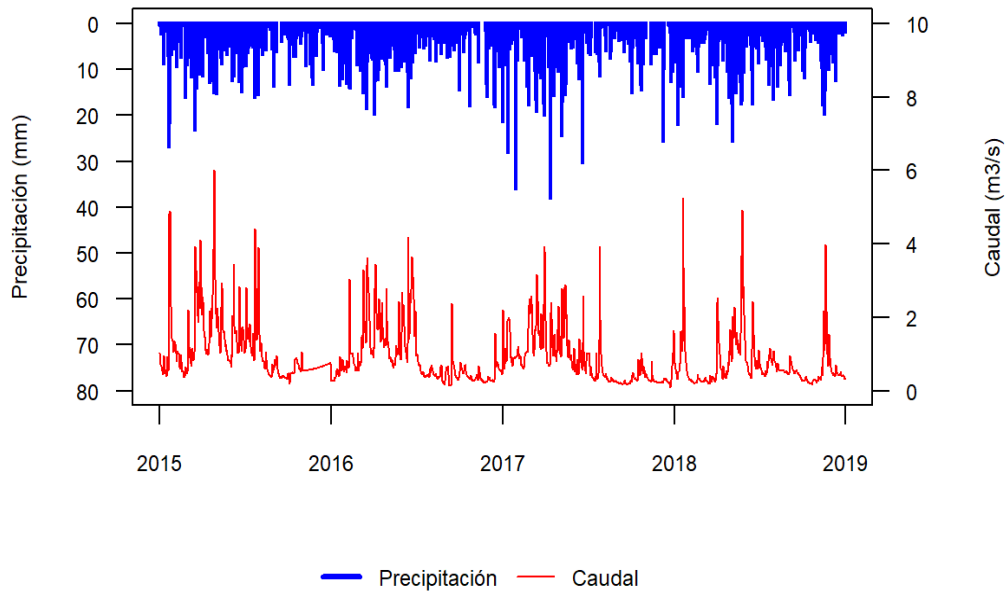
$Z_{2max}$  es la capacidad del estanque inferior (mm).

Una vez desarrollado el esquema conceptual de la cuenca, se ingresaron en la pestaña de uso de suelo los parámetros hidrológicos descritos previamente en las ecuaciones para cada subcuenca y en función de cada cobertura vegetal. Mientras que los datos climatológicos se ingresaron en la pestaña clima, de igual manera para cada subcuenca. Dado que en la cuenca no existen aportaciones de nieve, ni tampoco se consideró el riego, el estudio se basa en un análisis de lluvia-escorrentía.

### 2.2.3. Calibración y validación de los modelos.

La fase de calibración es fundamental dentro del proceso de modelación hidrológica, ya que permite ajustar los parámetros del modelo para que el hidrograma resultado de la simulación se ajuste lo máximo posible a los datos observados en campo. Una vez se han identificado dichos parámetros, se continúa con la fase de validación del modelo. En esta fase de validación se reproduce toda la estructura y los parámetros identificados en el proceso de calibración, pero esta vez utilizando un periodo de datos diferente al empleado previamente.

En este caso para todos los modelos utilizados se definió un período de modelación desde 01/01/2015 hasta 31/12/2018 (Figura 3). El mismo se dividió en un año de warm-up (2015), dos años de calibración (2016-2017) y un año de validación (2018).



**Figura 3.** Precipitación y caudal diario registrados en la estación Quinquas.

Existen varias maneras de evaluar el desempeño de los modelos, tanto métodos estadísticos como gráficos. Las técnicas gráficas permiten inspeccionar de manera visual el ajuste entre el hidrograma simulado y observado. Esto sirve como referencia en los procesos de calibración y validación, no obstante al ser de carácter cualitativo son una evaluación subjetiva (Ahmed, 2010). Por lo tanto, los métodos estadísticos de carácter cuantitativo proporcionan una mayor robustez a la evaluación de los resultados. Estos métodos se basan en un análisis matemático de la proximidad del ajuste entre variables simuladas y observadas, y se denominan como criterios de eficiencia (Waseem et al., 2017). Se dividen principalmente en tres categorías: índices de desempeño, medidas de error y firmas hidrológicas (Althoff & Rodrigues, 2021; Moriasi et al., 2007).

### 2.2.3.1. Coeficiente de determinación ( $R^2$ ).

Indica la proporción de la varianza en los datos observados que es explicada por los datos simulados del modelo (Waseem et al., 2017). Mide qué tan bien la línea de regresión entre los valores observados y simulados se aproximan. Los valores son adimensionales y varían entre 0 y 1, en donde 0 significa que el modelo no es capaz de reproducir la varianza de los datos observados reflejando que no existe relación lineal alguna entre las variables, y 1 indica representa una correlación lineal perfecta (Althoff & Rodrigues, 2021). Se calcula mediante Ecuación 5.

$$R^2 = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - \underline{Q}^{obs})(Q_i^{sim} - \underline{Q}^{sim})}{\sqrt{[\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - \underline{Q}^{obs})^2][\sum_{i=1}^n (Q_i^{sim} - \underline{Q}^{sim})^2]}} \right\} \quad (5)$$

Donde:

$n$  número total de observaciones.

$Q_i^{obs}$  es el caudal observado en el tiempo  $i$ .

$\underline{Q}^{obs}$  es el caudal medio observado.

$Q_i^{sim}$  es el caudal simulado en el tiempo  $i$ .

$\underline{Q}^{sim}$  es el caudal medio simulado.

### 2.2.3.2. Porcentaje de sesgo (PBIAS).

Estima la tendencia promedio de los datos simulados a ser mayores o menores en comparación a los observados (Waseem et al., 2017). Puede adoptar valores entre 0% y  $\pm\infty\%$ , donde 0% indica que no existe desviación y una precisa simulación del modelo (Althoff & Rodrigues, 2021). Los valores positivos muestran una sobreestimación y los negativos señalan una subestimación (Moriassi et al., 2007). Para su cálculo se utiliza la Ecuación 6.

$$PBIAS = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_i^{sim})}{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs})} \right\} \times 100 \quad (6)$$

Donde:

$n$  es el número total de observaciones.

$Q_i^{obs}$  es el caudal observado en el tiempo  $i$ .

$Q_i^{sim}$  es el caudal simulado en el tiempo  $i$ .

### 2.2.3.3. Coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE).

Se considera una estadística normalizada que indica la magnitud relativa de la varianza del error residual en comparación con la varianza de los datos medidos (Moriassi et al., 2007). El rango de valores adimensionales va entre  $-\infty$  y 1, en donde

valores menores a 0 indican que la media de los datos observados es mejor predictor que el modelo y valores entre 0 y 1 son considerados como un nivel aceptable de desempeño y 1 indica un ajuste perfecto del modelo (Althoff & Rodrigues, 2021). Se determina en base la Ecuación 7.

$$NSE = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - \underline{Q}^{obs})^2} \right] \quad (7)$$

Donde:

$n$  es el número total de observaciones.

$Q_i^{obs}$  es el caudal observado en el tiempo  $i$ .

