



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO  
FACULTAD DE INGENIERIA  
CARRERA DE INGENIERIA AMBIENTAL**

Estudio del balance hídrico en la subcuenca del río Chambo usando el modelo SWAT.

**Trabajo de Titulación para optar al título de  
INGENIERO AMBIENTAL**

**Autor(es):**

Gunsha Chicaiza, Jhoselyn Valeria  
Noboa Diaz, Milton Fernando

**Tutor:**

Ing. Benito Guillermo Mendoza Trujillo PhD

**Riobamba, Ecuador, 2025**

## DECLARATORIA DE AUTORÍA

Nosotros, Jhoselyn Valeria Gunsha Chicaiza y Milton Fernando Noboa Diaz, con cédula de ciudadanía 060425550-5 y 060453487-5, autores del trabajo de investigación titulado: Estudio del balance hídrico en la subcuenca del río Chambo usando el modelo SWAT, certifico que la producción, ideas, opiniones, criterios, contenidos y conclusiones expuestas son de mí exclusiva responsabilidad.

Asimismo, cedo a la Universidad Nacional de Chimborazo, en forma no exclusiva, los derechos para su uso, comunicación pública, distribución, divulgación y/o reproducción total o parcial, por medio físico o digital; en esta cesión se entiende que el cesionario no podrá obtener beneficios económicos. La posible reclamación de terceros respecto de los derechos de autor (a) de la obra referida, será de mi entera responsabilidad; librando a la Universidad Nacional de Chimborazo de posibles obligaciones.

En Riobamba, 15 de diciembre de 2025.



Jhoselyn Valeria Gunsha Chicaiza  
C.I: 060425550-5




Milton Fernando Noboa Diaz  
C.I: 060453487-5

## **DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR**

Quien suscribe, Benito Guillermo Mendoza Trujillo catedrático adscrito a la Facultad de Ingeniería, por medio del presente documento certifico haber asesorado y revisado el desarrollo del trabajo de investigación titulado: ESTUDIO DEL BALANCE HÍDRICO EN LA SUBCUENCA DEL RÍO CHAMBO USANDO EL MODELO SWAT, bajo la autoría de Jhoselyn Valeria Gunsha Chicaiza, con cédula de ciudadanía 060425550-5 y Milton Fernando Noboa Diaz con la cédula de ciudadanía 060453487-5 por lo que se autoriza ejecutar los trámites legales para su sustentación.

Es todo cuanto informar en honor a la verdad; en Riobamba, a los 20 días del mes de noviembre de 2025.



Ing. Benito Guillermo Mendoza Trujillo PhD

C.I: 060301386-3

## **CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL**

Quienes suscribimos, catedráticos designados Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación ESTUDIO DEL BALANCE HÍDRICO EN LA SUBCUENCA DEL RÍO CHAMBO USANDO EL MODELO SWAT, presentado por Jhoselyn Valeria Gunsha Chicaiza, con cédula de identidad número 060425550-5 y Milton Fernando Noboa Diaz con cédula de identidad número 060453487-5, bajo la tutoría de Ing. Benito Guillermo Mendoza Trujillo PhD; certificamos que recomendamos la APROBACIÓN de este con fines de titulación. Previamente se ha evaluado el trabajo de investigación y escuchada la sustentación por parte de su autor; no teniendo más nada que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba 15 de diciembre de 2025.

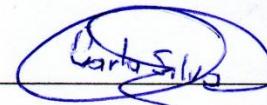
Ing. Patricio Santillán, Mgs.

**PRESIDENTE DEL TRIBUNAL DE GRADO**



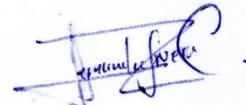
Ing. Carla Silva, Mgs.

**MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO**



Ing. María Fernanda Rivera, Mgs.

**MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO**





## CERTIFICACIÓN

Que, **GUNSHA CHICAIZA JHOSELYN VALERIA** con CC: **060425550-5**, estudiante de la Carrera de **INGENIERIA AMBIENTAL**, Facultad de **INGENIERIA**; ha trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado "**ESTUDIO DEL BALANCE HÍDRICO EN LA SUBCUENCA DEL RÍO CHAMBO USANDO EL MODELO SWAT**", cumple con el **9%**, de acuerdo al reporte del sistema Anti plagio **COMPILATIO MAGISTER**, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 3 de diciembre de 2025



Ing. Benito Guillermo Mendoza Trujillo PhD  
**TUTOR**



# CERTIFICACIÓN

Que, **NOBOA DIAZ MILTON FERNANDO** con CC: **060453487-5**, estudiante de la Carrera de **INGENIERIA AMBIENTAL**, Facultad de **INGENIERIA**; ha trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado "**ESTUDIO DEL BALANCE HÍDRICO EN LA SUBCUENCA DEL RÍO CHAMBO USANDO EL MODELO SWAT**", cumple con el **9%**, de acuerdo al reporte del sistema Anti plagio **COMPILETO MAGISTER**, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 3 de diciembre de 2025



Ing. Benito Guillermo Mendoza Trujillo PhD  
**TUTOR**

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo primeramente a Dios, por ser la luz que ilumina mi sendero y por permitirme llegar hasta aquí.

A mis padres, Ana María Chicaiza Malán y Ángel Estuardo Gunsha Tierra, las personas más importantes de mi vida. Gracias a ustedes, a su amor infinito y a su ejemplo, hoy he logrado este sueño. Quiero que sepan que los amo demasiado; este triunfo es el reflejo de todo lo que han sembrado en mí.

A mi hermana, Scarlett Estefanía Gunsha Chicaiza. No solo has sido mi hermana, sino también mi amiga, mi compañera de trabajo y mi segunda madre. Eres mi modelo para seguir y la mujer que más admiro. Gracias por caminar a mi lado siempre.

**Jhoselyn Valeria Gunsha Chicaiza**

Para empezar, dedico esta tesis a nuestro padre todopoderoso el cual me ha brindado la vida, salud, inteligencia, el discernimiento y la perseverancia que me han permitido llegar hasta este punto culminante de mi carrera, después y no menos importantes, a mis padres Milton Homero Noboa Noboa y Sonia Marlene Diaz Guerrero que son y siempre han sido la luz que me han guiado a través de mi vida, no solo académicamente si no también como un buen ser humano y siendo ejemplos de vida para mi persona , cada logro que he tenido en mi vida se los debo a ellos, gracias por darme la vida, por entregarme a cada instante su amor y dedicación, además dedico mi proyecto de investigación a aquella persona que desde que regreso a mi vida me ha dado todo su apoyo incondicional, sin importar el tiempo, la distancia y las circunstancias, Carla Lezama, quien tiene y siempre tendrá un lugar especial en mi corazón.

**Milton Fernando Noboa Diaz**

## AGRADECIMIENTO

Mi gratitud infinita se eleva primeramente a Dios por brindarme la sabiduría necesaria para concluir este gran reto. Tú has sido la luz que guio mi camino hasta el final. Extiendo un agradecimiento especial a mi tutor, el Ing. Benito Mendoza PhD., cuya guía académica fue la brújula de esta investigación. Gracias por su exigencia y por compartir su conocimiento, fundamentales para alcanzar la culminación de esta tesis. A mi compañero de tesis, Milton Fernando Noboa Diaz: gracias por ser una pieza indispensable en este rompecabezas. Este logro no hubiese sido posible sin tu dedicación. Pero, sobre todo, te agradezco por regalarme tu amistad desde hace ocho años y por la inmensa paciencia que me has tenido en este tiempo compartido. Gracias por ser el mejor equipo.

A mis queridos amigos, María José Mueses, Víctor Agreda y Geraldine López. Gracias por demostrar que el cariño no conoce de fronteras. A pesar de la distancia, su presencia se sintió en cada palabra de aliento. Gracias por estar siempre.

### **Jhoselyn Valeria Gunsha Chicaiza**

Estoy muy agradecido por todos los dones que Dios me ha dado a través de los años, por permitirme levantarme cuando he estado caído, por estar a mi lado dándome esperanza a cada instante, por el he llegado a este punto de mi vida, también les agradezco de todo corazón a mis padres Milton Homero Noboa Noboa y Sonia Marlene Diaz Guerrero, que me han dado su amor y apoyo incondicional desde que vine al mundo, siendo de esta forma parte de los cimientos de mi vida en general, además brindo mis más sinceros agradecimientos a mi tutor de tesis el Ing. Benito Mendoza PhD. quien nos brindó sus conocimientos y predisposición para ayudarnos en cada fase de nuestra investigación, además agradezco a Jhoselyn Gunsha, quien más que una compañera de tesis ha sido una gran y querida amiga, por todo el apoyo moral, la confianza y el cariño brindado a mi persona, y por ultimo y no menos importante agradezco a cada miembro de mi familia, mis abuelos, mis tíos, cada uno de mis primos, a mi querida amiga Cristina Granizo quien ha sido una persona muy importante en mi vida y me ha brindado su amistad y apoyo en los momentos difíciles, además a Joffry Ati y Cristian Pilco, quienes en todo momento me han dado su cariño y apoyo fraternal.

### **Milton Fernando Noboa Diaz**

## ÍNDICE GENERAL:

DECLARATORIA DE AUTORÍA

DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR

CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

CERTIFICADO ANTIPLAGIO

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE ANEXOS

RESUMEN

ABSTRACT

*CAPÍTULO I. INTRODUCCION..... 16*

    1.1 Antecedentes ..... 16

    1.2 Planteamiento del problema ..... 17

    1.3 Justificación ..... 18

    1.4 Objetivos ..... 20

        1.4.1 Objetivo General ..... 20

        1.4.2 Objetivos Específicos ..... 20

*CAPÍTULO II. MARCO TEORICO ..... 21*

    2.1 Estado del arte ..... 21

    2.2 Marco teórico ..... 23

        2.2.1 Cuencas Hidrográficas ..... 23

        2.2.2 Subcuencas Hidrográficas ..... 23

        2.2.3 Ciclo Hidrológico ..... 23

        2.2.4 Balance hídrico ..... 24

        2.2.5 Ecuación del balance hídrico ..... 24

        2.2.6 Modelos hidrológicos ..... 24

2.2.7	Variables Climáticas e Hidrológicas Relevantes .....	25
<i>CAPITULO III, METODOLOGIA .....</i>		28
3.1	Tipo de investigación.....	28
3.2	Diseño de investigación .....	28
3.3	Ubicación del Área de Estudio .....	28
3.4	Descripción del modelo hidrológico.....	29
3.5	Simulación de balance hídrico .....	30
3.6	Fase I. Generación y recopilación de la información para los datos de entrada .....	30
3.6.1	Modelo Digital de Elevación (MDE).....	34
3.6.2	Uso y Cobertura vegetal.....	34
3.6.3	Tipo de suelo.....	38
3.6.4	Información climática .....	42
3.7	Fase II: Aprestamiento de la información.....	43
3.7.1	Variables Climáticas .....	44
3.7.2	Cobertura y uso .....	45
3.7.3	Tipos de Suelo.....	46
3.8	Fase III: Implementación del modelo .....	47
3.8.1	Configuración del Proyecto y Carga de Datos Espaciales.....	47
3.8.2	Caracterización de la Subcuenca y Definición de HRUs.....	50
3.8.3	Configuración y Ejecución del Modelo Base .....	56
3.9	Fase IV: Análisis de Sensibilidad, Calibración y validación del modelo .....	59
3.10	Fase V: Análisis de los resultados obtenidos.....	63
<i>CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</i>		64
4.1	Análisis de sensibilidad de los parámetros .....	64
4.2	Calibración y Validación .....	67

4.2.1	Resultados de la Calibración y Validación .....	68
4.3	Análisis de las variables climáticas de entrada (1980-2021) .....	71
4.3.1	Precipitación .....	71
4.3.2	Temperatura .....	74
4.3.3	Humedad Relativa.....	76
4.3.4	Velocidad del Viento .....	77
4.3.5	Radiación Solar.....	78
4.3.6	Análisis del comportamiento y tenencias hidrológicas (1980-2021).....	81
4.3.7	Tendencia de la recarga al acuífero profundo .....	83
4.3.8	Discusión de Resultados .....	84
<i>CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</i> .....		87
5.1	Conclusiones .....	87
5.2	Recomendaciones .....	88
<i>BIBLIOGRAFÍA</i> .....		90
<i>ANEXOS</i> .....		95

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b>	Detalle de datos de entrada para la modelación.....	31
<b>Tabla 2</b>	Cobertura vegetal de la subcuenca del río Chambo .....	36
<b>Tabla 3</b>	Características fisicoquímicas de suelo de la subcuenca del río Chambo .....	40
<b>Tabla 4</b>	Estaciones proporcionadas por el INAMHI al exterior e interior de la subcuenca del río Chambo .....	43
<b>Tabla 5</b>	Clasificación coberturas SWAT .....	45
<b>Tabla 6</b>	Codificación SNAM de las unidades de suelo según su textura.....	46

<b>Tabla 7</b> Parámetros generales de la subcuenca .....	53
<b>Tabla 8</b> HRUs más representativos de cada microcuenca de la subcuenca del río Chambo	55
<b>Tabla 9</b> Selección de parámetros para calibrar el modelo SWAT .....	60
<b>Tabla 10</b> Interpretación del parámetro NSE para la calibración y validación .....	62
<b>Tabla 11</b> Clasificación de la sensibilidad de los parámetros utilizados para calibrar y validar el caudal (clasificados en orden descendente desde los más sensibles hasta los menos sensibles).	
.....	64
<b>Tabla 12</b> Valores de parámetros optimizados resultantes de la calibración manual.....	66
<b>Tabla 13</b> Resultados de la calibración y validación mensual.....	70

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> Modelo Digital de Elevación y red hídrica de la subcuenca del río Chambo. ....	29
<b>Figura 2</b> Mapa de uso y cobertura del suelo de la subcuenca del río Chambo.....	35
<b>Figura 3</b> Mapa de los Tipos de suelo de la subcuenca del río Chambo.....	39
<b>Figura 4</b> Ubicación de las estaciones meteorológicas en la subcuenca del Río Chambo .....	42
<b>Figura 5</b> Formatos variables climáticas por estación.....	44
<b>Figura 6</b> Activación de la extensión SWAT dentro de la interfaz de ArcGIS .....	47
<b>Figura 7</b> Carga del modelo de elevación digital (MDE).....	48
<b>Figura 8</b> Carga de la Capa de Uso y Cobertura Vegetal.....	49
<b>Figura 9</b> Carga de la Capa de los Tipos de suelo.....	49
<b>Figura 10</b> Clasificación de pendientes .....	50
<b>Figura 11</b> Clasificación de HRUs .....	51
<b>Figura 12</b> Mapa de microcuenca en el área de estudio .....	52
<b>Figura 13</b> Unidades de respuesta Hidrológica del área de estudio .....	55
<b>Figura 14</b> Registro de estaciones meteorológicas.....	57
<b>Figura 15</b> Incorporación de datos meteorológicos dentro de la interfaz de ArcSWAT .....	57
<b>Figura 16</b> Ejecución preliminar del modelo hidrológico (1980-2000) .....	58
<b>Figura 17</b> Visualización del caudal medio simulado en el SWAT Output Viewer.....	59
<b>Figura 18</b> Mapa de Ubicación de la estación H0826 “Chambo en Hacienda Cahuaji”.....	68