$\underline{Q}^{obs}$  es el caudal medio observado.

$Q_i^{sim}$  es el caudal simulado en el tiempo  $i$ .

#### 2.2.3.4. Coeficiente de eficiencia de Kling-Gupta (KGE).

Es una métrica de eficiencia compuesta, fue diseñada para superar algunas limitaciones del NSE al descomponer el error cuadrático medio en tres componentes distintos: correlación, sesgo y variabilidad. Los valores pueden variar desde  $-\infty$  hasta 1. Un valor igual a 1 indica ajuste perfecto, cuanto más negativos, peor desempeño. Estudios recientes muestran que valores mayores a -0.41 indican un desempeño mejor que usar la media de los datos observados como predictor (Knoben et al., 2019).

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2} \quad (8)$$

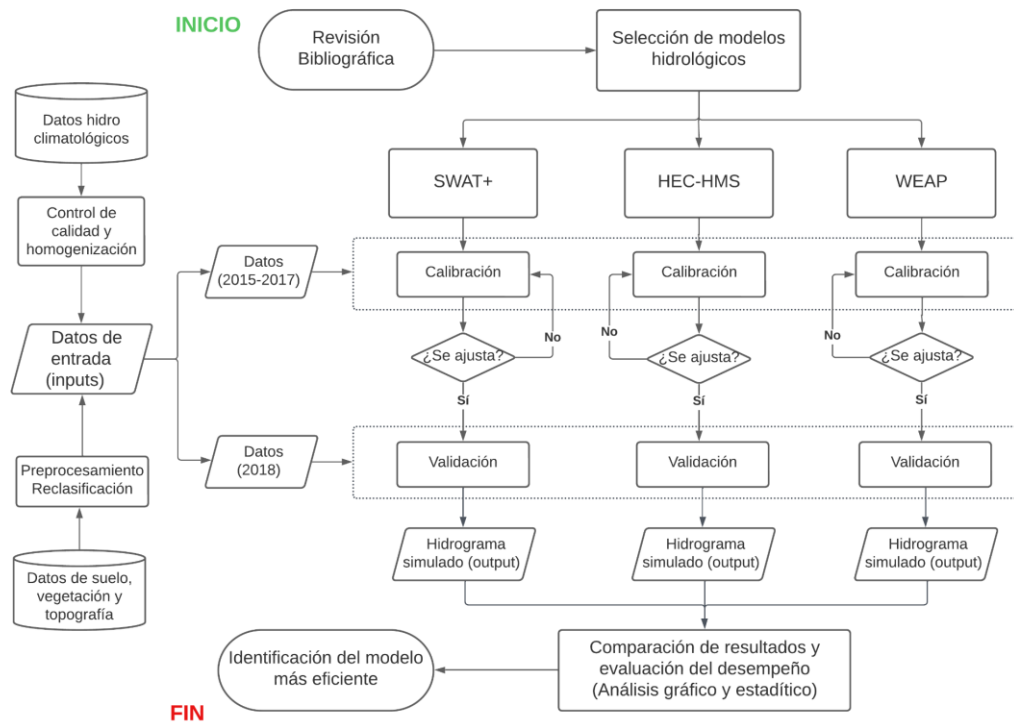
Donde:

$r$  es el coeficiente de correlación entre datos observados  $Q_i^{obs}$  y simulados  $Q_i^{sim}$ .

$\alpha$  es el término de variabilidad, representado por la relación entre la desviación estándar observada  $Q_i^{obs}$  y simulada  $Q_i^{sim}$ .

$\beta$  es el término de sesgo, dado por la relación entre la media observada  $\underline{Q}^{obs}$  y la media simulada  $\underline{Q}^{sim}$ .

A manera de resumen, en la Figura 4 se presenta el flujo de trabajo llevado a cabo para el desarrollo de este estudio. Iniciando por la selección de los modelos y terminando en las pruebas de eficiencia que permitieron identificar el modelo con el mejor desempeño para la cuenca Quinuas.



**Figura 4.** Flujograma del proceso de modelación hidrológica en la cuenca Quinuas.

### 3. RESULTADOS.

#### 3.1. Calibración de parámetros.

Los parámetros calibrados para los modelos SWAT+ y WEAP se muestran en las tablas 4 y 5 respectivamente. En ambos casos se utilizó como referencia información secundaria de investigaciones dentro del área de estudio y en otros escenarios análogos (Flores-López et al., 2016; Tenelanda Patiño et al., 2018; Guio Blanco et al., 2018; Mosquera et al., 2020; Jarrin-Perez et al., 2024). Permitiendo así establecer para cada parámetro límites razonables y coherentes con el área de estudio para cada modelo.

**Tabla 4.** Parámetros calibrados del modelo SWAT+. Clasificados por tipo de suelo y horizonte.

Tipo de suelo	Andosol			Histosol		
Horizonte del suelo	Ah <sub>DRZ</sub>	Ah <sub>BDRZ</sub>	C	H	A	C
<b>Parámetros*</b>						
SOL_ZMX (mm)	120	120	120	120	120	120
SOL_Z (mm)	100	520	770	330	750	1150
SOL_BD (g/cm <sup>3</sup> )	0.37	0.49	1.37	0.11	0.15	0.17
SOL_AWC (mm <sup>3</sup> /mm <sup>3</sup> )	0.26	0.14	0.08	0.71	0.71	0.60
SOL_KSAT (mm/h)	18.80	4.80	2.28	4.90	5	2.10
SOL_CBN (%)	33.8	19.50	2.3	28	28	32
CLAY (%)	31	31	7	19	21	24
SILT (%)	35	35	22	20	20	32
SAND (%)	34	34	71	61	59	44
ROCK (%)	0	0	0	0	0	0
SOL_ALB	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
USLE_K	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16

\*Profundidad máxima de raíces (SOL\_ZMX), Profundidad de la capa de suelo (SOL\_Z), Densidad húmeda aparente (SOL\_BD), Capacidad de agua disponible de la capa de suelo (SOL\_AWC), Conductividad hidráulica saturada (SOL\_KSAT), Contenido de carbono orgánico (CBN), Contenido de arcilla (CLAY), Contenido de limo (SILT), Contenido de arena (SAND), Contenido de fragmentos de roca (ROCK), Albedo del suelo húmedo (SOL\_ALB) y Factor de erodabilidad del suelo (USELE\_K).

**Tabla 5.** Parámetros calibrados del modelo WEAP. Clasificados por tipo de cobertura.

Tipo de cobertura	Humedales	Bosque	Pastizales	Pino	Pajonal
<b>Parámetro*</b>					
Kc	1.20	1.05	1	1	1.15
FR	2	2	2	2	2.50
Z1max (mm)	180	150	55	95	70
Z2max (mm)	80	80	80	80	50
K1 (mm/día)	117.60	465.60	200	472.32	250
K2 (mm/día)	200	200	200	200	200
Df	0.90	0.75	0.60	0.75	0.25

\*Coeficiente del cultivo ( $K_c$ ), Factor de resistencia a la escorrentía ( $FR$ ), Capacidad de agua del suelo ( $Z_{1max}$ ), Capacidad de agua profunda ( $Z_{2max}$ ), Conductividad de la zona de raíces ( $K_1$ ), Conductividad de la zona profunda ( $K_2$ ), Dirección preferencial de flujo ( $Df$ ).