<b>Figura 19</b> Caudal diario de Marzo de 1987 para el periodo de calibración.....	69
<b>Figura 20</b> Caudal diario de abril de 1987 para el periodo de validación .....	70
<b>Figura 21</b> Mapa de Isoyetas de la subcuenca del río Chambo (1980-2021).....	72
<b>Figura 22</b> Precipitación media anual subcuenca del río Chambo (1980-2021).....	72
<b>Figura 23</b> Mapa de Isotermas de la subcuenca del río Chambo (1980-2021) .....	74
<b>Figura 24</b> Temperatura Media Anual (1980-2021).....	75
<b>Figura 25</b> Humedad Relativa (HR) Media Anual comparativa (1980-2021) .....	76
<b>Figura 26</b> Velocidad media anual del viento comparativa (1980-2021) .....	77
<b>Figura 27</b> Radiación Solar Media Anual en la Subcuenca (1980-2021) .....	79
<b>Figura 28</b> Balance hídrico promedio simulado por el modelo SWAT en la subcuenca del río Chambo (1980 – 2021). .....	79
<b>Figura 29</b> Componentes del aporte hídrico anual simulado (1980-2021) .....	81
<b>Figura 30</b> Tendencia de la recarga anual del acuífero profundo (1980-2021).....	83

## ÍNDICE DE ANEXOS

<b>Anexo 1</b> Datos de estaciones meteorológicas 1980-2010 .....	95
<b>Anexo 2</b> Tabla estadística de Calibración exitosa del modelo SWAT .....	98
<b>Anexo 3</b> Tabla estadística de la validación del modelo SWAT .....	99
<b>Anexo 4</b> Tabla de Evapotranspiración anual obtenida a partir del modelo SWAT basado en la ecuación de Penman-Monteith.....	100
<b>Anexo 5</b> Grafico de tendencia de la evapotranspiración anual.....	101
<b>Anexo 6</b> Oficio dirigido al Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología “Inamhi” para la solicitud de datos observados de caudal de la estación H0826.....	102
<b>Anexo 7</b> Oficio dirigido al Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología “Inamhi” para la solicitud de datos meteorológicos de múltiples estaciones.....	103

## RESUMEN

El presente trabajo de investigación se enfoca en realizar el análisis del comportamiento hidrológico y la capacidad de adaptación que tiene la subcuenca del río Chambo durante el periodo 1980-2021, esto en un contexto de un evidente cambio climático, el cual sumado a las diferentes actividades antrópicas como el cambio de la cobertura vegetal debido a actividades agrícolas y el crecimiento urbano provocan cambios tanto en el suelo como en el agua ,haciendo que el objetivo principal sea caracterizar las tendencias climáticas e hidrológicas para lograr cuantificar el balance hídrico general del sistema. Para lograr este proceso se implementó el modelo hidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool), ingresando información meteorológica diaria de precipitación, temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y radiación solar de estaciones locales, mediante los cuales se calibro para poder simular las condiciones climáticas, de suelo y cobertura de la subcuenca del río Chambo para llegar a generar el caudal generado en la salida de la zona de estudio, respaldando que esta investigación nace ante la evidente falta de información sobre los recursos hídricos en la provincia de Chimborazo, siendo algo necesario debido a que en este y otros lugares el agua es un componente vital del día a día, por tal motivo necesita ser cuantificado y analizado para determinar si existe un balance entre la cantidad que entra y sale del sistema.

**Palabras claves:** Balance Hídrico, Modelo Hidrológico, SWAT, Calibración, Recursos Hídricos.

## ABSTRACT

This research analyzes the hydrological behavior and adaptive capacity of the Chambo River sub-basin from 1980 to 2021. It considers evidence of climate change and human activities, such as changes in vegetation cover resulting from agriculture and urban growth. These factors affect both soil and water. The main objective is to characterize climatic and hydrological trends and quantify the overall water balance. The SWAT (Soil and Water Assessment Tool) hydrological model was used. Daily data on precipitation, temperature, relative humidity, wind speed, and solar radiation from local stations served as input. This data was used to calibrate the model and simulate climate, soil, and land cover conditions in the Chambo River sub-basin. The model produced the flow rate at the outlet of the study area. The research addresses the lack of water resources information in Chimborazo province. Water is essential for daily life in this and other locations. Therefore, it must be quantified and analyzed to determine whether the amount entering and leaving the system is balanced.

**Keywords:** Water Balance, Hydrological Model, SWAT, Calibration, Water Resources.



Reviewed by:

Ms.C. Ana Maldonado León  
ENGLISH PROFESSOR  
C.I.0601975980

# CAPÍTULO I. INTRODUCCION

## 1.1 Antecedentes

La subcuenca del río Chambo pertenece a la cuenca alta del río Pastaza y su principal afluente lleva su mismo nombre, está ubicada en la provincia de Chimborazo (Horna et al., 2022). La importancia hidrológica radica en su abundante recurso de agua subterránea, el cual constituye la principal fuente de suministro de agua potable y riego para las ciudades de Riobamba y Guano (Gobierno Autónomo Descentralizado de Chimborazo, 2019).

El aprovechamiento sostenible del agua subterránea en la región andina de Ecuador se ve restringido debido a la falta de comprensión hidrológica sobre la recarga y el comportamiento de los acuíferos (Buytaert & Bievre, 2012). Además, en la zona de la subcuenca del río Chambo se han realizado escasas investigaciones centradas en comprender el proceso hidrológico integral que abarca el papel del agua subterránea, incluyendo la determinación del tamaño de los acuíferos y áreas de recarga, así como el análisis de las contribuciones de estas aguas a los cauces superficiales (Chidichimo et al., 2018).

La presente investigación busca analizar el balance hídrico en la subcuenca del río Chambo, esto mediante el uso del modelo SWAT usado para dividir cuencas en múltiples subcuenca, que a su vez se subdividen en unidades de respuesta hidrológicas (HRUs) homogéneas en cuanto al uso de la tierra, topografía y las características del suelo, lo que permite evaluar los cambios que ha presentado el recurso hídrico a lo largo de un periodo de tiempo considerable en la zona de estudio (Guevara et al., 2014).

## 1.2 Planteamiento del problema

En la actualidad existen conflictos alrededor del mundo por el agua, a causa de las demandas poblacionales, energéticas y agrícolas (Martínez & Vallejo, 2018). En Ecuador, a este recurso se le da suma importancia, no solo social, sino, también cultural, productivo, económico, entre otros, debido a que es fuente de agua potable, para riego, además de aportar en la generación de energía (CEPAL, 2020).

En este contexto, los modelos hidrológicos representan un papel importante en el estudio del comportamiento del agua porque son utilizados en la predicción, por esta razón se realizan simulaciones de áreas posiblemente inundables, dando una noción muy cercana a la realidad de este modo intentar mitigar los efectos de posibles fenómenos de la naturaleza (Benavides & Román, 2025).

Por tanto, algunos estudios a nivel global han empleado el modelo hidrológico SWAT para representar los componentes del balance hídrico. Por ejemplo, el trabajo de (Colín et al., 2022) donde se analiza el comportamiento del escurrimiento superficial en la cuenca del río Mixteco. Esta cuenca, moldeada por la distribución espacial de la lluvia y la generación de escurrimientos, desempeña un papel crucial en la gestión de los recursos hídricos. Si bien estos estudios han resaltado la importancia de entender los ciclos hidrológicos, se requiere una mayor investigación a nivel local debido a que no se ha profundizado en el tema.

Por otra parte, la subcuenca del río Chambo pertenece a la cuenca alta del río Pastaza y su principal afluente lleva su mismo nombre, está ubicado en la provincia de Chimborazo, cuyas coordenadas son 2°0'0" Latitud Sur 78°00'00" Longitud Oeste. Cuenta con un área de 3589.55 km<sup>2</sup> y un perímetro de 339.38 km, además, posee una precipitación promedio anual de 872,078 mm (Horna et al., 2022). En esta se observa que el avance de la frontera agrícola, la reforestación con especies invasoras, además de la

quema del pajonal degradan tanto las zonas de recarga hídrica como los recursos naturales un ejemplo es el páramo. Así mismo, la contaminación del río producida principalmente por las ciudades e industrias que se ubican en la zona tiende a disminuir el acceso al agua. Al no tratar el problema, se presentarían efectos negativos no solo para las poblaciones cercanas, ya que a futuro esto podría aumentar los costos del suministro de agua tanto de las ciudades y los pueblos, donde tendrían que construir sistemas más sofisticados para la depuración del líquido vital o nuevas captaciones (Romero et al., 2022).

Con este panorama, la investigación tiene como objetivo utilizar el modelo hidrológico SWAT para evaluar la capacidad hídrica de la subcuenca del río Chambo. Los resultados obtenidos desempeñarán un papel crucial en el respaldo de la gestión y administración del agua, ofreciendo información esencial para identificar las acciones requeridas en la preservación del recurso hídrico.

### **1.3 Justificación**

El conocimiento acerca del balance hídrico es fundamental para un manejo eficiente del agua, debido a que proporciona información esencial que se encargará de conducir a un mejor uso de este recurso, donde las cuencas, subcuenca, microcuenca, ríos, lagunas, lagos, humedales y páramos son las áreas más relevantes, constituyendo una reserva importante en la generación de precipitaciones, así como también la regulación del ciclo hidrológico (Pimentel et al., 2021). Además, la relación entre precipitación y escorrentía han permitido la formulación de modelos de simulación capaces de generar predicciones de comportamiento a futuro, jugando un papel importante en la toma de decisiones técnicas, siendo la prevención de inundaciones, también contribuyendo con información para generar un correcto ordenamiento territorial (Ruiz et al., 2023).

En este contexto, los modelos hidrológicos se efectúan como producto de la necesidad de conocer si los resultados obtenidos del método aplicado se acercan a la realidad (Lawal et al., 2023). Por una parte, los resultados de la investigación proveerán información al GAD de la provincia de Chimborazo para la futura toma de decisiones centrado en el uso del agua, donde los agricultores podrán beneficiarse al conocer la disponibilidad del recurso hídrico, también podrán utilizar el conocimiento adquirido y así planificar sus prácticas de riego, gestión de cultivos, entre otros, lo que mejoraría la productividad agrícola (Gobierno Autónomo Descentralizado de Chimborazo,2019). Y por otra, servirán como insumo para el desarrollo de un modelo acoplado de balance hídrico desarrollado por el proyecto “Caracterización de la oferta y demanda hídrica en el área de influencia del acuífero del Chambo”.

La información obtenida con esta tesis beneficiará al proyecto “Caracterización de la oferta y demanda hídrica en el área de influencia del acuífero del Chambo”, por cuanto se obtendrán datos del balance hídrico en la subcuenca del río Chambo, siendo esta información necesaria para la construcción del modelo hidrológico acoplado, objetivo específico del mencionado proyecto.

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivo General**

Determinar el balance hídrico en la subcuenca del río Chambo utilizando el modelo SWAT en el periodo 1980-2021.

### **1.4.2 Objetivos Específicos**

- Parametrizar con el método SWAT el balance hídrico en la subcuenca del río Chambo en el período 1980-2000.
- Calibrar y validar el modelo SWAT utilizando datos hidrológicos disponibles para el período de estudio en el periodo 2000-2021.
- Analizar el comportamiento hidrológico de la subcuenca del río Chambo durante el período 1980-2021.

## CAPÍTULO II. MARCO TEORICO

### 2.1 Estado del arte

Sabiendo que el cambio climático tiene una influencia directa sobre el balance hídrico, es muy importante denotar lo mencionado por Trenberth (2011), donde explica que existe una influencia directa del calentamiento global sobre la precipitación, producido por un aumento en la temperatura conllevando a un mayor proceso de evaporación provocando sequía en la superficie terrestre, por lo que a su vez aumenta la intensidad y la duración de este último, sin embargo la capacidad del aire de contener agua se eleva un 7% cada 1°C de calentamiento, lo que podría provocar el incremento de humedad en la atmósfera.

De esta manera, se han hecho un sinnúmero de estudios sobre este tema, denotando el trabajo realizado en Argentina donde según (Cogliati et al., 2018), “Se consideraron datos de precipitación y temperatura de 32 estaciones meteorológicas, las cuales fueron seleccionadas por la disponibilidad de datos en el periodo 1997-2015. Dicha información fue provista por la autoridad interjurisdiccional de cuencas de los ríos Limay, Neuquén y Negro (AIC), el servicio meteorológico nacional y departamento provincial de aguas de río Negro”, mediante esto el balance hídrico mensual obtuvo un modelo con interfaz gráfica a partir del cálculo de las componentes del ciclo hidrológico para un lugar determinado, concluyéndose que desde el punto de vista de las actividades que utilizan el recurso hídrico, las áreas ubicadas al oeste del lugar del estudio presentaron exceso o requerimientos hídricos cubiertos en la mayor parte del año, lo que se ve reflejado en cambios en la vegetación natural, mientras que las áreas ubicadas al este presentaron déficit de agua.

Haciendo énfasis en el trabajo realizado por Horna et al. (2022), el cual tiene como título “Tendencias temporales del índice mejorado de la vegetación (Evi) en tres

ecosistemas de la subcuenca del río Chambo durante el periodo 2013 a 2020”, donde se menciona que se usó sistema de información geográfica para realizar el corte del área de estudio además de extraer los valores mínimos, máximos, medios y desviación estándar usando la herramienta para todos los meses de cada año, además para poder realizar el análisis de las tendencias temporales de EVI con ayuda de la prueba de tendencia de Mann – Kendall Simple mediante la implementación del software TREND, que está diseñado para facilitar pruebas estadísticas para la tendencia, el cambio y la aleatoriedad en series de tiempo hidrológicas, concluyendo que en la parte alta de la subcuenca del río Chambo se observan alteraciones referentes a la capacidad de adaptación frente a los diferentes aportes que da el agua, afectando negativamente el balance hídrico, siendo este problema cada vez más grave debido al cambio climático y el calentamiento global que va en un aumento bastante notable con cada año que trascurre.

Para entender de mejor manera el balance hídrico en diferentes cuencas se han ido realizando modelaciones con ayuda del software SWAT las cuales han arrojado distintos resultados dependiendo de las condiciones climáticas del lugar de estudio, proporcionando información esencial para un mejor uso del recurso hídrico, aportando datos cercanos que podrían ayudar a mitigar el déficit hídrico y a encontrar las causas por las que se podría producir o se produjo en primer lugar.

## 2.2 Marco teórico

### 2.2.1 Cuencas Hidrográficas

Las cuencas hidrográficas son zonas geográficas delimitadas por las partes más altas del terreno conocidas como parteaguas. Dentro de estas zonas se encuentran todos los flujos de agua, como arroyos y ríos, que convergen hacia un punto en común ya sea en un lago o en el mar (Maldonado et al., 2023). La gestión en estas zonas implica un conjunto de etapas como la planificación, ejecución y valoración de acciones, promoviendo la participación organizada y bien formada de la población (Cifuentes et al., 2025).