Con respecto al modelo HEC–HMS se consideraron los parámetros calibrados en el estudio de Cabrera-Balarezo et al. (2019) indicados en la Tabla 6.

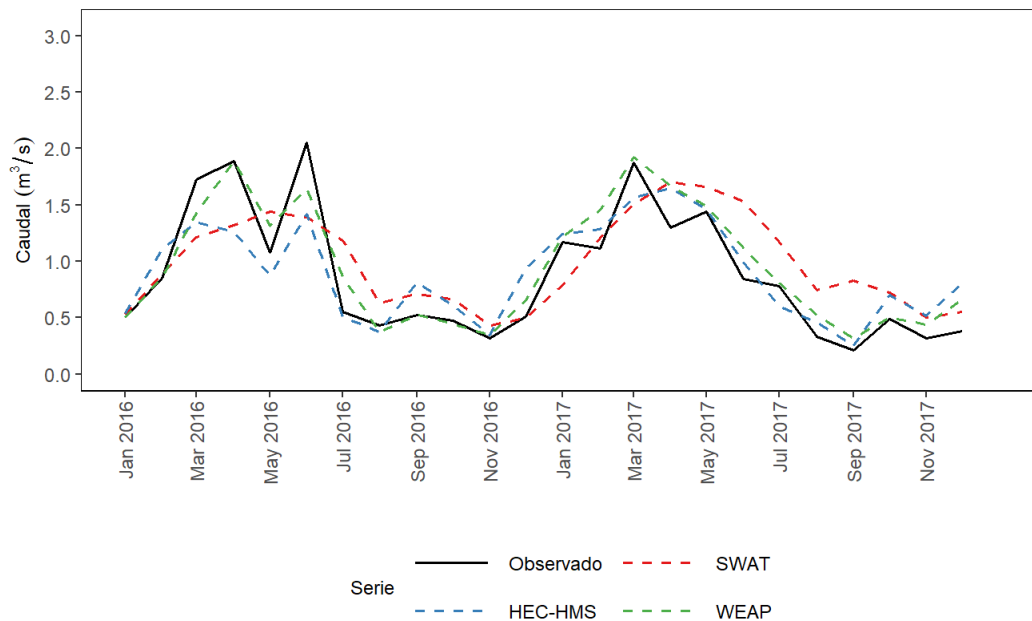
**Tabla 6.** Parámetros calibrados del modelo HEC-HMS.

<b>Módulo</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
<b>Canopy</b>	Max storage (mm)	0.06
<b>Surface</b>	Max storage (mm)	0.85
<b>Loss</b>	Max infiltration (mm/hr)	0.92
	Impervious (%)	0
	Soil storage (mm)	0.99
	Tension storage (mm)	0.78
	Soil percolation (mm/hr)	15
	GW 1 storage (m)	932
	GW 1 percolation (mm/hr)	0.34
	GW 1 percolation (mm/hr)	1001
<b>Transform</b>	Time of concentration (hr)	80
	Storage Coefficient (hr)	117
<b>Baseflow</b>	GW 1 Storage Coefficient (mm/hr)	1.33

Fuente: (Cabrera-Balarezo et al., 2019).

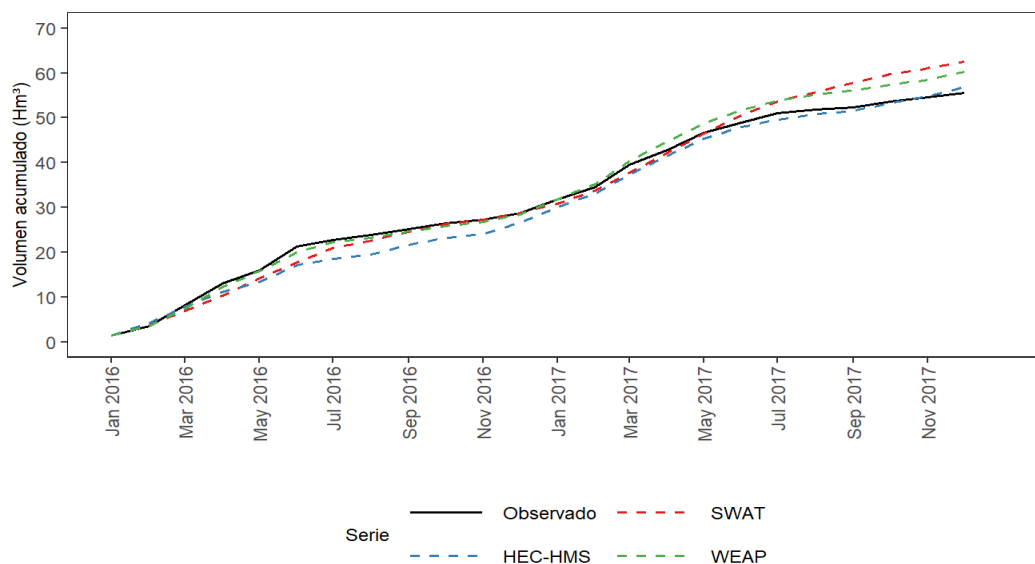
### 3.2. Hidrograma de la fase de Calibración.

Una vez construidos los modelos y calibrados sus parámetros se realizó el proceso de modelación a una escala mensual. La primera fase de calibración del modelo comprendió desde enero del 2015 hasta diciembre del 2017, excluyendo de los resultados al año 2015, ya que esos datos fueron utilizados para el warm-up de cada modelo. Los hidrogramas simulados por cada modelo a partir de los parámetros hidrológicos e información temática del área de estudio se pueden visualizar en la Figura 5. La línea negra representa la serie temporal a escala mensual de los caudales observados en el punto de aforo de la estación Quinuas. Mientras que los caudales simulados por los modelos están representados por líneas discontinuas de colores.



**Figura 5.** Hidrogramas simulados en la cuenca Quinuas para el periodo de calibración.

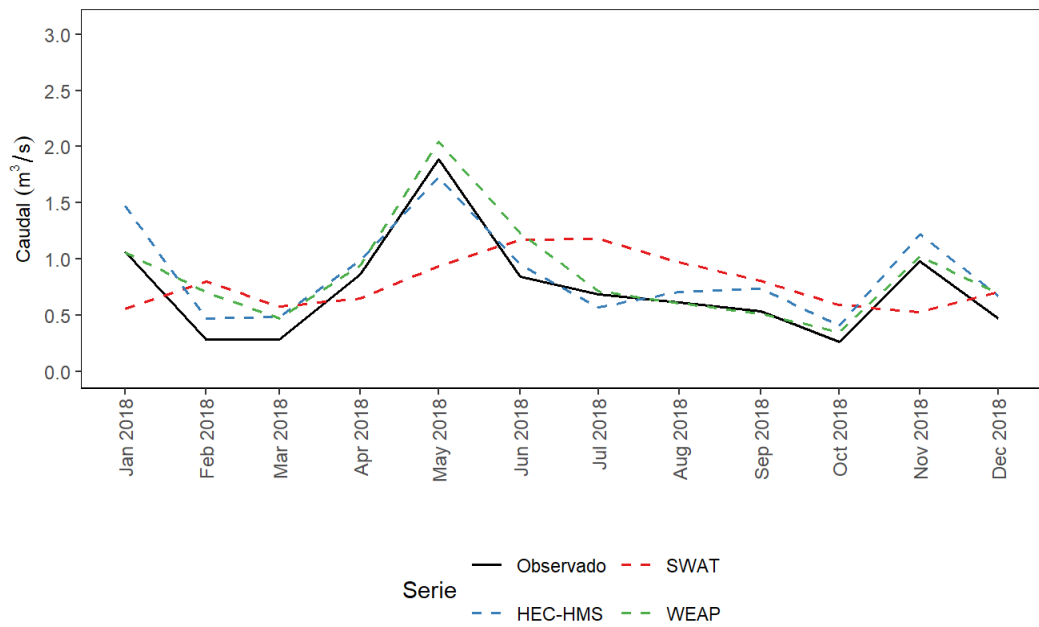
En la Figura 6 se puede observar el caudal acumulado para el periodo de calibración, tanto el observado en línea negra continua, como el simulado por los modelos en líneas entrecortadas de colores.



**Figura 6.** Caudal acumulado simulado y observado en la cuenca Quinuas para calibración.

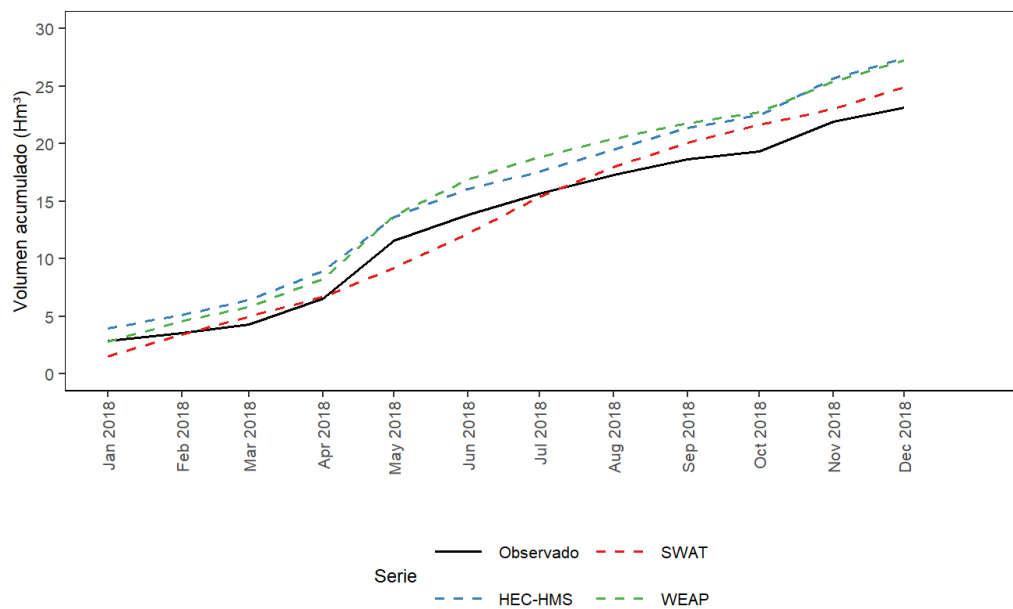
### 3.3. Hidrograma de la fase de Validación.

Durante la validación, se utilizó cada uno de los modelos con los parámetros ya preestablecidos en calibración, pero con información hidroclimática correspondiente al año 2018. En esta etapa los modelos calibrados previamente permitieron obtener como resultado los hidrogramas para el periodo de validación que se visualizan en la Figura 7.



**Figura 7.** Hidrogramas simulados en la cuenca Quinuas para el periodo de validación.

Los caudales acumulados para el periodo de validación se pueden visualizar en la Figura 8, tanto los observados en línea negra continua, como el simulado por los modelos en líneas entrecortadas de colores.



**Figura 8.** Caudal acumulado simulado y observado en la cuenca Quinuas para validación.

### 3.4. Métricas de desempeño de los modelos.

De los resultados obtenidos, se realizó el análisis estadístico de los hidrogramas simulados para ver que tan bien se ajustan a los datos observados en campo. En la Tabla 7 se listan los valores de los índices de desempeño obtenidos para cada modelo, tanto para el periodo de calibración como para el de validación.

**Tabla 7.** Índices de eficiencia de los modelos utilizados.

Estadísticos*	Calibración			Validación		
	SWAT+	HEC-HMS	WEAP	SWAT+	HEC-HMS	WEAP
<b>R<sup>2</sup></b>	0.57	0.76	<b>0.90</b>	0.03	0.89	<b>0.90</b>
<b>PBIAS (%)</b>	12.60	<b>2.40</b>	8.60	8.10	18.80	<b>18.10</b>
<b>NSE</b>	0.53	0.74	<b>0.88</b>	-0.09	0.79	<b>0.80</b>
<b>KGE</b>	0.61	0.71	<b>0.88</b>	0.04	0.79	<b>0.81</b>

\*Coeficiente de determinación ( $R^2$ ), Porcentaje del sesgo (PBIAS), Coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE), Coeficiente de eficiencia de Kling-Gupta (KGE). Se resaltan los mejores para cada estadístico durante calibración y validación.

## 4. DISCUSIÓN.

El objetivo de este estudio fue evaluar el desempeño de dos modelos hidrológicos, para identificar cuál es el que mejor simula los caudales de la cuenca Quinuas. Dadas las características de la cuenca y entendiendo los principales procesos hidrológicos, se seleccionaron según su estructura los modelos SWAT+ y WEAP, más un tercer modelo HEC-HMS utilizado para una comparación.

Para SWAT+ se utilizó el método de generación de escorrentía basados en el principio de exceso de infiltración, en el que la escorrentía se produce cuando la intensidad de la precipitación sobre una superficie de suelo es mayor que la capacidad de infiltración de dicho suelo (Horton, 1933). Mientras que HEC-HMS y WEAP se fundamentaron en la generación de escorrentía por exceso de saturación, se produce cuando el suelo alcanza su capacidad máxima de almacenamiento de agua y se satura completamente. Este proceso no depende de la intensidad de la lluvia, sino del estado de humedad previo del suelo y de su capacidad de almacenamiento (Vadillo, 1983). Según Jarrin-Perez et al. (2024) este último principio representa mejor el proceso de generación de escorrentía en cuencas de páramo, ya que en comparación con el de exceso de infiltración el limitante no es la tasa de infiltración del suelo sino su capacidad de almacenamiento que en caso del páramo es considerable (Mosquera et al., 2015).