### 2.2.2 Subcuenca Hidrográfica

Una subcuenca hidrográfica se define como una subdivisión dentro de una cuenca mayor donde toda el agua proveniente de lluvias o derretimientos se desplaza por los cauces secundarios (arroyos y ríos menores) hasta el cauce principal (Carvalho et al., 2022).

### 2.2.3 Ciclo Hidrológico

El ciclo hidrológico es un modelo de circulación dinámico y global que describe de manera compleja los movimientos y transformaciones del agua en el cual circula por diferentes etapas, desde su formación como precipitación hasta el retorno por evapotranspiración. El inicio fundamental es que cada gota de agua completa un circuito cerrado por varias rutas posibles y no solo por una trayectoria. Comenzando el proceso en la atmósfera después con la precipitación y circulando a través de ríos, infiltración y escorrentía y finalmente con la evapotranspiración que integra el agua nuevamente al aire (Wang & Liu, 2023).

#### 2.2.4 Balance hídrico

AL-Falahi et al. (2024) describe que el balance hídrico brinda una perspectiva más detallada de como el agua ingresa, se emplea y sale en una zona determinada. Esta percepción detallada permite a los gestores la toma de decisiones ya sea en sectores como la agricultura, gestión del agua y la conservación ambiental, ya que tener una visión clara de cuanta agua hay disponible, como se usa y como se puede gestionar para garantizar su sostenibilidad a largo plazo.

#### 2.2.5 Ecuación del balance hídrico

La ecuación del balance hídrico para una cuenca se expresa como (**Ecuación 1**) los flujos de entrada y salida de agua, con los consumos y las variaciones en el almacenamiento, contribuyendo al equilibrio hídrico de una región determinada y se representa como (Petch et al., 2023):

$$\frac{\Delta S}{\Delta t} = P + Q_1 - E - ETR - Q_s \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

$P$  = Precipitación

$Q_1$  = Aguas superficiales y subterráneas

$E$  = Evaporación

$ETR$  = Evapotranspiración

$Q_s$  = Salida de agua superficial y subterránea desde la cuenca

#### 2.2.6 Modelos hidrológicos

Los modelos hidrológicos son herramientas útiles que permiten interpretar y entender cómo funciona una cuenca de drenaje ya que resultan fundamentales como interpretar como la precipitación se convierte en escorrentía y como esa corriente puede movilizar diferentes sustancias (Mohammadi, 2021).

### **2.2.6.1 Modelo SWAT**

El modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) es un tipo semidistribuido y se basa en principios físicos, diseñados para simular de manera espacial y temporal los distintos componentes del balance hídrico. El funcionamiento continuo lo hace ideal para la evaluación del efecto de distintas prácticas de manejo del suelo en la generación de escorrentía, producción de sedimentos y transporte de productos químicos agrícolas. También, permite modelar cuencas complejas con variaciones en tipos de suelo, cobertura vegetal y otras condiciones de uso del suelo durante períodos prolongados, como meses o años (Colín et al., 2022).

## **2.2.7 Variables Climáticas e Hidrológicas Relevantes**

### **2.2.7.1 Precipitación**

La precipitación comprende toda forma de agua, bien sea sólida o líquida el cual desciende de la atmósfera a la superficie terrestre, ya sea como lluvia, llovizna, granizo o nieve (Álvarez et al., 2022).

### **2.2.7.2 Evaporación**

La evaporación es el proceso donde el agua cambia de estado líquido a gaseoso, transformándose a vapor el cual se dispersa desde la superficie terrestre. Esta transformación requiere energía el cual es proporcionado principalmente de la radiación solar y en poca cantidad de la temperatura del aire (Cisneros et al., 2017).

### **2.2.7.3 Evapotranspiración**

Según (Rosales et al., 2022) la evapotranspiración (ET) es la cantidad total de agua que se pierde desde una superficie específica debido a la combinación de dos procesos: la evaporación directa del agua de la superficie y la transpiración de las plantas. Esencialmente, la ET representa la suma de la evaporación del agua de cualquier

superficie, como suelo o cuerpos de agua, junto con la cantidad de agua liberada por las plantas a través de sus poros, llamados estomas. Esta medida combina la pérdida de agua tanto de la superficie como de la vegetación en una región dada.

#### **2.2.7.4 Infiltración**

La infiltración en una cuenca describe cómo el agua proveniente de la lluvia o cualquier otra forma de precipitación atraviesa la capa superior del suelo y se sumerge en él. Cuando ocurre una precipitación, parte del agua se queda en la superficie mientras que la otra se evapora y el resto tiene la capacidad de filtrarse en el suelo. Este proceso está influenciado por varios factores, como la composición del suelo, la presencia de vegetación, la inclinación del terreno y cuánta agua ya está saturando el suelo (De Cabo y Marconi, 2021).

#### **2.2.7.5 Escorrentía superficial**

Ruiz et al., (2023) afirman que la escorrentía superficial se refiere al flujo de agua que se desplaza sobre la superficie de la tierra sin penetrar en el suelo. Esta se genera a raíz de la lluvia directa o debido al desbordamiento de depósitos o canales naturales o hechos por el ser humano que originalmente retenían esta agua.

#### **2.2.7.6 Temperatura del Aire**

Es un factor que regula la evapotranspiración y el derretimiento de nieve. Además, influye en la cantidad de vapor de agua que puede contener la atmósfera (Mekoya et al., 2025).

#### **2.2.7.7 Humedad Relativa**

Refleja la cantidad de vapor de agua en el aire en relación con la cantidad máxima que este puede contener a una temperatura dada. Afecta la tasa de evaporación desde el suelo y la vegetación (Nikolaou et al., 2024).

#### **2.2.7.8 Radiación Solar**

Es la fuente de energía que impulsa procesos como la evaporación y la fotosíntesis. En modelos hidrológicos, se utiliza para estimar la evapotranspiración potencial (Hoyos, 2025).

#### **2.2.7.9 Velocidad del Viento**

Influye en la tasa de evaporación, especialmente cuando se combina con baja humedad relativa. También puede afectar la dispersión de partículas y sustancias químicas en el aire y suelo (Cabrera et al., 2024).

## CAPITULO III, METODOLOGIA

### 3.1 Tipo de investigación

La investigación tiene un enfoque cuantitativo ya que se basa en recolectar, procesar y analizar datos numéricos, tanto hidrológicos como meteorológicos los cuales son procesados por el modelo SWAT para así simular el balance hídrico en la subcuenca del río Chambo. Creswell (2020) menciona que la investigación cuantitativa debe recoger y analizar datos cuantitativos de variables preestablecidas para así comprobar las hipótesis o dar respuestas a las preguntas de investigación.

Además, enmarca un enfoque descriptivo dado que busca determinar el comportamiento hidrológico de la subcuenca en relación con los componentes del balance hídrico y describir las variaciones tanto espaciales como temporales durante el periodo 1980-2021 (Bernal, 2010).

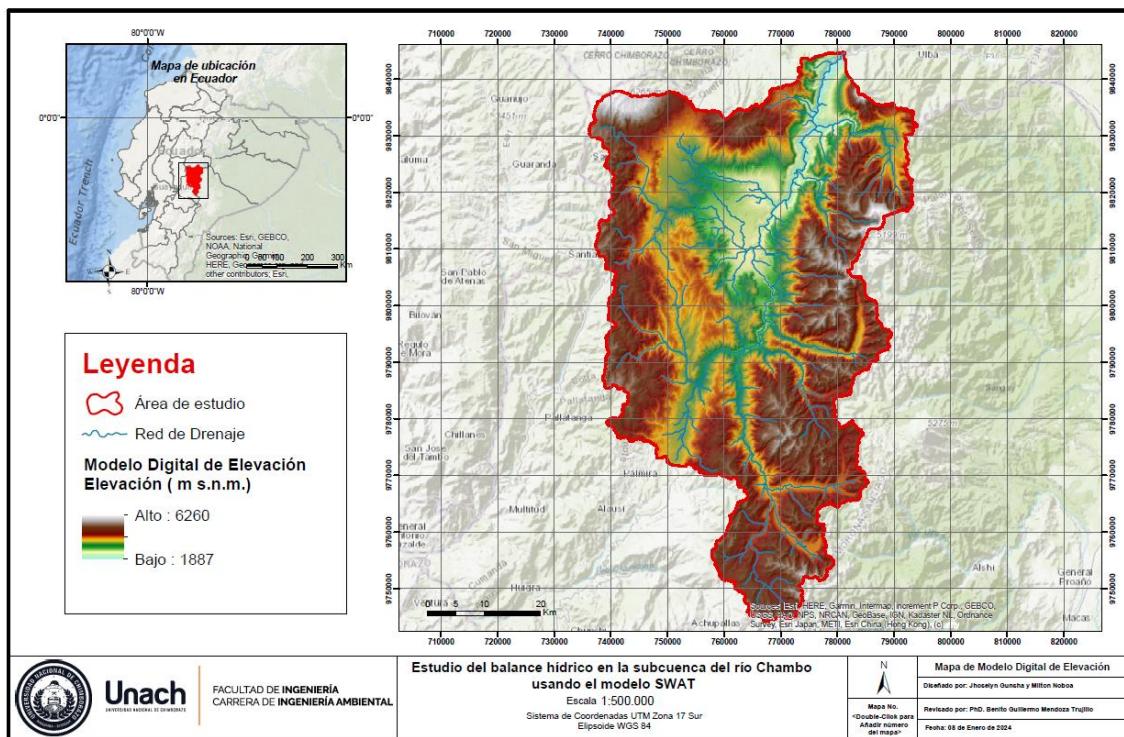
### 3.2 Diseño de investigación

La investigación enfoca un diseño no experimental debido a que en este estudio no se realizó ninguna manipulación directa en las variables independientes. Asimismo, se trabajó a partir de información histórica ya existente, relacionada con aspectos climáticos, edáficos, topográficos y de la cobertura del suelo, los cuales fueron analizados tal y como se presentaron en su momento y lugar (Hernández & Mendoza, 2018).

### 3.3 Ubicación del Área de Estudio

La subcuenca del río Chambo pertenece a la demarcación hidrográfica del Pastaza y se extiende por la provincia de Chimborazo, abarcando los cantones Riobamba, Guano, Penipe, Chambo, Guamote, Colta y Alausí. Su principal afluente, el río Chambo, nace en la cordillera central de los Andes ecuatorianos. Su elevación varía desde los 1887 m.s.n.m. hasta 6260 m.s.n.m. y comprende un área de 3393 km<sup>2</sup>.

**Figura 1** *Modelo Digital de Elevación y red hídrica de la subcuenca del río Chambo.*



*Nota.* La figura muestra el área de estudio, la red de drenaje y el modelo digital de elevación (MDE) de la subcuenca del río Chambo. Elaboración propia a partir de datos topográficos.

### 3.4 Descripción del modelo hidrológico

El modelo hidrológico emplea parámetros semidistribuidos, lo cual le permite simular de forma constante diversos procesos físicos que ocurren en una cuenca hidrográfica, bien sea a escala anual, mensual, diaria o inclusive subdiaria (Jódar et al., 2018). El análisis del balance hídrico dentro de este enfoque considera variables biofísicas que son clave para la cuenca, como su morfología, tipo de suelo, temperatura, evaporación y precipitación (Pandi et al., 2023). Además, al integrarse con herramientas de sistemas de información geográfica (SIG), este adquiere mayor capacidad predictiva para calcular la producción del agua, la escorrentía superficial y la generación de sedimentos (Arnold et al., 1998).

### 3.5 Simulación de balance hídrico.

Para estimar el balance hídrico, el modelo SWAT utiliza la siguiente ecuación (Neitsch et al., 2005):

$$SW_t = SW_0 + \sum (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (Ecuación\ 2)$$

**Donde:**

$SW_t$ = Contenido final del agua del suelo en (mm H<sub>2</sub>O)

$SW_0$ = Contenido inicial del agua del suelo en el día en (mm H<sub>2</sub>O)

$cT$  = Tiempo en días

$R_{day}$ = Cantidad de precipitación en el día (mm H<sub>2</sub>O)

$Q_{surf}$ = Cantidad de escorrentía superficial en el día en (mm H<sub>2</sub>O)

$E_a$ = Cantidad de evaporación en el día en (mm H<sub>2</sub>O)

$W_{seep}$ = Cantidad de agua que percola en el perfil de suelo en el día en (mm H<sub>2</sub>O)

$Q_{gw}$ = Cantidad de flujo de retorno en un día en (mm H<sub>2</sub>O)

La metodología se organizó en cinco fases adaptadas de lo mencionado por Arnold et al., (1998). Lo que permitió garantizar la trazabilidad, la coherencia técnica y el cumplimiento de los objetivos de investigación:

### 3.6 Fase I. Generación y recopilación de la información para los datos de entrada

Para la ejecución del modelo SWAT se requiere diversos datos de entrada por esa razón se realizó una revisión de las diferentes fuentes de información disponibles para la zona de estudio, con el fin de seleccionar las más adecuadas para el modelo hidrológico.

En la **Tabla 1** se presenta un resumen de las fuentes evaluadas y la justificación de las que fueron seleccionadas para esta investigación.

**Tabla 1** Detalle de datos de entrada para la modelación

Información	Fuentes Evaluadas	Justificación de la selección	Periodo	Cita
DEM	<ul style="list-style-type: none"> <li>• SRTM V4</li> <li>• SRTM V3</li> <li>• ASTER V3</li> <li>• ALOS PALSAR</li> <li>• Carta Nacional</li> </ul>	<p>Se seleccionó SRTM V3 por ofrecer una buena resolución espacial sin suavizado, ideal para el modelado hidrológico. Tiene buena precisión y cobertura continua. A diferencia de ALOS PASTOR (que tiene más ruido en zonas con vegetación) o ASTER V3 (cuyo periodo es del 2000 al 2013, lo que podría generar inconsistencia), SRTM V3 es uniforme en tiempo y espacio.</p>	2000-2013	(NASA,2024)
Uso y cobertura vegetal	<ul style="list-style-type: none"> <li>• LANCOVER</li> <li>• MODIS 12</li> <li>• GlobCover2009</li> </ul>	<p><b>MAG</b> al ser una fuente oficial de Ecuador, con datos actualizados y</p>	2009-2015	(MAG, 2019)

- Copernicus adaptados a la realidad Global Land nacional. Sus Service categorías reflejan de
- MAG (Ministerio forma precisa los de Ganadería y cultivos y usos Agricultura) agropecuarios, validados en campo, lo que mejora la representación hidrológica para su uso en SWAT. Presenta mejor resolución y detalle temático que las demás opciones.

TIPO DE SUELO	• FAO-UNESCO • MAG	MAG tiene mapas 2009- edafológicos que están 2015 elaborados a escala más detalladas y con información específica para Ecuador. En cambio, los datos de la FAO-UNESCO, aunque útiles para estudios globales, están a una escala más	(MAG, 2019)
---------------	-----------------------	---	-------------

---

general, con menor resolución espacial lo que podría subestimar la heterogeneidad edafológica de la subcuenca.