Para la calibración y validación de estos modelos, se utilizaron datos hidrometeorológicos diarios, que permitieron generar resultados a escala mensual. Esta escala temporal de modelación es apropiada para estudios enfocados en la planificación y gestión de recursos hídricos a largo plazo. Su uso permitirá identificar patrones estacionales de escasez y abundancia, y evaluar los posibles impactos del cambio climático sobre los recursos hídricos en la cuenca Quinuas.

#### **4.1. Análisis gráfico.**

Los resultados de las modelaciones hidrológicas en la cuenca Quinuas revelan un desempeño variable entre los modelos SWAT+, HEC-HMS y WEAP, tanto en la fase de calibración como en la de validación. Si bien los tres modelos lograron replicar la estacionalidad y las tendencias generales del hidrograma mensual observado, el análisis detallado de los hidrogramas y los indicadores de desempeño estadístico muestran diferencias en su precisión y fiabilidad. Mediante el análisis gráfico de los hidrogramas (Figura 5, 6, 7 y 8) podemos deducir que los modelos que mejor reprodujeron los patrones de los caudales observados en la estación Quinuas fueron el modelo WEAP y HEC-HMS, que muestran tener la fortaleza en simular los picos de caudal en tiempo y magnitud en los períodos húmedos e incluso la recesión en periodos de estiaje (Figura 5 y 7). A diferencia del modelo SWAT+ que si bien simula el volumen acumulado de los caudales adecuadamente, no reproduce la estacionalidad del caudal en los periodos de calibración y validación. Presenta inconsistencias especialmente en los picos de caudal durante los periodos húmedos, donde subestiman la respuesta de la cuenca, y en los valles de estiaje, donde tienden a sobreestimar el flujo base (Figura 5 y 7).

#### **4.2. Análisis estadístico.**

Con respecto al análisis estadístico, los índices de eficiencia (Tabla 7) señalan que el modelo cuyo caudal simulado presentó mejor ajuste con respecto a los datos observados fue WEAP, con un valor  $0.80 > NSE < 0.88$  tanto para calibración como para validación. No obstante, presenta una tendencia a sobreestimar los caudales como lo indica el porcentaje de sesgo  $PBIAS = 18.10\%$  en el periodo de validación. Algo similar ocurre con el modelo HEC-HMS, que presenta un buen ajuste en los caudales simulados  $0.74 > NSE < 0.79$ , pero de igual manera sobreestima en comparación a lo observado en el periodo de validación  $PBIAS = 18.80\%$ . Según Moriasi et al. (2007), estos valores en los índices estadísticos indican que ambos modelos han tenido un muy buen desempeño simulando los caudales de la cuenca Quinuas, porque presentan un buen ajuste en tiempo y magnitud con respecto a los caudales observados en las estaciones.

En cuanto al modelo SWAT+, presenta métricas de desempeño dentro del rango de lo aceptable, con valores NSE y KGE superiores a 0 y valores bajos del porcentaje de sesgo

para el periodo de calibración (Tabla 7). Sin embargo, para el periodo de validación presenta métricas NSE y KGE deficientes cercanas al 0, incluso con valores negativos (Tabla 7). Esto representa un gran inconveniente, ya que los modelos con un bajo desempeño pueden sesgar la interpretación y dificultar la toma de decisiones informada en la planificación. En un contexto en el que se requiere utilizarlos para la recreación de escenarios, la falta de exactitud en la reproducción de la estacionalidad de la variable caudal, o volúmenes de agua, puede tener serias implicaciones en la planificación del recurso hídrico. Esto debido a que solo caudales simulados con buen ajuste permitirán comprender la dinámica en la disponibilidad del recurso hídrico a través del tiempo.

Si comparamos los resultados obtenidos para SWAT+ con el estudio de Jarrin-Perez et al. (2024) en otra cuenca de páramo ubicada al sur del Ecuador, corroboramos que existe una tendencia a la sobrestimación de los caudales, especialmente con el enfoque de generación de escorrentía por exceso de infiltración, tal y como ocurre en este estudio. Los autores lograron validar el modelo SWAT+ con un  $NSE=0.80$  que indica un buen ajuste entre hidrograma observado y simulado, a diferencia de este estudio en el que se obtuvieron valores  $-0.09 > NSE < 0.53$  indicando que el ajuste los hidrogramas simulados y observados no es satisfactorio. En una segunda instancia se recomienda utilizar información primaria de la cuenca Quinuas para establecer los parámetros hidrológicos de la categoría de suelos de orden Histosol (5.66% de la superficie de la cuenca) y uso de suelo. Ya que en este caso se establecieron a partir de información secundaria de estudios realizados en escenarios análogos.

De igual manera Cabrera-Balarezo et al. (2019) logró validar el modelo HEC-HMS con valores  $NSE > 0.79$ , este resultado es comparable con lo obtenido en este proceso de modelación en el que se obtuvo valores  $NSE=0.79$  en la fase de validación de la cuenca Quinuas. Finalmente, con respecto a WEAP, estudios como el de Duque & Zambrano (2015) y Molina-Sánchez et al. (2022) registran valores aceptables  $NSE > 0.55$  que les permitieron validar el modelo. O el caso de estudio de Ullauri (2016) desarrollado en al sur de los Andes ecuatorianos en una cuenca compuesta en su mayoría por área de páramo, la autora logró validarlo con un valor  $NSE=0.80$ . Sin embargo, han existido casos como el de Flores-López et al. (2016), en el que el desempeño del modelo en una cuenca de páramo obtuvo valores  $NSE=0.25$ , limitado por la disponibilidad de datos. En este estudio para la cuenca Quinuas el modelo WEAP obtuvo un valor  $NSE=0.88$  para calibración y logró validarse con un valor  $NSE=0.80$ .

A partir de este análisis gráfico y estadístico se deduce que los modelos WEAP y HEC-HMS son apropiados para la simulación de caudales de la cuenca Quinuas. Los resultados producidos por los dos modelos son mejores que utilizar la media de los datos observados como predictor. La disminución de la eficiencia de un modelo en la etapa de validación suele indicar un sobreajuste. El mismo que es causado cuando el modelo se ajusta tan específicamente a los datos del periodo de calibración en este caso entre 2015 y 2017 que

integra el ruido y las peculiaridades de ese periodo. Esto hace que pierda eficiencia al utilizar un nuevo periodo de datos en el modelo para la validación, en este caso 2018. Por lo tanto, para nuevos estudios se recomienda utilizar un periodo de calibración más largo que permita considerar una mayor variabilidad climática que le otorgue generalidad al modelo frente a nuevos sets de datos climáticos. Tal y como en los casos de Duque & Zambrano, (2015) y Ullauri, (2016) que utilizaron series de 25 y 20 años de datos respectivamente divididos en calibración y validación para la modelación con WEAP a escala mensual.

Un hallazgo central de este estudio es la tendencia generalizada de los tres modelos a sobrestimar los caudales observados. Esta sobrestimación es evidente visualmente en las gráficas de hidrogramas y se confirma cuantitativamente con los valores consistentemente positivos de PBIAS en ambas fases. Las gráficas de volumen acumulado (Figuras 6 y 8) refuerzan esta conclusión, mostrando una brecha creciente entre el volumen simulado y el observado a lo largo del tiempo analizado.

La sobrestimación de los caudales en los tres modelos denota una causa sistémica, cuya causa probable está dada por que los inputs (precipitación) se están sobreestimando, porque los outputs (evapotranspiración) se están subestimando, o porque la capacidad real de almacenamiento del suelo está siendo subestimada. En el caso de la precipitación, puede que los datos de las estaciones meteorológicas no sean representativos y no permitan describir la distribución real de la lluvia dentro de la cuenca. Mientras que, en el caso de la evapotranspiración, es posible que los coeficientes de cultivo calibrados resulten demasiado bajos, haciendo que se pierda menos agua del sistema. Y con respecto a la capacidad de almacenamiento del suelo, al definirse un menor valor se traduce en que exista un menor volumen de agua contenida en los distintos horizontes del suelo y un mayor flujo hacia los cauces. Esto explicaría que exista un excedente que se transforma en escorrentía, y por lo tanto se traduzca en una sobreestimación de los caudales en la cuenca Quinuas. La recomendación es identificar cuál o cuáles de estos “reservorios/almacenamientos” necesitan ser trabajados con mayor en la calibración de sus parámetros para lograr mejores simulaciones de caudal.

#### **4.3. Estructura de los modelos.**

La estructura conceptual de los modelos jugó un rol determinante al momento de simular los caudales de la cuenca Quinuas, tal y como se puede observar en los hidrogramas resultantes (Figuras 5 y 7). Los modelos WEAP y HEC-HMS permiten incorporar explícitamente una conceptualización hidrológica basada en múltiples almacenamientos verticales y mecanismos de generación de escorrentía por saturación. Lo cual es totalmente coherente con el funcionamiento de los ecosistemas de páramo caracterizados por suelos orgánicos con alta capacidad de retención y aporte del flujo subsuperficial (Mosquera et al., 2015). Por el contrario, la estructura de SWAT+, basada en el método Curve Number que representa la generación de escorrentía por exceso de infiltración y un esquema de enrutamiento que

tiende a suavizar picos. Por lo tanto no reproduce adecuadamente los procesos hidrológicos dominantes del páramo (Jarrin-Perez et al., 2024), lo que explica el bajo desempeño obtenido, especialmente en validación (Tabla 7).

La estructura del modelo SWAT+ tiene una conceptualización menos coherente, pues en la fase terrestre no representa el proceso generación de escorrentía por exceso de saturación que comúnmente ocurre en el páramo. El software lo realiza a través del método de *Número de Curva*, el cual se fundamenta en la generación de escorrentía por exceso de infiltración. Esto a partir de datos como características del suelo y coberturas de uso de suelo de la cuenca. En la fase de enrutamiento se tiende a suavizar y retrasar la respuesta hidrológica, introduciendo una atenuación adicional que redujo aún más la capacidad del modelo para reproducir adecuadamente caudales pico. Esto se reflejó en los bajos valores de NSE y KGE, así como en errores sistemáticos en el volumen simulado, particularmente durante la validación.

HEC-HMS está estructurado por módulos que admiten elegir el método para cada componente, lo que permitió conceptualizar de mejor manera el modelo hidrológico. El método *Soil Moisture Accounting* que representa almacenamientos en varios reservorios, captura bien la escorrentía por saturación y la dependencia de la humedad antecedente. Es muy coherente con cuencas de suelos orgánicos donde la saturación controlara la producción de escorrentía. El método *Clark Unit Hydrograph*, permite modelar el retardo y la difusión del pico de la respuesta hídrica de la cuenca. El método *Linear Reservoir* modela la recarga y descarga del acuífero con un coeficiente lineal. Además captura el aporte del flujo base proveniente del almacenamiento subsuperficial. En páramos los aportes de flujo base son sostenidos y dominantes, incluso en periodos de estiaje. Esta combinación (*Soil Moisture Accounting*, *Clark Unit Hydrograph* y *Linear Reservoir*) simula adecuadamente tanto picos por eventos de saturación como el mantenimiento del caudal de base, capturando así los procesos físicos dominantes. Esto explica por qué HEC-HMS obtuvo indicadores robustos en tu estudio (Tabla 7).

Con respecto a WEAP, para la representación del proceso de precipitación escorrentía su estructura utiliza el *método de Humedad del Suelo* mediante dos depósitos verticales por unidad de uso de suelo categorizada. Este esquema de dos tanques verticales (Figura 2) es muy eficaz para representar explícitamente la capacidad de agua en la zona de raíces, la escorrentía, el flujo lateral, la percolación y el aporte desde zona profunda al flujo base. Los parámetros calibrados Factor de resistencia a la escorrentía, Dirección del flujo y Conductividad hidráulica saturada que controlan la respuesta de la cuenca permiten reproducir tanto picos cuando Z1 se satura, como recesiones suaves por aporte del flujo base Z2. WEAP coloca explícitamente la capacidad de almacenamiento de agua y la dirección preferencial de flujo como controles centrales; factores importantes en la hidrología de suelos ándicos con altos contenido de materia orgánica. Por lo tanto, WEAP fue el modelo que mejor reprodujo la dinámica mensual del caudal en la cuenca Quinuas.

#### 4.4. Sensibilidad de parámetros.

Para el modelo con mejor desempeño WEAP, el análisis de sensibilidad realizado mediante el algoritmo PEST (Parameter ESTimation) permitió identificar la jerarquía de influencia de los parámetros hidrológicos sobre la respuesta en la cuenca Quinuas. Basado en las sensibilidades compuestas calculadas al finalizar el proceso de optimización, se observó una clara segmentación en la importancia de los parámetros, de los cuales dos destacan. El primero, la *Dirección de Flujo (Df)*, presentó la sensibilidad compuesta más alta del conjunto ( $1.99E-02$ ), indicando que ejerce la influencia dominante sobre la simulación de caudales. El segundo, el *Factor de Resistencia a la escorrentía (FR)* mostró una sensibilidad intermedia ( $5.17E-03$ ) con un orden de magnitud menor. Y con un menor grado de sensibilidad le siguen la *Capacidad de Almacenamiento (Z)* y la *Conductividad Hidráulica (K)* para este caso en específico.

Con respecto al modelo HEC-HMS, si bien no se desarrolló un análisis de sensibilidad, en la literatura encontramos valores óptimos para los parámetros requeridos por el modelo, considerando que son para esta cuenca en específico. Cabrera-Balarezo et al., (2019) determinó que el 60% del flujo total corresponde al flujo subsuperficial o flujo base, por lo que prestar atención a los parámetros asociados a estos módulos (*Loss y Baseflow*) de la estructura es un buen enfoque.