---

DATOS CLIMATICOS	<ul style="list-style-type: none"><li>• PISCO</li><li>• CHRS</li><li>• INAMHI</li></ul>	Se seleccionó 1980 al (INAMHI, INAMHI porque 2021 2025) proporciona datos observacionales directos de estaciones meteorológicas e hidrometeorológicas.
		Esto garantiza mayor representabilidad local y reduce incertidumbres en contaste con PISCO y CHRS que son productos satelitales, aunque útiles para áreas sin estaciones, pueden presentar sesgos en zonas montañosas como la

subcuenca del río  
Chambo.

*Nota.* La tabla presenta las fuentes evaluadas y seleccionadas para la modelación hidrológica en SWAT.

### **3.6.1 Modelo Digital de Elevación (MDE)**

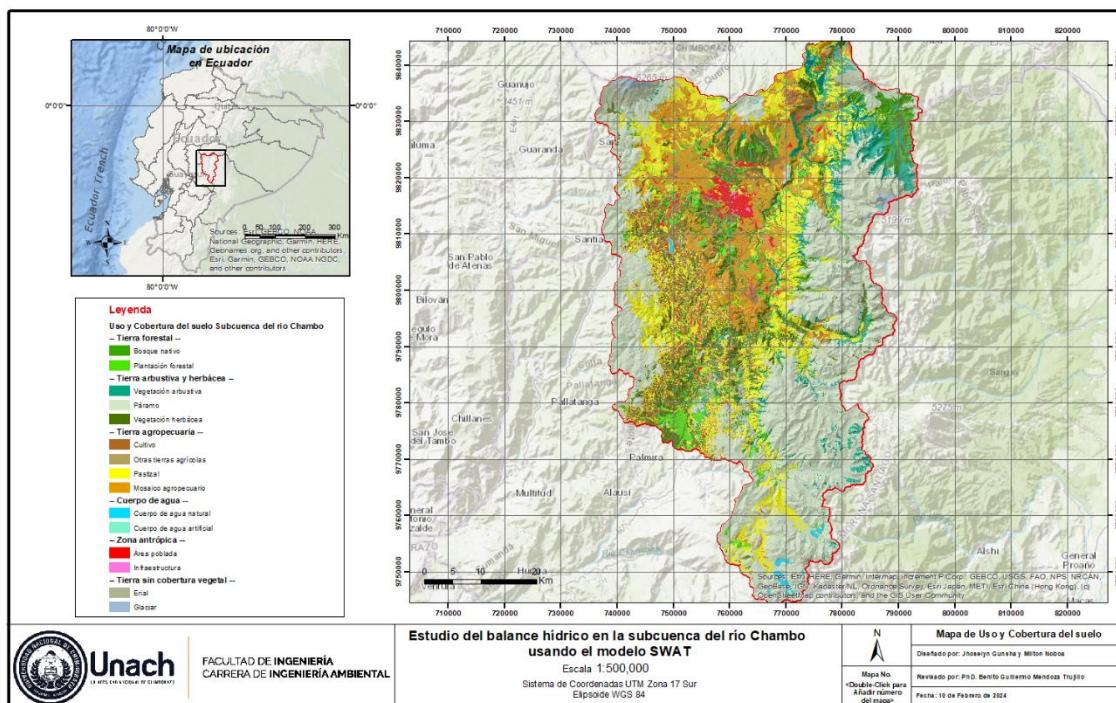
Se utilizó el Modelo Digital de Elevación (MDE) de la versión SRTM V3, que posee una resolución de 30 metros. Los datos fueron descargados del portal EarthData Search de la NASA (NASA, 2024).

Este insumo (cuya representación cartográfica se presentó en la **Figura 1** fue la base para el modelamiento, ya que se utiliza para delimitar la subcuenca, generar la red de drenaje y calcular las pendientes, Como parte del procesamiento, se realizaron los ajustes necesarios para el llenado de vacíos de información.

### **3.6.2 Uso y Cobertura vegetal**

Se utilizaron los datos cartográficos elaborados por el Ministerio de Agricultura y Ganadería del Ecuador (MAG), disponibles en el Geoportal del Agro Ecuatoriano. Esta información corresponde al periodo 2009-2015 a una escala de 1:25.000.

**Figura 2** Mapa de uso y cobertura del suelo de la subcuenca del río Chambo.



*Nota.* La figura presenta la distribución espacial de las categorías de uso y cobertura del suelo. Se destacan el páramo y las zonas agropecuarias como las coberturas predominantes. Datos base obtenidos del Ministerio de Agricultura y Ganadería (2019).

En la **Tabla 2**, se observó que en la subcuenca del río Chambo está definida por el dominio de dos coberturas principales: las tierras arbustivas y herbáceas (50,1 %), donde destaca el páramo (126822,46 ha) como principal ecosistema regulador, y las tierras agropecuarias (36,2 %), que representan la mayor presión antrópica sobre el recurso hídrico. El páramo garantiza el almacenamiento y la regulación del caudal base, mientras que la expansión agrícola (pastizales y cultivos) tiende a reducir la infiltración y aumentar la escorrentía. Coberturas secundarias como las tierras forestales (6,6 %), tierra sin cobertura vegetal (4,5 %) (incluyendo eriales y glaciares), zonas antrópicas (1,9 %) y cuerpos de agua (0,6 %) tienen impactos hidrológicos localizados, pero la dinámica principal de la cuenca está definida por la interacción entre paramo y agricultura.

**Tabla 2 Cobertura vegetal de la subcuenca del río Chambo**

<b>Cobertura Vegetal</b>	<b>Descripción</b>	<b>Área (ha)</b>	<b>Porcentaje</b>
<b>Nivel 1</b>	<b>Nivel 2</b>		<b>(%)</b>
	Bosque nativo Comunidad vegetal domina por arboles de diferentes especies.	6496,12	
<b>Tierra</b>			
<b>Forestal</b>	Plantación Superficie arbolada por forestal plantación de especies nativas o exóticas.	17155,47	6,6
	Vegetación Áreas con especies leñosas arbustiva nativas no arbóreas.	21985,24	
<b>Tierra</b>	Páramo Vegetación predominantemente de	126822,46	
<b>arbustiva y</b>	herbácea	herbácea y arbustiva.	50,1
	Vegetación Áreas con especies herbácea herbáceas nativas con un crecimiento espontaneo.	30295,83	
<b>Tierra</b>	Cultivo Producto agrícola, resultado de un conjunto de técnicas y conocimientos para cultivar la tierra.	24619,66	
<b>agropecuaria</b>	Otras tierras Tierras que se dejan sin agrícolas sembrar durante uno o varios ciclos vegetativos, con el fin	365,01	36,2

de recuperar materia orgánica y humedad.

Pastizal	Vegetación	herbácea	63654,57
dominada por especies de gramíneas y leguminosas introducidas.			
Mosaico	Son agrupaciones de	40722,42	
agropecuario especies cultivadas que se encuentran mezcladas entre sí.			
Cuerpo de agua	Cuerpo de Superficies	cubiertas	2137,16
agua natural permanentemente por agua de origen natural.			
<b>Cuerpo de agua</b>	Cuerpo de Superficie y volumen	5,29	0,6
agua artificial asociadas con las actividades antrópicas y el manejo del recurso hídrico.			
Zona antrópica	Área poblada	Zona de asentamiento	6162,85
humano que contiene concentración de casas y otras estructuras.			
1,9			
Infraestructura	Espacios construidos o	735,31	
creados por el hombre que			

incluyen obras de

infraestructura física.

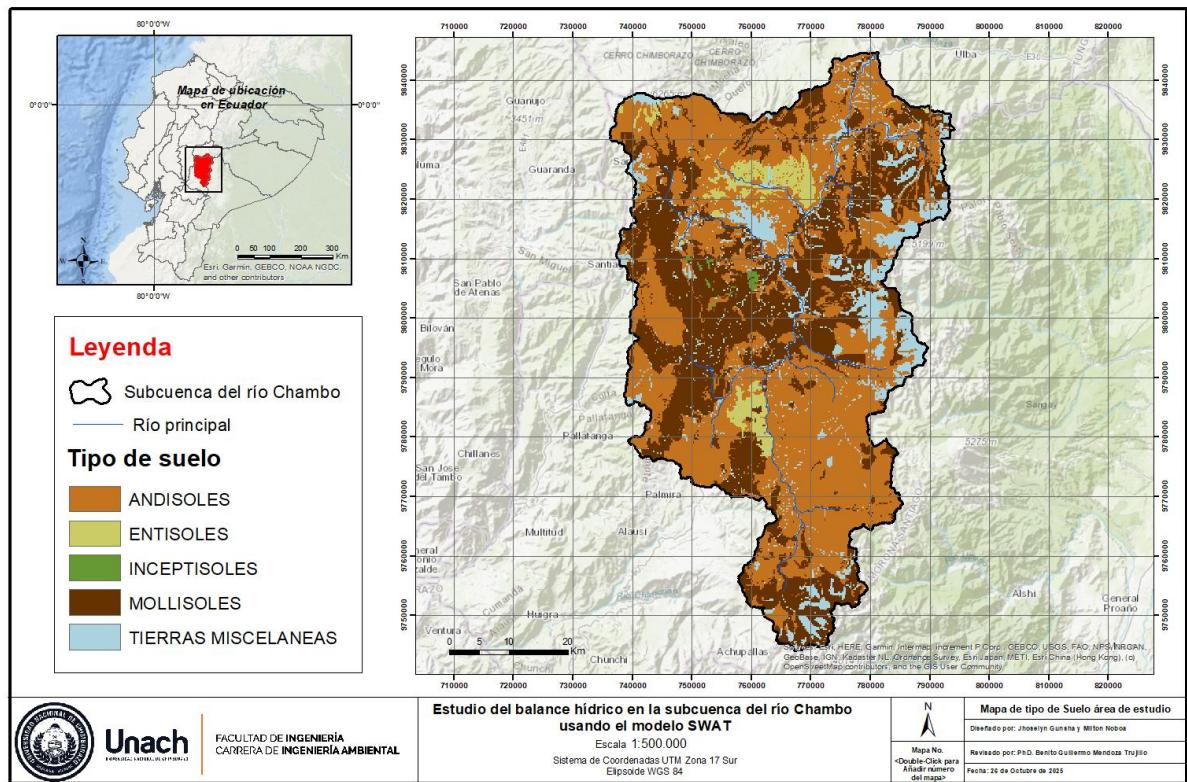
	Erial	Áreas desprovistas de	14632,14
		vegetación, no son	
		aprovechadas para uso	
<b>Tierra sin cobertura vegetal</b>		agropecuario o forestal.	4,5
	Glaciar	Masa de hielo acumulada en	1438,88
		las zonas de las cordilleras	
		por encima del límite de las	
		nieves perpetuas.	

*Notas.* Valores expresados en hectáreas (ha) y porcentaje (%) respecto al área total de la subcuenca. Las categorías se agrupan en niveles jerárquicos según la clasificación del MAG.

### 3.6.3 Tipo de suelo

Con la información recibida por parte del Ministerio de Agricultura y Ganadería del Ecuador (MAG), a escala 1:25.000 del periodo 2009 – 2015, se realizó una transcripción de los parámetros fisicoquímicos de 11 unidades de suelo al interior de la subcuenca del río Chambo, de estos datos se obtuvieron 13 parámetros para el funcionamiento del modelo SWAT.

**Figura 3** Mapa de los Tipos de suelo de la subcuenca del río Chambo



*Nota.* Clasificación edafológica según el tipo de suelo presente en el área de estudio. Los Andisoles ocupan gran parte del área, favoreciendo la retención de humedad.

**Tabla 3 Características fisicoquímicas del suelo de la subcuenca del río Chambo**

No.	Tipo de suelo	Textura	Grupo hidrológico	(K) US	SOL_Z profundidad (mm)	SOL_BD densidad aparente (g/cm3)	SOL_AWC disponibilidad de agua en el suelo (mm/mm)	SOL_K conductividad hidráulica (mm/hr)	SOL_no (%)	% CARBO (CLAY)	% ARCIL (SILT)	% LIM (SAND)	% ARENA	% ROC K
1	Mollisoles	Arcillo-Limoso	D	0,3	300	1,50	0,18	4,67	0,50	18	59	23	0	
				2										)
2	Mollisoles	Arcilloso	D	0,2	1000	1,30	0,13	7,85	0,70	45	33	22	0	
				2										
3	Entisoles	Arena	B	0,2	1000	1,70	1,70	90,96	0,30	5	5	91	0	
				6										
4	Andisoles	Areno-Francoso	B	0,0	910	0,60	0,11	115,77	14,70	12	18	71	0	
				0										

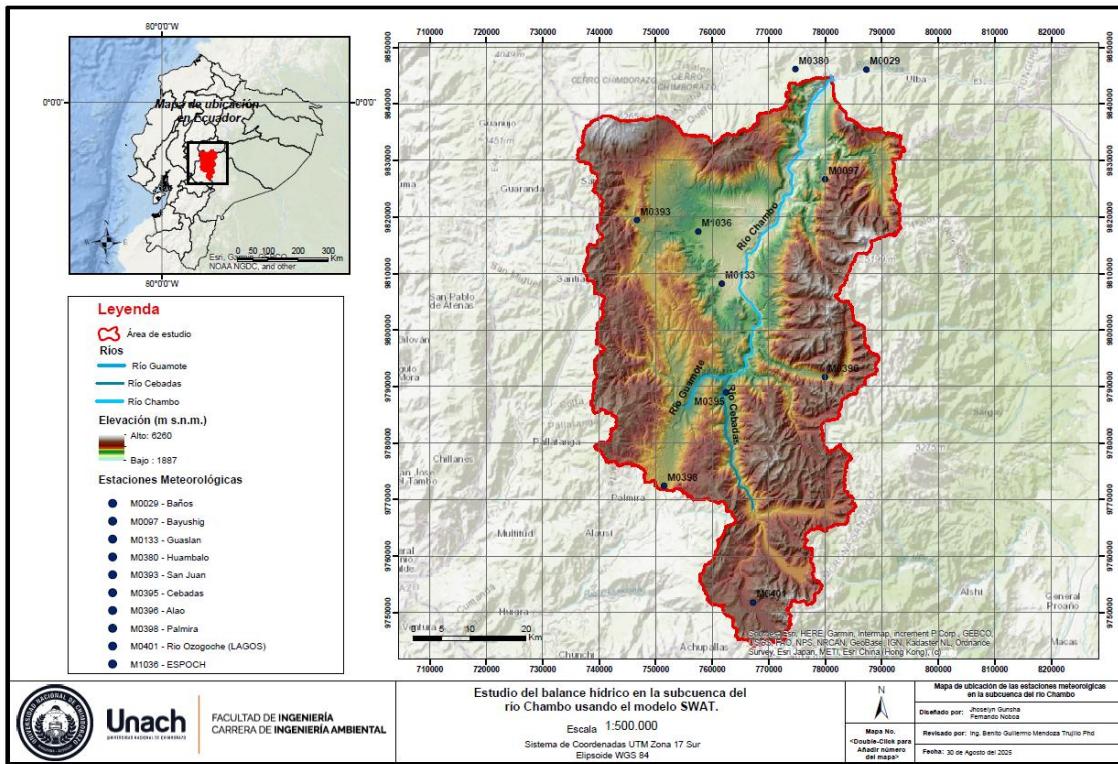
5	Mollisoles	Franco	B	0,0	880	0,70	0,20	164,14	7,00	18	45	38	0
				9									
6	Inceptisole	Franco Arcillo-	C	0,2	1000	1,40	0,16	17,54	1,50	27	7	66	0
	s	Arenoso		0									
7	Mollisoles	Franco Arcillo-	C	0,3	1000	1,30	0,18	9,76	0,80	20	50	30	0
		Limoso		0									
8	Mollisoles	Franco-Arcilloso	C	0,2	630	1,00	0,13	35,83	3,10	36	30	34	0
				5									
9	Andisoles	Franco-Arenoso	B	0,2	530	1,20	0,06	85,95	1,20	10	10	80	0
				7									
10	Mollisoles	Franco-Limoso	C	0,3	800	1,30	0,14	11,68	1,00	17	52	31	0
				1									
11	No	Cuerpo de Agua	D	0	25,4	0	0	99	0	0	0	0	0
	Aplicable	Natural											

Nota. Parámetros edafológicos ingresados en la base de datos de suelos del modelo SWAT. K= factor de erodabilidad; SOL\_Z= profundidad del perfil; SOL\_BD= densidad aparente; SOL\_AWC= capacidad de agua disponible.

### 3.6.4 Información climática

Para la obtención de la información climática se utilizaron datos provenientes del Instituto Nacional de Meteorológica e Hidrología (INAMHI) ubicados en el exterior e interior de la subcuenca del río Chambo. Las estaciones proporcionaron registros históricos de variables como precipitación, temperatura (máxima y mínima), radiación solar, humedad relativa y velocidad del viento necesarias para la parametrización del modelo SWAT. El detalle de estas estaciones y la ubicación de estas se pueden observar en la **Figura 4** y **Tabla 4**.

**Figura 4** Ubicación de las estaciones meteorológicas en la subcuenca del Río Chambo



*Nota.* Distribución espacial de los puntos de monitoreo climático del INAMHI utilizados para el modelo hidrológico.

**Tabla 4** Estaciones proporcionadas por el INAMHI al exterior e interior de la subcuenca del río Chambo

Nombre	Clase	Código	Latitud	Longitud	Altitud
<b>Alao</b>	MET	M0396	9791632,147	779982,183	3700
<b>Baños</b>	MET	M0029	9846052,142	787319,427	1820
<b>Bayushig</b>	MET	M0097	9826667,605	780028,538	3350
<b>Cebadas</b>	MET	M0395	9788952,501	762446,149	2930
<b>ESPOCH</b>	MET	M1036	9817382,874	757541,971	2754
<b>Guaslán</b>	MET	M0133	9808174,622	761698,264	2850
<b>Huambaló</b>	MET	M0380	9846139,360	774750,435	2880
<b>Palmira</b>	MET	M0398	9772435,932	751509,536	3180
<b>Río OZOGOCHE</b>	MET	M0401	9751762,089	767243,995	3715
<b>(LAGOS)</b>					
<b>San Juan</b>	MET	M0393	9819450,821	746696,140	3220

*Nota.* Listado de las 10 estaciones meteorológicas utilizadas, incluyendo su ubicación geográfica y altitud, fundamentales para la interpolación climática en el modelo.

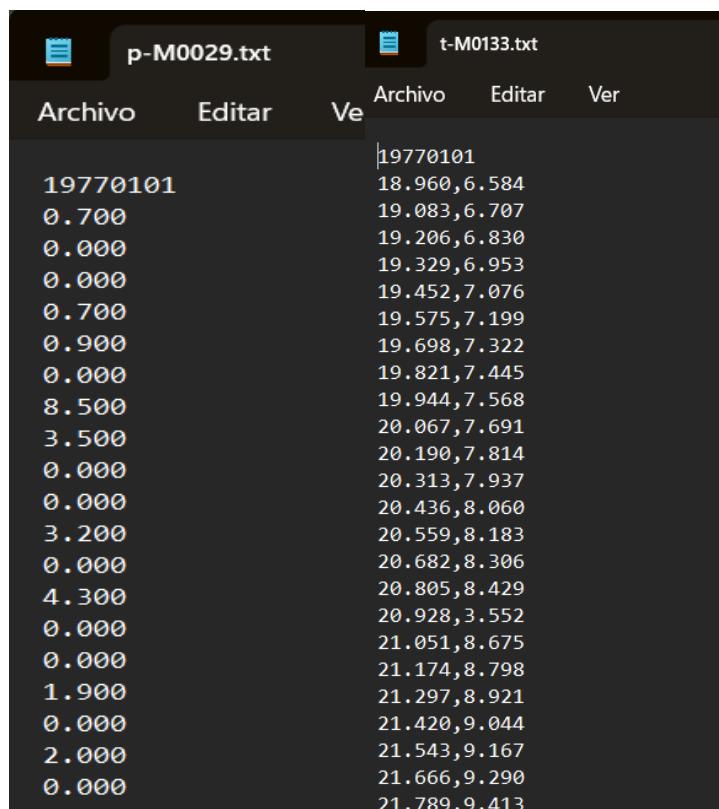
### 3.7 Fase II: Aprestamiento de la información

En esta fase se realizó el procesamiento y estandarización de la información recopilada, conforme a los formatos requeridos por el modelo SWAT. Posterior a la generación y recopilación de la información, se llevó a cabo un proceso minucioso orientado a la construcción de la base de datos requerido por el modelo.

### 3.7.1 Variables Climáticas

La información climática suministrada por el INAMHI se encuentra en un formato no legible para el programa, por ello se creó un archivo por cada una de las variables climáticas, de cada una de las estaciones a usar como la observada en la **Figura 5**.

**Figura 5** Formatos variables climáticas por estación



p-M0029.txt		t-M0133.txt		
Archivo	Editar	Archivo	Editar	Ver
				19770101
19770101				18.960,6.584
0.700				19.083,6.707
0.000				19.206,6.830
0.000				19.329,6.953
0.700				19.452,7.076
0.900				19.575,7.199
0.000				19.698,7.322
8.500				19.821,7.445
3.500				19.944,7.568
0.000				20.067,7.691
3.200				20.190,7.814
0.000				20.313,7.937
0.000				20.436,8.060
0.000				20.559,8.183
4.300				20.682,8.306
0.000				20.805,8.429
0.000				20.928,8.552
0.000				21.051,8.675
1.900				21.174,8.798
0.000				21.297,8.921
2.000				21.420,9.044
0.000				21.543,9.167
				21.666,9.290
				21.789,9.413

*Nota.* Ejemplo de la estructura de archivos de (.txt) requerido por SWAT para los datos climáticos.

Para la incorporación de cada una de las variables climáticas requeridas por el modelo SWAT, tales como la precipitación, temperatura, radiación solar, humedad relativa y velocidad del viento. Así es que requiere en su interfaz, así como en el código fuente recibir estos datos meteorológicos en un formato específico, que según Neitsch et al., (2011) es tal como el mostrado en la **Figura 5**, donde el número 19770101 en formato

año, mes y día, indica el inicio de la serie temporal, para después colocar de manera vertical los datos diarios, permitiendo así que no se generen errores.

### 3.7.2 Cobertura y uso

Para la capa de cobertura y uso de suelo se realizó una reclasificación de las categorías de cobertura por las clasificaciones asignados en el apéndice A de la guía para el uso e implementación del modelo SWAT.

**Tabla 5** Clasificación coberturas SWAT

No.	Coberturas MAG (Nivel 2)	Código SWAT
1	Páramo	RNGE
2	Pastizal	PAST
3	Cultivo	AGRL
4	Mosaico Agropecuario	AGRL
5	Otras Tierras Agrícolas	AGRL
6	Plantación Forestal	FRST
7	Vegetación Herbácea	RNGE
8	Bosque Nativo	FRST
9	Vegetación Arbustiva	RNGB
10	Área Poblada	URBN
11	Cuerpo de Agua Natural	WATR
12	Erial	BARR
13	Infraestructura	UINS
14	Cuerpo de Agua Artificial	WATR
15	Glaciar	SNOW

*Nota.* Homologación de las categorías de cobertura vegetal de la subcuenca del río Chambo con los códigos estandarizados por la base de datos del modelo SWAT.

### 3.7.3 Tipos de Suelo

Para la clasificación de los tipos de suelo se usó la textura como base para identificar el Código SNAM correspondiente, esta codificación es el formato requerido por el modelo SWAT para el ingreso y procesamiento de los datos edafológicos (características fisicoquímicas) de la subcuenca como se observa en la **Tabla 6**.

**Tabla 6** Codificación SNAM de las unidades de suelo según su textura.

No.	Textura	CODIGO SNAM
1	Arcillo-Limoso	Xh2-a-5698
2	Arcilloso	Vc2-3a-5686
3	Arena	Rd1-1b-5648
4	Areno-Francoso	Ph3-1b-5796
5	Franco	Th4-c-5670
6	Franco Arcillo-Arenoso	Fa2-2a-5417
7	Franco Arcillo-Limoso	Xh4-2a-5700
8	Franco-Arcilloso	Bh3-3c-5411
9	Franco-Arenoso	Kh1-1a-5778
10	Franco-Limoso	Xh3-b-5699
11	Cuerpo de Agua Natural	WATER-6997

*Nota.* Asignación de códigos SNAM para vincular el mapa de suelos con la base de parámetros fisicoquímicos requeridos por SWAT.

### 3.8 Fase III: Implementación del modelo

Siguiendo el protocolo de configuración de ArcSWAT descrito por Neitsch et al. (2011), se ejecutaron las siguientes actividades:

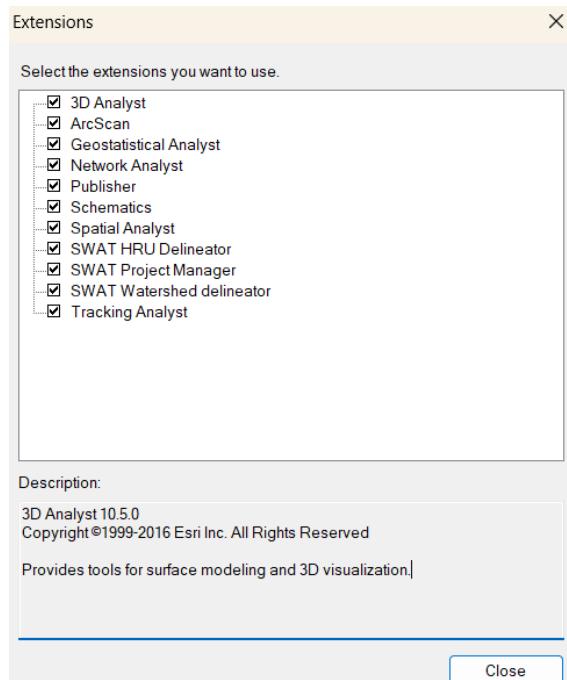
#### 3.8.1 Configuración del Proyecto y Carga de Datos Espaciales

El primer paso consistió en preparar el entorno de trabajo en ArcMap y cargar los datos base que definen la topografía y las características físicas de la subcuenca.

##### 3.8.1.1 Activación del complemento ArcSWAT en ArcMap.

Se habilitaron las extensiones de ArcSWAT (SWAT HRU Delineador, SWAT Project Manager, etc.) y las herramientas de análisis espacial (Spatial Analyst, 3D Analyst).

**Figura 6** Activación de la extensión SWAT dentro de la interfaz de ArcGIS

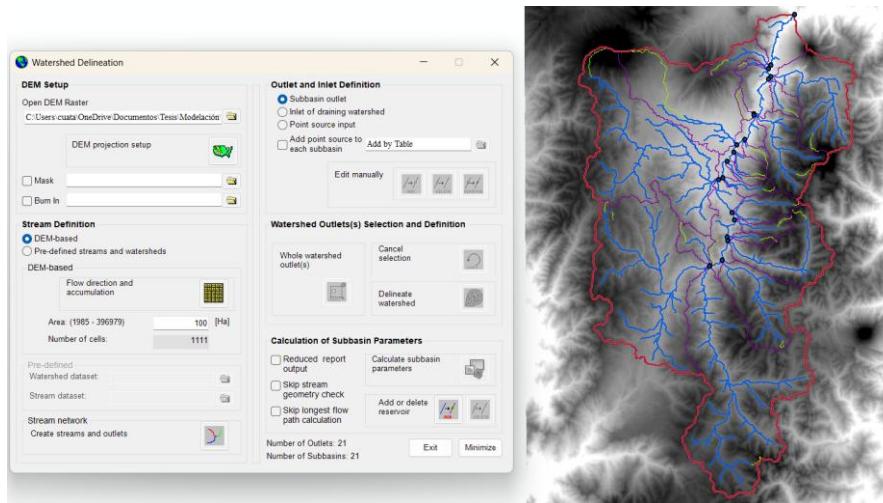


*Nota.* Configuración del software necesario para habilitar las herramientas de modelación hidrológica.

### 3.8.1.2 Creación del Proyecto y Delimitación

Se creó un nuevo proyecto SWAT y se cargó el Modelo Digital de Elevación (MDE), el cual es el insumo base para que el modelo delimite automáticamente la subcuenca y genere la red de drenaje.

**Figura 7** Carga del modelo de elevación digital (MDE)

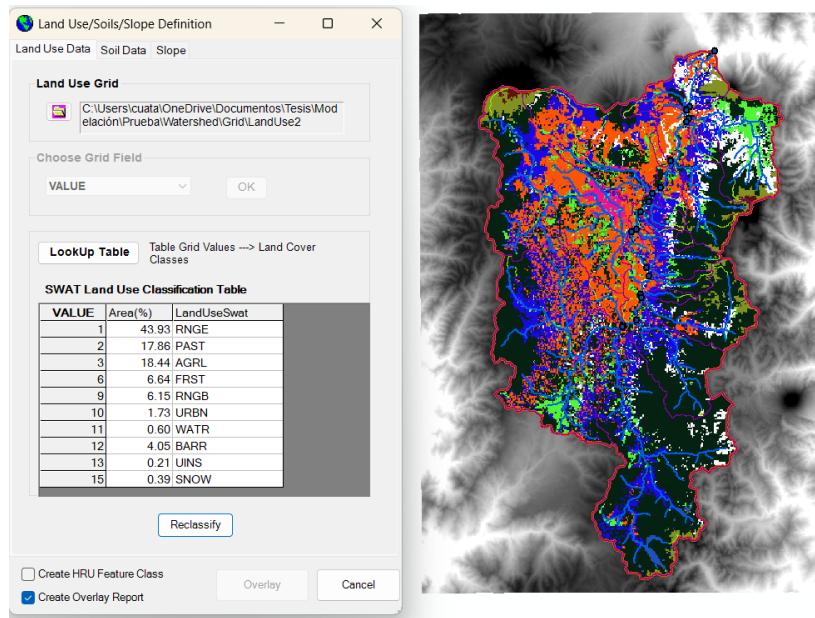


*Nota.* Proceso de delimitación automática de la subcuenca y generación de la red de drenaje basado en la topografía del terreno.