Finalmente, para SWAT+, en el estudio de Jarrin-Perez et al., (2024) se encontró que el parámetro más sensible para en la simulación de caudales es la *Longitud de pendiente para flujo lateral subterráneo (SLSOIL)*, seguido por el *Número de curva (CN2)* correspondientes a las coberturas de *WPAS y PINE*. De igual manera Abbaspour et al., (2015) menciona que modificar los parámetros CN2 (aumentar) y SOL\_AWC (disminuir) tienen un gran impacto sobre los picos en el hidrograma.

## 5. CONCLUSIÓN.

De los modelos hidrológicos evaluados para la cuenca en estudio, WEAP demostró un desempeño fiable, tanto en el periodo de calibración ( $NSE=0.88$  y  $KGE=0.88$ ) como en el de validación ( $NSE=0.80$ ,  $KGE=0.81$ ). Su capacidad para reproducir la estacionalidad y la magnitud de los caudales mensuales lo posiciona de entre los modelos revisados, como el más adecuado para la simulación de caudal. Y por lo tanto factible para emplearlo en la planificación y gestión del recurso hídrico en esta cuenca de páramo.

El modelo HEC-HMS presentó un rendimiento moderado en las fases de calibración y validación ( $NSE>0.74$ ), confirmándose como una alternativa fiable. Por el contrario, el modelo SWAT+, aunque logró un desempeño moderado en la calibración ( $NSE=0.53$ ), su capacidad predictiva fue limitada durante la validación ( $NSE=-0.09$ ), lo que reduce su fiabilidad para la simulación de caudales en la cuenca de páramo bajo estudio. Además se identificó una

tendencia general a sobreestimar el volumen de agua en todos los modelos, confirmada por los valores positivos del PBIAS y las gráficas de caudal acumulado. Este hallazgo resalta la necesidad de un ajuste minucioso en base a información primaria de los parámetros que controlan los inputs y outputs del modelo para evitar predicciones con sesgos en las modelaciones.

El estudio confirma que la estructura del modelo hidrológico es un factor determinante en el proceso de simulación de caudales de una cuenca de páramo, lo que se corrobora en los hidrogramas obtenidos en este proceso de modelación. La estructura de los modelos basados en el principio de exceso de saturación (WEAP Y HEC-HMS) presentaron resultados con un mejor ajuste a los datos observados, ya que son conceptualmente más adecuados para representar la hidrología del páramo a diferencia de SWAT+.

El desempeño superior de WEAP evidencia que su estructura (integra menos parámetros) permite representar con mayor coherencia los procesos hidrológicos predominantes en una cuenca de páramo. Pues sus resultados lograron el mejor ajuste en la cuenca Quinuas en comparación con los otros modelos revisados. Por lo tanto, se recomienda la utilización del modelo WEAP para la simulación de caudales a escala mensual con un enfoque de planificación del recurso hídrico.

## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- Abbaspour, K. C., Rouholahnejad, E., Vaghefi, S., Srinivasan, R., Yang, H., & Kløve, B. (2015). A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. *Journal of Hydrology*, 524, 733-752. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.027>
- Ahmed, F. (2010). Numerical modeling of the Rideau Valley Watershed. *Natural Hazards*, 55(1), 63-84. <https://doi.org/10.1007/s11069-010-9588-4>
- Althoff, D., & Rodrigues, L. N. (2021). Goodness-of-fit criteria for hydrological models: Model calibration and performance assessment. *Journal of Hydrology*, 600, 126674. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126674>
- Bendix, J., Rollenbeck, R., & Palacios, W. E. (2004). Cloud detection in the Tropics—a suitable tool for climate-ecological studies in the high mountains of Ecuador. *International Journal of Remote Sensing*, 25(21), 4521-4540. <https://doi.org/10.1080/01431160410001709967>
- Berrones, G., Crespo, P., Ochoa-Sánchez, A., Wilcox, B. P., & Céleri, R. (2022). Importance of Fog and Cloud Water Contributions to Soil Moisture in the Andean Páramo. *Hydrology*, 9(4), Article 4. <https://doi.org/10.3390/hydrology9040054>

- 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>
- 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>
- 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>
- Cabrera-Balarezo, J. J., Timbe-Castro, L. M., & Crespo-Sánchez, P. J. (2019). Evaluación del modelo HEC-HMS para la simulación hidrológica de una cuenca de páramo. *DYNA*, 86(210), 338-344. <https://doi.org/10.15446/dyna.v86n210.70738>
- Carrillo-Rojas, G., Silva, B., Córdova, M., Célleri, R., & Bendix, J. (2016). Dynamic Mapping of Evapotranspiration Using an Energy Balance-Based Model over an Andean Páramo Catchment of Southern Ecuador. *Remote Sensing*, 8(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/rs8020160>
- Castañeda-Martín, A. E., & Montes-Pulido, C. R. (2017). Carbono almacenado en páramo andino. *Entramado*, 13(1), Article 1. <https://doi.org/10.18041/entramado.2017v13n1.25112>
- Chawanda, C. J., George, C., Thiery, W., Griensven, A. van, Tech, J., Arnold, J., & Srinivasan, R. (2020). User-friendly workflows for catchment modelling: Towards reproducible SWAT+ model studies. *Environmental Modelling & Software*, 134, 104812. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104812>
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). *Applied hydrology*. McGraw-Hill.
- Clark, M. P., Slater, A. G., Rupp, D. E., Woods, R. A., Vrugt, J. A., Gupta, H. V., Wagener, T., & Hay, L. E. (2008). Framework for Understanding Structural Errors (FUSE): A modular framework to diagnose differences between hydrological models. *Water Resources Research*, 44(12). <https://doi.org/10.1029/2007WR006735>
- Correa, A., Ochoa-Tocachi, B. F., Birkel, C., Ochoa-Sánchez, A., Zogheib, C., Tovar, C., & Buytaert, W. (2020). A concerted research effort to advance the hydrological understanding of tropical páramos. *Hydrological Processes*, 34(24), 4609-4627. <https://doi.org/10.1002/hyp.13904>

- Duque, L. F., & Zambrano, R. F. V. (2015). Modelización Hidrológica de una Cuenca Intermittente ubicada en la VIII Región de Chile. *Revista Politécnica*, 35(3), 94-94.
- Flores-López, F., Galaitzi, S. E., Escobar, M., & Purkey, D. (2016). Modeling of Andean Páramo Ecosystems' Hydrological Response to Environmental Change. *Water*, 8(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/w8030094>
- Guio Blanco, C. M., Brito Gomez, V. M., Crespo, P., & Ließ, M. (2018). Spatial prediction of soil water retention in a Páramo landscape: Methodological insight into machine learning using random forest. *Geoderma*, 316, 100-114. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.12.002>
- Hamel, P., Valencia, J., Schmitt, R., Shrestha, M., Piman, T., Sharp, R. P., Francesconi, W., & Guswa, A. J. (2020). Modeling seasonal water yield for landscape management: Applications in Peru and Myanmar. *Journal of Environmental Management*, 270, 110792. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110792>
- Horton, R. E. (1933). The Rôle of infiltration in the hydrologic cycle. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 14(1), 446-460. <https://doi.org/10.1029/TR014i001p00446>
- Jarrin-Perez, F., Jeong, J., Célleri, R., Crespo, P., & Munster, C. (2024). Hydrologic simulation of a neotropical alpine catchment influenced by conductive topsoils in the Ecuadorian Andes. *Frontiers in Environmental Science*, 12. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1303388>
- Knoben, W. J. M., Freer, J. E., & Woods, R. A. (2019). Technical note: Inherent benchmark or not? Comparing Nash–Sutcliffe and Kling–Gupta efficiency scores. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(10), 4323-4331. <https://doi.org/10.5194/hess-23-4323-2019>
- Majumder, M., Barua, A., & Basu, B. (2010). An Overview of Hydrologic Modeling. En B. K. Jana & M. Majumder (Eds.), *Impact of Climate Change on Natural Resource Management* (pp. 375-391). Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-90-481-3581-3\\_21](https://doi.org/10.1007/978-90-481-3581-3_21)
- Meyers, B., Gutiérrez-Lagoueyte, M. E., & Tobón, C. (2023). Measurement of actual evapotranspiration in a páramo ecosystem using portable closed chambers: Comparison between giant rosettes, tussock grasses and shrubs. *Ecohydrology*, n/a(n/a), e2525. <https://doi.org/10.1002/eco.2525>