### 3.8.1.3 Carga de Capas de Uso y Suelo

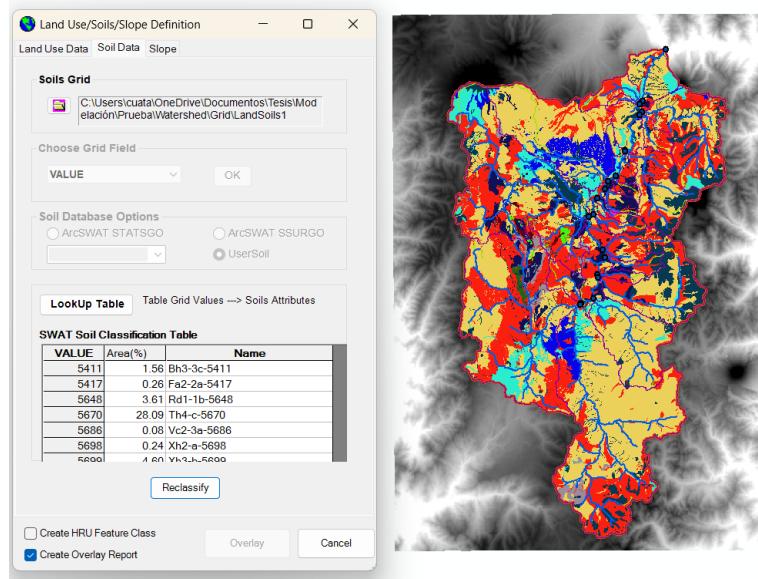
Se cargaron las capas de “Uso y Cobertura Vegetal” y “Tipo de Suelo” que fueron previamente reclasificados (como se describió en la **Fase II, Tabla 5 y 6**).

**Figura 8 Carga de la Capa de Uso y Cobertura Vegetal**



*Nota.* Incorporación del mapa en formato ráster de la capa de uso y cobertura del suelo a la base de datos de parámetros del modelo SWAT, esto mediante la tabla de reclasificación.

**Figura 9 Carga de la Capa de los Tipos de suelo**



*Nota.* Asignación de las propiedades físicas y químicas a las unidades de suelo del mapa mediante los códigos SNAM definidos anteriormente.

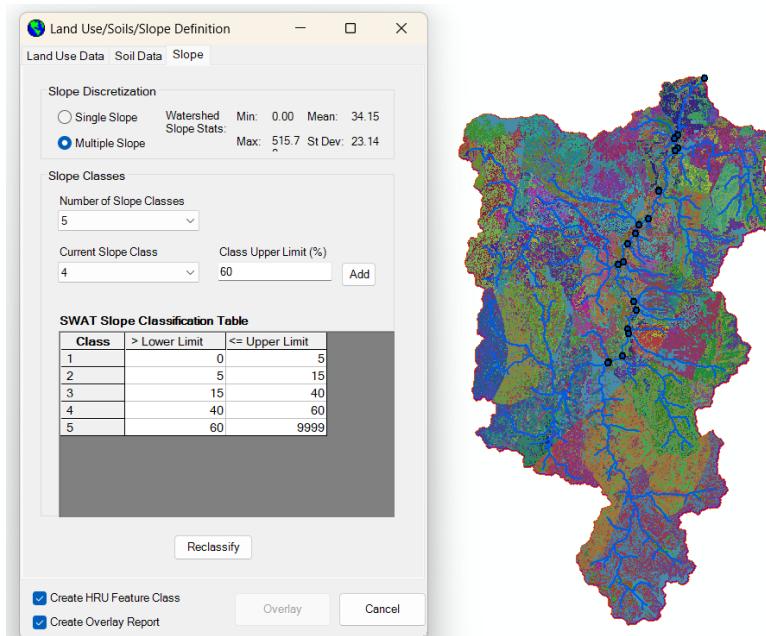
### 3.8.2 Caracterización de la Subcuenca y Definición de HRUs

Con los datos espaciales cargados, se procedió a discretizar (dividir) la subcuenca en unidades de análisis más pequeñas.

#### 3.8.2.1 Clasificación de Pendientes

Se utilizó el MDE para calcular y reclasificar las pendientes del terreno. Se definieron 5 clases.

**Figura 10** Clasificación de pendientes



*Nota.* Elaboración del proceso de reclasificación en cinco rangos del mapa de pendientes de la subcuenca del río Chambo, donde las zonas rojas representan a las pendientes más fuertes ( $>60\%$ ), en las cuales se da una rápida escorrentía superficial.

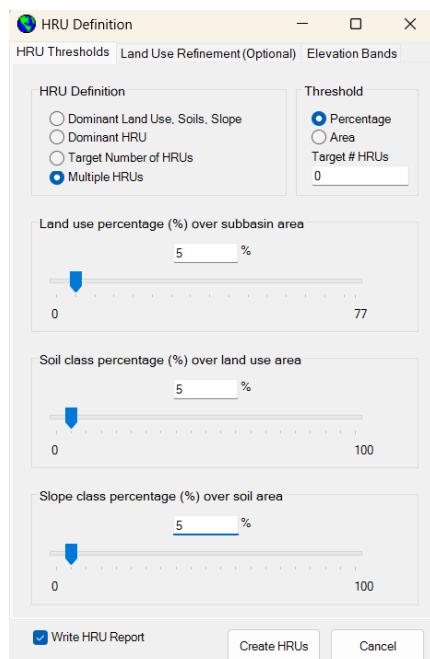
Los rangos de pendiente (0-5%, 5-15%, 15-40%, 40-60% y  $>60\%$ ) se establecieron para reflejar las diferentes aptitudes del suelo y respuestas hidrológicas. El rango 0-5% representa zonas planas (valles); 5-15% y 15-40% representan laderas con

actividad agrícola y pecuaria; y los rangos superiores ( $>40\%$ ) se asocian a zonas de fuerte escarpe, páramos y áreas de protección donde se espera mayor escorrentía superficial.

### 3.8.2.2 Generación de Unidades de Respuesta Hidrológica (HRUs):

Este es el paso clave donde el modelo superpone las tres capas (Uso de suelo, Tipo de suelo y Pendiente) para crear unidades homogéneas únicas.

**Figura 11 Clasificación de HRUs**



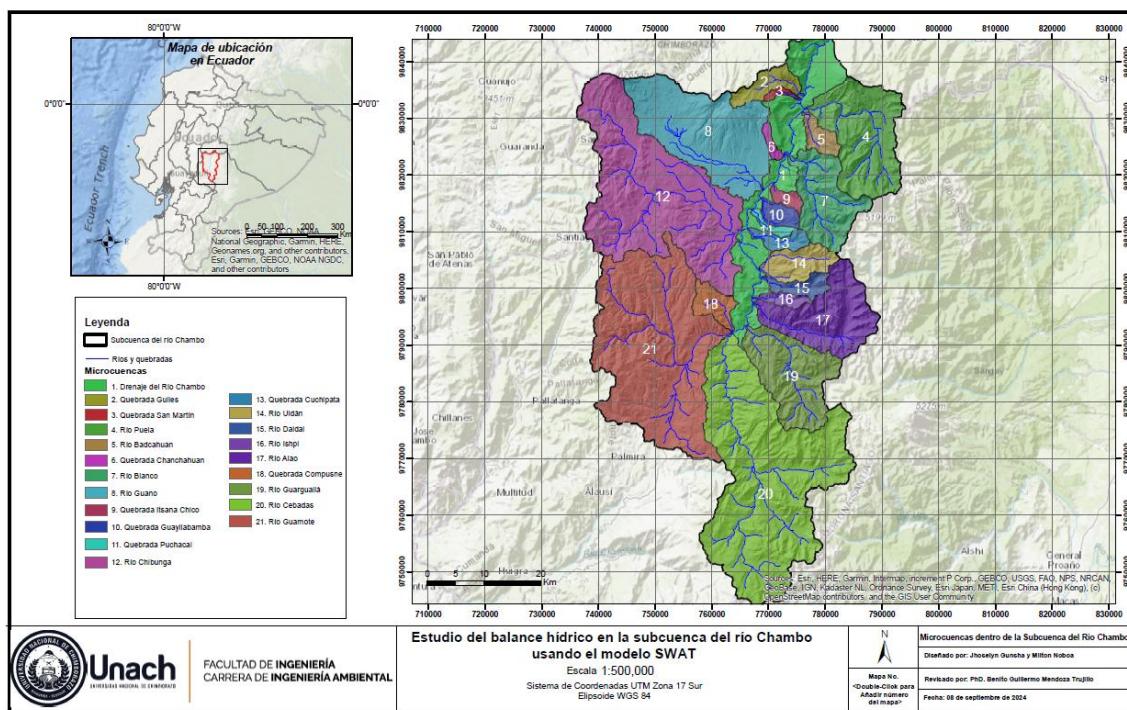
*Nota.* Configuración de los umbrales para la definición de las unidades de respuesta hidrológica, eliminando los polígonos menos representativos para optimizar el modelamiento.

Se seleccionó el método de “Múltiples HRUs” y se establecieron umbrales de 5% para uso de suelo, 5% para tipo de suelo y 5% para clase de pendiente. Esta configuración representa un equilibrio metodológico: umbrales más altos (20%) habrían simplificado en exceso la subcuenca, omitiendo combinaciones importantes. Por lo contrario, umbrales más bajos (1%) habrían creado un número excesivo de HRUs, incrementando la

complejidad de la calibración sin un beneficio proporcional. El umbral del 5% permite capturar la heterogeneidad dominante de la subcuenca de forma eficiente.

Definido el límite de la subcuenca con un área 3572 km<sup>2</sup>, fue necesario subdividirlas en 21 microcuenca **Figura 12** con el objetivo de mejorar la exactitud en los cálculos de caudales para posteriormente en el modelo SWAT definir las URH (Unidades de Respuesta Hidrológica).

**Figura 12** Mapa de microcuenca en el área de estudio



*Nota.* Se realizó la división de la subcuenca del río Chambo, en 21 unidades de drenaje menores, esto para un análisis detallado de las afluentes que brindan su aporte hídrico al río Chambo.

**Tabla 7 Parámetros generales de la subcuenca**

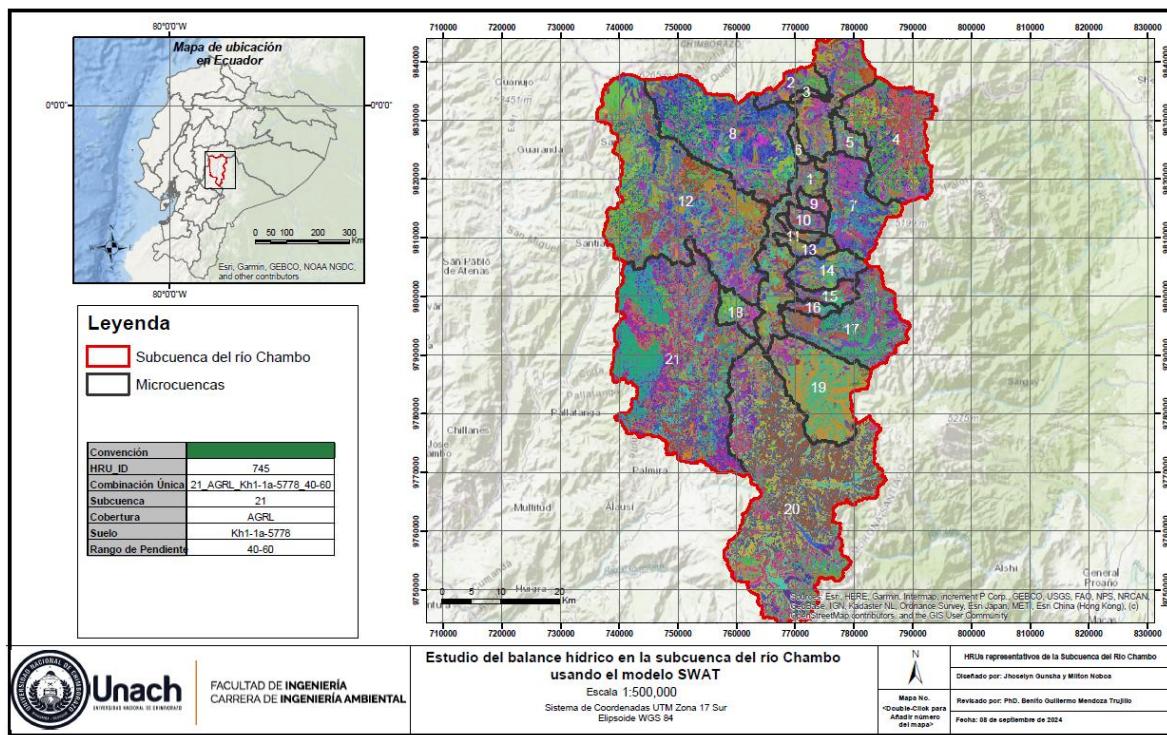
Subcuenca	Nombre	Lat	Long	Elev	ElevMin	ElevMax	Área (km <sup>2</sup> )
				(m.s.n.m)			
1	Drenaje del Río Chambo	-1,62	-78,56	2859,48	1887	4943	283,92
2	Quebrada Guiles	-1,49	-78,58	3499,04	2305	4209	43,17
3	Quebrada San Martín	-1,50	-78,56	3371,85	2309	3841	7,16
4	Río Puela	-1,57	-78,56	3526,63	2325	5184	232,60
5	Río Badcahuan	-1,57	-78,49	3160,70	2331	4074	29,07
6	Quebrada Chanchahuan	-1,58	-78,57	3009,10	2391	3513	10,53
7	Río Blanco	-1,67	-78,48	3769,19	2386	5189	144,76
8	Río Guano	-1,56	-78,67	3356,75	2455	5850	325,53
9	Quebrada Itsana Chico	-1,67	-78,54	3269,38	2434	4306	14,80
10	Quebrada Guayllabamba	-1,69	-78,56	3341,80	2481	4400	24,43
11	Quebrada Puchacal	-1,71	-78,57	3244,59	2520	4373	12,52
12	Río Chibunga	-1,66	-78,75	3450,41	2580	6260	573,43
13	Quebrada Cuchipata	-1,73	-78,55	3508,78	2567	4482	25,88
14	Río Uldán	-1,77	-78,53	3712,41	2664	4719	63,05

<b>15</b>	Río Daldal	-1,80	-78,52	3778,24	2706	4613	30,51
<b>16</b>	Río Ishpi	-1,83	-78,55	3694,77	2746	4440	17,35
<b>17</b>	Río Alao	-1,85	-78,48	3764,65	2790	4657	186,42
<b>18</b>	Quebrada Compusne	-1,83	-78,66	3321,78	2841	3588	38,95
<b>Área de la Subcuenca</b>							<b>3572,05</b>

*Nota.* Determinación de las características geográficas de las 21 microcuenca delimitadas y simuladas dentro de la subcuenca del río Chambo.

Por medio de la integración de la información mencionada anteriormente, se determinaron 774 Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU) en la subcuenca de estudio, las cuales corresponden a unidades del territorio que presentan condiciones de uso de tierra, suelo y topografía y por lo tanto producen un impacto particular sobre la cantidad y calidad del agua de la subcuenca **Figura 13**. Con la información de las HRU, es posible identificar que áreas son las que contribuyen más al aporte de caudal.