- Minaya Maldonado, V. G. (2016). *Ecohydrology of the Andes Páramo Region* (1.<sup>a</sup> ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315116044>
- Molina-Sánchez, C., Chávez-Morales, J., Palacios-Vélez, O. L., & Ibáñez-Castillo, L. A. (2022). Simulación hidrológica de la cuenca del río Laja con el modelo WEAP. *Tecnología y ciencias del agua*, 13(2), 136-174. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2022-02-03>
- Moncada, A. M., Escobar, M., Betancourth, A., Vélez Upegui, J. J., Zambrano, J., & Alzate, L. M. (2021). Modelling water stress vulnerability in small Andean basins: Case study of Campoalegre River basin, Colombia. *International Journal of Water Resources Development*, 37(4), 640-657. <https://doi.org/10.1080/07900627.2019.1699780>
- Moriasi, Arnold, Van Liew, Bingner, Harmel, & Veith. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- Morocho, C. C., & Chuncho, G. (2019). Páramos del Ecuador, importancia y afectaciones: Una revisión. *Bosques Latitud Cero*, 9(2), Article 2.
- Mosquera, G. M., Crespo, P., Breuer, L., Feyen, J., & Windhorst, D. (2020). Water transport and tracer mixing in volcanic ash soils at a tropical hillslope: A wet layered sloping sponge. *Hydrological Processes*, 34(9), 2032-2047. <https://doi.org/10.1002/hyp.13733>
- Mosquera, G. M., Lazo, P. X., Célleri, R., Wilcox, B. P., & Crespo, P. (2015). Runoff from tropical alpine grasslands increases with areal extent of wetlands. *CATENA*, 125, 120-128. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.10.010>
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., & Williams, J. R. (2011). *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009*. <https://swat.tamu.edu/media/99192/swat2009-theory.pdf>
- Ocampo, O. L., & Vélez Upegui, J. J. (2014). Análisis comparativo de modelos hidrológicos de simulación continua en cuencas de alta montaña: Caso del Río Chinchiná. *Revista de Ingenierías: Universidad de Medellín*, 13(24), 43-58.
- Ochoa-Tocachi, B. F., Cuadros Adriaola, J., Arapa Guzmán, E., Aste Cannock, N., Ochoa-Tocachi, E., & Bonnesoeur, V. (2022). *Guía de modelación hidrológica Infraestructura Natural para la Seguridad Hídrica para la infraestructura natural*. <https://www.forest-trends.org/wp-content/uploads/2022/01/Guia-de-Modelacion-Hidrologica-para-la-IN-2.pdf>

- Padrón, R. S., Wilcox, B. P., Crespo, P., & Célleri, R. (2015). Rainfall in the Andean Páramo: New Insights from High-Resolution Monitoring in Southern Ecuador. *Journal of Hydrometeorology*, 16(3), 985-996. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-14-0135.1>
- Pesántez, J., Birkel, C., Mosquera, G. M., Célleri, R., Contreras, P., Cárdenas, I., & Crespo, P. (2023). Bridging the gap from hydrological to biogeochemical processes using tracer-aided hydrological models in a tropical montane ecosystem. *Journal of Hydrology*, 619, 129328. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129328>
- Quichimbo, P., Tenorio, G., Borja, P., Cárdenas, I., Crespo, P., & Célleri, R. (2012). Efectos sobre las propiedades físicas y químicas de los suelos por el cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo: Páramo de Quimsacocha al sur del Ecuador. 42(2), 138-153.
- Ranit, A. B., Durge, D. P. V., & Ranit, M. S. A. (2014). Overview of Hydrology with Hydrological Models and Modeling. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 3(2). <https://doi.org/10.17577/IJERTV3IS21010>
- Scharffenberg, W. (2016). *HEC-HMS User's Manual*. US Army Corps of Engineers Institute for Water Resources Hydrologic Engineering Center.
- SEI. (2009). *Guía metodológica—Modelación de recursos hídricos con el modelo WEAP*. Centro de Cambio Global-Universidad Católica de Chile, Stockholm Environment Institute. [https://www.weap21.org/downloads/Guia\\_modelacion\\_WEAP\\_Espanol.pdf](https://www.weap21.org/downloads/Guia_modelacion_WEAP_Espanol.pdf)
- Sieber, J. (2015). *Water Evaluation And Planning System. User Guide*. Stockholm Environment Institute. [https://www.weap21.org/downloads/weap\\_user\\_guide.pdf](https://www.weap21.org/downloads/weap_user_guide.pdf)
- Sucozhañay, A., & Célleri, R. (2018). Impact of Rain Gauges Distribution on the Runoff Simulation of a Small Mountain Catchment in Southern Ecuador. *Water*, 10(9), Article 9. <https://doi.org/10.3390/w10091169>
- Tenelanda Patiño, D., Crespo Sánchez, P., & Mosquera Rojas, G. (2018). Umbrales en la respuesta de humedad del suelo a condiciones meteorológicas en una ladera Altoandina. *Maskana*, 9(2), 53-65.
- Ullauri, M. A. (2016). *Implementar el sistema de modelación WEAP como herramienta que determine el impacto del cambio climático sobre la disponibilidad del agua en la cuenca del río Machángara* [Universidad de Cuenca]. <https://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/25834>
- Uribe, N., Quintero, M., & Valencia Gómez, J. (2013). *Aplicación del Modelo Hidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool) a la Cuenca del Río Cañete (SWAT)*. <https://hdl.handle.net/10568/107463>

Vadillo, J. A. (1983). DUNNE, T., 1978. Field studies of hillslope flow processes. In: Hillslope Hydrology. Ed. M.J. Kirkby, pp. 227-293. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 9, 105-107. <https://doi.org/10.18172/cig.1099>

Waseem, M., Mani, N., Andiego, G., & Usman, M. (2017). A review of criteria of fit for hydrological models. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 04(11), 1765-1772.