**Figura 13 Unidades de respuesta Hidrológica del área de estudio**



*Nota.* En el presente mapa se puede visualizar las 774 HRUs generadas por el modelo, y a su vez, se determinó que la combinación HRU más representativa fue la 745.

**Tabla 8 HRUs más representativos de cada microcuenca de la subcuenca del río Chambo**

Microcuenca	HRU_ID	Área (ha)	Combinación Pendiente	(Uso, Suelo y)
1	41	2351,9	AGRL_Kh1-1a-5778_15-40	
2	109	873,9	AGRL_Th4-c-5670_15-40	
3	123	104,8	RNGE_Th4-c-5670_15-40	
4	155	2468,4	AGRL_Th4-c-5670_15-40	
5	209	461,3	AGRL_Th4-c-5670_40-60	
6	226	390,8	PAST_Kh1-1a-5778_15-40	

<b>7</b>	274	1609,3	AGRL_Th4-c-5670_60-9999
<b>8</b>	335	225,3	AGRL_Xh3-b-5699_40-60
<b>9</b>	360	5003,2	AGRL_Kh1-1a-5778_15-40
<b>10</b>	386	481,1	AGRL_Xh3-b-5699_15-40
<b>11</b>	402	202,5	AGRL_Th4-c-5670_15-40
<b>12</b>	465	4714.8	AGRL_Th4-c-5670_15-40
<b>13</b>	539	735,5	AGRL_Th4-c-5670_15-40
<b>14</b>	550	1054,6	AGRL_Th4-c-5670_15-40
<b>15</b>	579	493,8	AGRL_WATER-6997_60-9999
<b>16</b>	591	231,7	AGRL_Th4-c-5670_40-60
<b>17</b>	599	2407,1	AGRL_Kh1-1a-5778_60-9999
<b>18</b>	655	781,1	PAST_Th4-c-5670_15-40
<b>19</b>	682	6010,2	AGRL_Kh1-1a-5778_15-40
<b>20</b>	723	12436,4	AGRL_Kh1-1a-5778_15-40
<b>21</b>	744	21039,6	AGRL_Kh1-1a-5778_15-40

*Nota.* Determinación de la unidad de respuesta hidrológica (HRU) más representativa de cada microcuenca, cada una definida por la combinación única de uso de suelo, tipo de suelo y pendiente.

### 3.8.3 Configuración y Ejecución del Modelo Base

Finalmente, se cargaron los datos climáticos y se ejecutó el modelo por primera vez para generar los resultados base que se usaron en la **Fase IV** (Calibración).

#### 3.8.3.1 Carga de Datos Climáticos

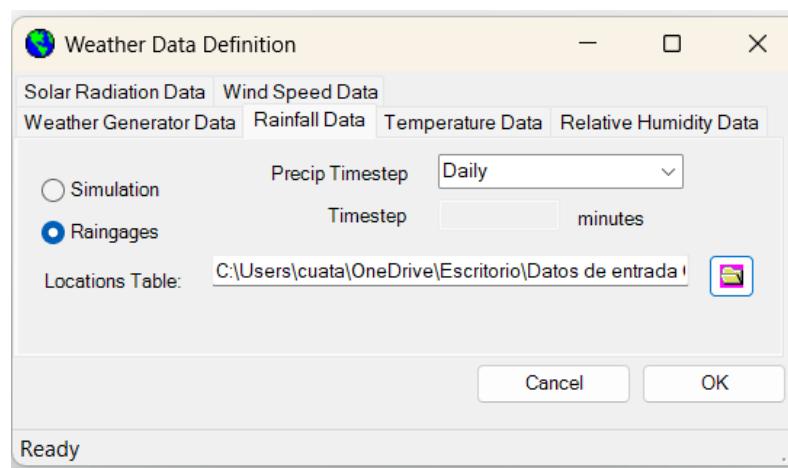
Se cargaron las series temporales de precipitación, temperatura, humedad relativa, radiación solar y viento de las estaciones del INAMHI, utilizando los formatos de archivo requeridos por SWAT.

**Figura 14** Registro de estaciones meteorológicas

■ DGP			
■ p-M0029	t-M0133	■ rh	■ s-M0133
■ p-M0097	t-M0395	■ r-M0133	■ wind
■ p-M0133	t-M0398	■ r-M0395	■ w-M0133
■ p-M0380	t-M1036	■ r-M0398	■ w-M0395
■ p-M0393	■ tmp	■ r-M1036	■ w-M0398
■ p-M0395		■ solar	■ w-M1036
■ p-M0396			
■ p-M0398			
■ p-M0401			
■ p-M1036			

*Nota.* Base de datos de archivos climáticos preparados y organizados para que el modelo SWAT pueda leerlos correctamente.

**Figura 15** Incorporación de datos meteorológicos dentro de la interfaz de ArcSWAT



*Nota.* Configuración de los datos de entrada dentro de la interfaz de ArcSWAT, asignando la ubicación y series temporales de las estaciones meteorológicas de estudio.

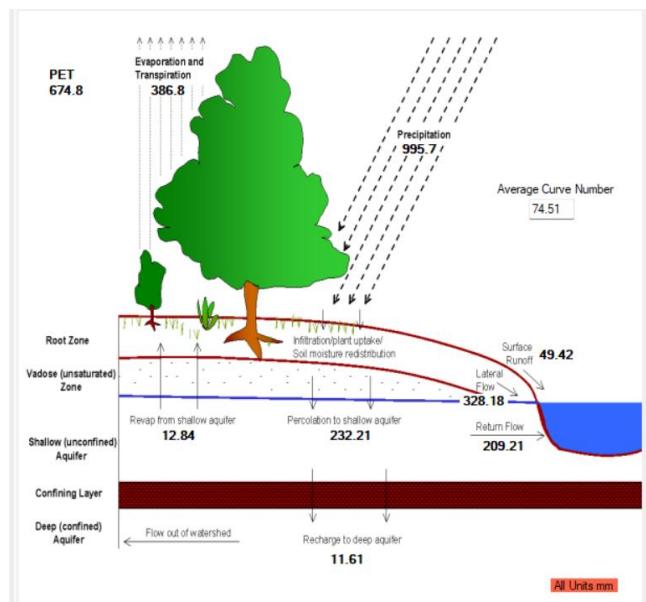
### 3.8.3.2 Definición del Período de Simulación

Se estableció el período total de simulación desde el 1 de enero de 1977 hasta 31 de diciembre de 2021. Los primeros 3 años se designaron como periodo de calentamiento (warm-up). Este paso es esencial para permitir que el modelo estabilice sus variables de estado antes de iniciar el periodo de análisis.

### 3.8.3.3 Ejecución del Modelo Base

Se ejecutó la simulación completa (Run SWAT). Esta ejecución genero los archivos de salida base (sin calibrar), los cuales son el insumo directo para la **Fase IV: Análisis de Sensibilidad y Calibración**. La **Figura 16** muestra un esquema gráfico del balance hídrico promedio resultante de esta simulación preliminar.

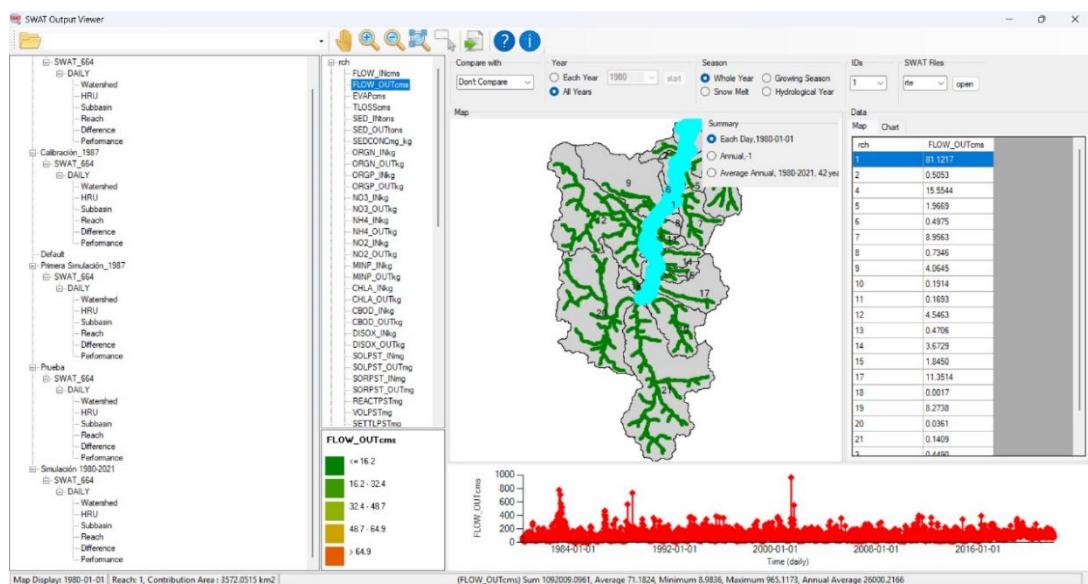
**Figura 16** Ejecución preliminar del modelo hidrológico (1980-2000)



*Nota.* Gráfico inicial de los componentes del balance hídrico (precipitación, evapotranspiración, escorrentía y los flujos subterráneos), antes del proceso de calibración.

Asimismo, los resultados de la simulación hidrológica fueron analizados a través de la herramienta SWAT Output Viewer, que permite visualizar las principales variables modeladas por subcuenca. Esta interfaz facilitó la interpretación espacial del comportamiento del caudal medio simulado durante el periodo 1980 – 2021, evidenciando las zonas con mayor aporte de escorrentía y aquellas con menor generación de caudal, lo cual resulta fundamental para comprender la dinámica del balance hídrico en la subcuenca del río Chambo.

**Figura 17** Visualización del caudal medio simulado en el SWAT Output Viewer



*Nota.* Resultados de la primera modelación del caudal en cms( $m^3/s$ ) de la subcuenca del río Chambo, donde la línea roja representa los cambios que ha tenido el mismo a través del periodo de tiempo 1980-2021.

### 3.9 Fase IV: Análisis de Sensibilidad, Calibración y validación del modelo

#### 3.9.1 Análisis de Sensibilidad

El modelo SWAT contiene una gran cantidad de parámetros que representan los procesos hidrológicos. Por esta razón, el primer paso fue realizar un análisis de

sensibilidad para identificar que parámetros ejercen la mayor influencia sobre el caudal simulado en la subcuenca del río Chambo.

Este análisis permitió enfocar el esfuerzo de calibración únicamente en los parámetros más influyentes, haciendo el proceso más eficiente. A partir de esto se seleccionó el siguiente conjunto que se observa en la **Tabla 9** para el ajuste del modelo.

**Tabla 9** Selección de parámetros para calibrar el modelo SWAT

Parámetro	Descripción	Unidad	Rango
<b>CN2</b>	Parámetro empírico utilizado para la predicción de escorrentía directa o infiltración producida por la precipitación.	-	0 – 100 <b>Teórico</b>
<b>ALPHA_BF</b>	Índice de respuesta del flujo base a la recarga del acuífero.	días	0 - 1 (días <sup>-1</sup> )
<b>GW_DELAY</b>	Tiempo (días) que tarda el agua en llegar al acuífero desde el suelo.	días	$\geq 0$ (días)
<b>GWQMN</b>	Cantidad de agua (mm) necesaria en el acuífero para que inicie el flujo base.	mm H <sub>2</sub> O	$\geq 0$ (mm)
<b>GW_REVAP</b>	Controla el movimiento de agua del acuífero de regreso a la zona de raíces.	mm H <sub>2</sub> O/h	0 - 0.2

<b>ESCO</b>	Permite extraer agua de capas profundas del suelo para la evaporación.	-	0 - 1.0
<b>CH_N2</b>	Coeficiente de rugosidad que representa la resistencia al flujo en el cauce.	-	> 0
<b>CH_K2</b>	Permeabilidad del lecho del río que controla las pérdidas de agua.	mm/h	$\geq 0$ (mm/hr)
<b>ALPHA_BNK</b>	Velocidad a la que el agua de las orillas regresa al cauce tras una crecida.	días	0 – 1
<b>SOL_AWC</b>	Cantidad de agua que el suelo puede retener para las plantas.	mm H <sub>2</sub> O mm soil	> 0 - $\approx 0.4$
<b>SOL_K</b>	Facilidad con la que el agua se mueve a través del suelo saturado.	mm/h	> 0
<b>SOL_BD</b>	Nivel de compactación del suelo (masa/volumen).	(g/cm <sup>3</sup> )	$\approx 1.0$ - 1.9

Se determinó las variables hidrológicas seleccionadas para el proceso de calibración debido a su influencia teórica en el balance hídrico, incluyendo los rangos permitidos dentro del modelo (Neitsch et al., (2011)).

### 3.9.2 Calibración del Modelo

La calibración del modelo SWAT se realizó para el periodo 2000 – 2010 con el fin de ajustar los parámetros hidrológicos clave. El objetivo de este ajuste fue lograr que

los caudales simulados se asemejen con los caudales observados en la estación Chambo en hacienda Cahuaji (H0826), ubicada a la salida de la subcuenca.

El procedimiento de calibración se basó en el método manual de “Prueba y Error”, de acuerdo con lo descrito por Cabrera (2019) en el documento de “*Calibración de modelos hidrológicos*”. La calidad del ajuste se evaluó mediante el coeficiente de Nash y Sutcliffe (NSE) (**Ecuación 2**), por ser un indicador comúnmente utilizado para la validación de modelos hidrológicos.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (Ecuación 2)$$

Donde:

- $Q_{obs,i}$ : Caudal Observado
- $Q_{sim,i}$ : Caudal Simulado
- $\bar{Q}_{obs}$ : Promedio del caudal observado

**Tabla 10** Interpretación del parámetro NSE para la calibración y validación

	Criterio	Valor	Clasificación
NSE		1,0	Simulación perfecta
		0,75 a 1,0	Simulación muy buena
		0,50 a 0,75	Simulación aceptable
		< 0,5	Mala simulación

En la presente tabla se determinan los criterios estadísticos utilizados para evaluar el modelo hidrológico mediante el NSE (Coeficiente de Eficiencia Nash-Sutcliffe, determinado por Moriasi et al. (1983).

### 3.9.3 Validación del modelo

La validación del modelo SWAT se llevó a cabo para el periodo 2011 – 2021, un periodo independiente y distinto al utilizado durante la calibración.

El propósito de esta etapa fue verificar la capacidad del modelo para simular los caudales sin realizar ajustes adicionales, utilizando el conjunto de parámetros hidrológicos definidos en la fase de calibración. Al igual que en la calibración, se compararán los caudales simulados como los caudales observados en la estación H0826 Chambo en Hacienda Cahuaji. La calidad del ajuste se evaluó nuevamente con el coeficiente de Nash y Sutcliffe (NSE) (**Ecuación 2**) y los criterios de clasificación de la

**Tabla 9.**

### 3.10 Fase V: Análisis de los resultados obtenidos

En esta fase, se evaluaron los puntos de mayor potencialidad hídrica identificados previamente mediante el modelo SWAT, obteniendo información que muestra si los parámetros utilizados en el modelo se ajustan a la realidad hidrológica de la subcuenca, quedando descrito qué parámetros necesitan más estudio para lograr obtener resultados que estén ajustados a la realidad. Por otra parte, se generó información sobre el balance hídrico identificando las áreas que pueden estar expuestas a déficit de agua en la subcuenca del río Chambo.

## CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Análisis de sensibilidad de los parámetros

Como paso previo a la calibración, se ejecutó el análisis de sensibilidad para identificar y clasificar los parámetros hidrológicos según su influencia en la simulación de caudal. El propósito fue enfocar el esfuerzo de la calibración manual en aquellos parámetros que generan un mayor impacto en los resultados del modelo.

Los resultados de este análisis se presentan en la **Tabla 11**, donde los parámetros están clasificados en orden descendente, desde el más sensible (Rango 1) hasta el menos sensible (Rango 12).

**Tabla 11** *Clasificación de la sensibilidad de los parámetros utilizados para calibrar y validar el caudal (clasificados en orden descendente desde los más sensibles hasta los menos sensibles).*

Rango	Parámetro	Intervalo		Intervalo final		NSE	
		inicial	mensual	Min	Max	Min	Max
<b>1 (Más Sensible)</b>	CH_K2	5	130	16,9	64,0	0,31	0,55
<b>2</b>	ALPHA_BNK	0	1	0,1	0,5	0,29	0,54
<b>3</b>	GW_DELAY	30	450	282,8	348,4	0,28	0,53
<b>4</b>	SOL_K	-0,8	0,8	-0,2	-0,1	0,30	0,52
<b>5</b>	SOL_BD	-0,5	0,6	0,1	0,3	0,30	0,50
<b>6</b>	SOL_AWC	-0,2	0,4	-0,4	-0,2	0,30	0,50
<b>7</b>	ESCO	0,8	1	1,0	1,0	0,29	0,50
<b>8</b>	CN2	-0,2	0,2	0	0,2	0,31	0,40
<b>9</b>	GW_REVAP	0	0,2	0	0	0,31	0,32

<b>10</b>	GWQMN	0	2	0,7	1,1	0,31	0,31
<b>11</b>	CH_N2	0	0,3	0,3	0,4	0,31	0,31
<b>12 (Menos Sensible)</b>	ALPHA_BF	0	1	1,2	1,7	0,31	0,31

*Nota:* Del análisis de sensibilidad ordenados de mayor a menor, de los cuales el que se ubica en el Rango es el más sensible, por lo cual va a afectar en gran medida al momento de realiza la calibración, siendo el parámetro CH\_K2 (conductividad hidráulica del cauce) el que más influye al momento de realizar este proceso.

Como se observó en la **Tabla 11** se identificó que CH\_K2 (Permeabilidad del lecho del río) es el más sensible en la subcuenca. La columna “NSE Mensual” muestra que la variación de este parámetro (dentro de su “Intervalo final”) puede hacer que el NSE oscile entre 0,31 y 0,55. Esto indica que un ajuste preciso de este valor fue crítico para el éxito de la calibración. De manera similar, ALPHA\_BKN (Factor de recesión del flujo base para el banco) se clasifica como el segundo parámetro más sensible.

En el otro extremo, parámetros como GWQMN (Umbral para el flujo base), CH\_N2 (Coeficiente de Manning) y ALPHA\_BF (Factor de recesión del flujo base) muestra una sensibilidad nula o casi nula. Sus valores en NSE mensual se mantuvieron estáticos en 0,31; lo que sugiere que, para esta subcuenca, el modelo no es dependiente de estos valores específicos.

Por lo tanto, la columna “Intervalo final” fue la guía principal que se utilizó para la calibración manual. Esta representa la “zona óptima” donde el análisis identificó las mejores soluciones.

Basado en este análisis de sensibilidad, se procedió a la calibración manual (“Prueba y Error”), enfocando el esfuerzo en los parámetros de mayor sensibilidad. El conjunto de 12 parámetros optimizados se presenta en la **Tabla 12**. Esta tabla detalla el

valor final, el método de ajuste (v\_ o r\_) y su justificación en comparación con los “Intervalos finales” identificados en el análisis de sensibilidad.

**Tabla 12** *Valores de parámetros optimizados resultantes de la calibración manual*

Parámetro (SWAT)	Valor Final Ajustado	Tipo de Ajuste	Justificación (Rango Óptimo de Tabla 11)
v_CH_K2	41,88	Reemplazo (v_)	Dentro del rango más sensible (5,0 – 64,0)
v_ALPHA_BNK	0,21	Reemplazo (v_)	Dentro del rango óptimo (0,1 - 0,5)
v_GW_DELAY	30	Reemplazo (v_)	En el límite inferior del rango (30-450)
r_SOL_K	-0,12	Relativo (r_)	Dentro del rango óptimo (-0,2 – -0,1)
r_SOL_BD	0,22	Relativo (r_)	Dentro del rango óptimo (0,1 - 0,3)
r_SOL_AWC	-0,27	Relativo (r_)	Cercano al rango óptimo (-0,2 – -0,2)
v_ESCO	1,01	Reemplazo (v_)	En el límite superior del rango (1,0 – 1,0)
r_CN2	0,0	Relativo (r_)	Dentro del rango óptimo (0 – 0,2)
v_GW_REVAP	0,01	Reemplazo (v_)	Cercano al rango óptimo (0 – 0)
v_GWQMN	1,11	Reemplazo (v_)	En el límite superior del rango (0 – 1,1)
v_CH_N2	0,32	Reemplazo (v_)	Dentro del rango óptimo (0,3 – 0,4)
v_ALPHA_BF	1,64	Reemplazo (v_)	Dentro del rango óptimo (1,2 – 1,7)

**Nota:** El tipo de ajuste indica cómo se aplicó el parámetro. Reemplazo (v\_): El valor final reemplaza directamente al valor por defecto del modelo. Relativo (r\_): El valor final aplica un cambio porcentual al valor por defecto (Fórmula: Nuevo Valor = Original \* (1 + Valor Ajustado)) (Abbaspour, 2015).

La gran mayoría de los valores finales (como CH\_K2, ALPHA\_BNK, SOL\_K y ALPHA\_BF) se situaron dentro de los rangos óptimos. Esto valida la utilidad del análisis de sensibilidad como guía principal para la calibración manual.

Los ajustes más significativos fueron relativos ( $r_{\text{r}}$ ) y se centraron en los suelos. El modelo requirió una reducción en la conductividad ( $r_{\text{SOL\_K}} = -0,12$  o  $-12\%$ ) y un aumento en la densidad aparente ( $r_{\text{SOL\_BD}} = 0,22$  o  $+22\%$ ). Esto sugiere que, para replicar los caudales observados, se necesitó modelar suelos más compactos y menos permeables que los valores por defecto, aumentando así la escorrentía superficial.

Un hallazgo relevante es el valor de  $r_{\text{CN2}} = 0,0$ . A pesar de ser un parámetro sensible, el ajuste óptimo fue de 0%. Esto indica que los valores de Número de Curva (CN) calculados a partir de los mapas de uso y tipo de suelo fueron correctos y no necesitaron modificación, validando el geoprocесamiento inicial.

El valor de  $v_{\text{GW\_DELAY}} = 30$  se ajustó en el límite inferior del rango (30 – 450), lo que sugiere que la subcuenca tiene una respuesta del flujo base relativamente rápida.

## 4.2 Calibración y Validación

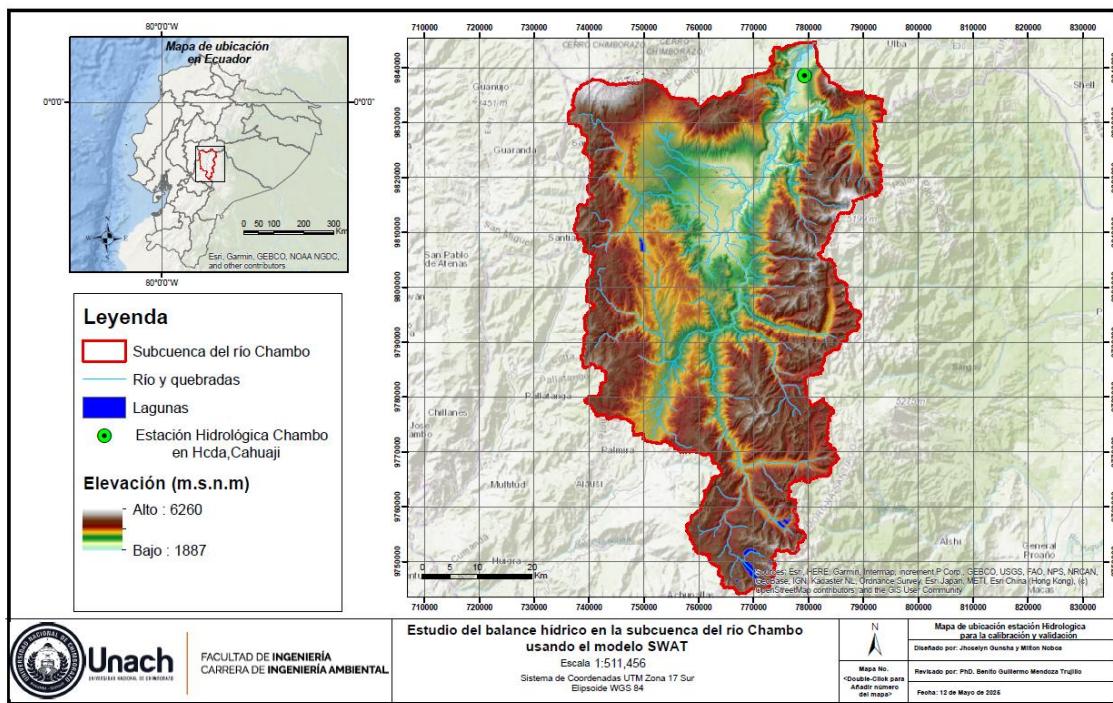
Inicialmente, el proyecto planteaba calibrar el modelo con datos del periodo 2000 – 2010 y validar con el periodo 2011 – 2021. Sin embargo, una limitación crítica surgió durante la recopilación de datos, la estación ubicada a la salida de la subcuenca solo dispone de un registro histórico de caudales observados hasta el año 1998.

Esta ausencia de datos observados imposibilitó la comparación entre el caudal simulado y el observado. Como alternativa, se intentó una calibración utilizando un año hidrológico completo, así seleccionándose el año 1985. Sin embargo, esta prueba arrojó un rendimiento estadístico deficiente, alcanzado un coeficiente Nash-Sutcliffe (NSE) de 0,47. Por esta razón se descartó la calibración por series temporales anuales y se procedió con la calibración por eventos hidrológicos representativos (marzo de 1987 para la calibración y abril de 1987 para la validación), la cual arrojó resultados satisfactorios.

#### 4.2.1 Resultados de la Calibración y Validación

Para poder efectuar el proceso de calibración y validación se contó con información proveniente de la estación hidrológica H0826 nombrada como “Chambo en hacienda Cahuaji”, la cual fue elegida debido a que se encontraba en la salida de la subcuenca del río Chambo y por tanto se encargaba de realizar la medición del caudal observado total de la zona de estudio, como se puede observar en la **Figura 18**.

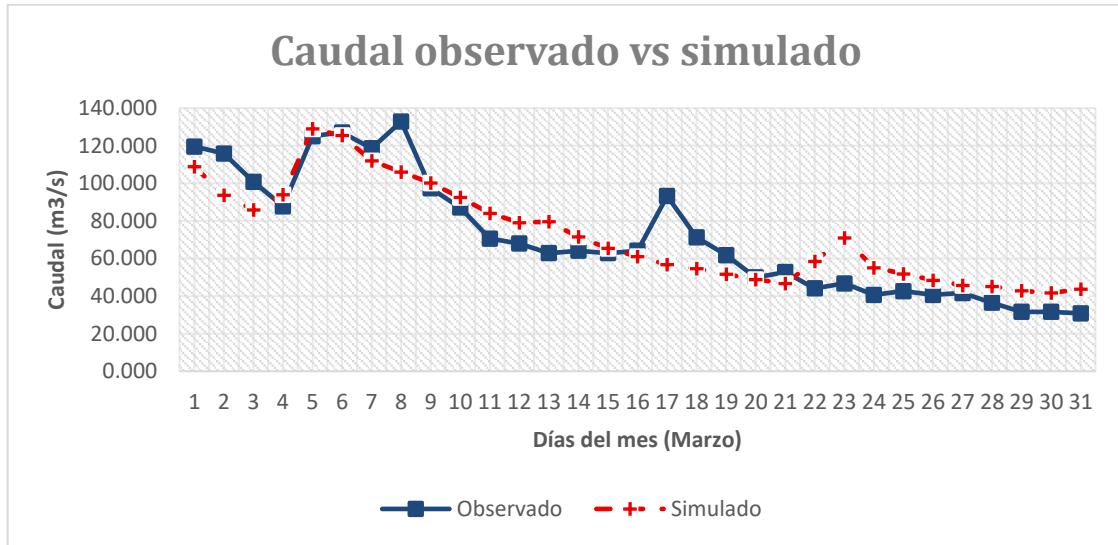
**Figura 18** Mapa de Ubicación de la estación H0826 “Chambo en Hacienda Cahuaji”



*Nota:* La localización del punto de aforo está representado por el punto verde, justo en la parte baja de la subcuenca del río Chambo, aquí se realizaba la medición del caudal observado por parte de la estación H0826.

El proceso de calibración se enfocó en ajustar los parámetros sensibles del modelo para que los caudales simulados se asemejaran lo más posible a los caudales observados durante marzo de 1987.

**Figura 19** Caudal diario de marzo de 1987 para el periodo de calibración



Nota: Hidrograma comparativo entre el caudal observado (color azul) y simulado (rojo) para la calibración, donde se observa que el modelo replica adecuadamente la tendencia general y los picos del mes.

Para la evaluación del modelo durante el período de calibración de marzo de 1987, se realizó una comparación gráfica entre los valores observados y los simulados, cuantificando el ajuste mediante el Coeficiente de Eficiencia Nash-Sutcliffe (NSE). El modelo alcanzó un valor de NSE de 0,82 como se observa en la **Tabla 13**, lo cual se clasifica como una “Simulación muy buena”. Este coeficiente indica que la simulación logró explicar el 82% de la varianza de los datos observados, demostrando una alta capacidad para replicar la tendencia general y la variabilidad de la serie.

El análisis de la **Figura 19** corrobora ese buen desempeño. Se observa que la línea de simulación sigue de cerca la tendencia general de los datos observados, capturando correctamente la dinámica hidrológica del mes, caracterizada por valores altos al inicio que desciende hacia un periodo de recesión al final. No obstante, la inspección gráfica también revela dos debilidades específicas: Primero, el modelo muestra una clara subestimación del evento en el pico extremo ocurriendo alrededor del día 8, donde no logra alcanzar la magnitud máxima registrada. Segundo, durante la última semana del

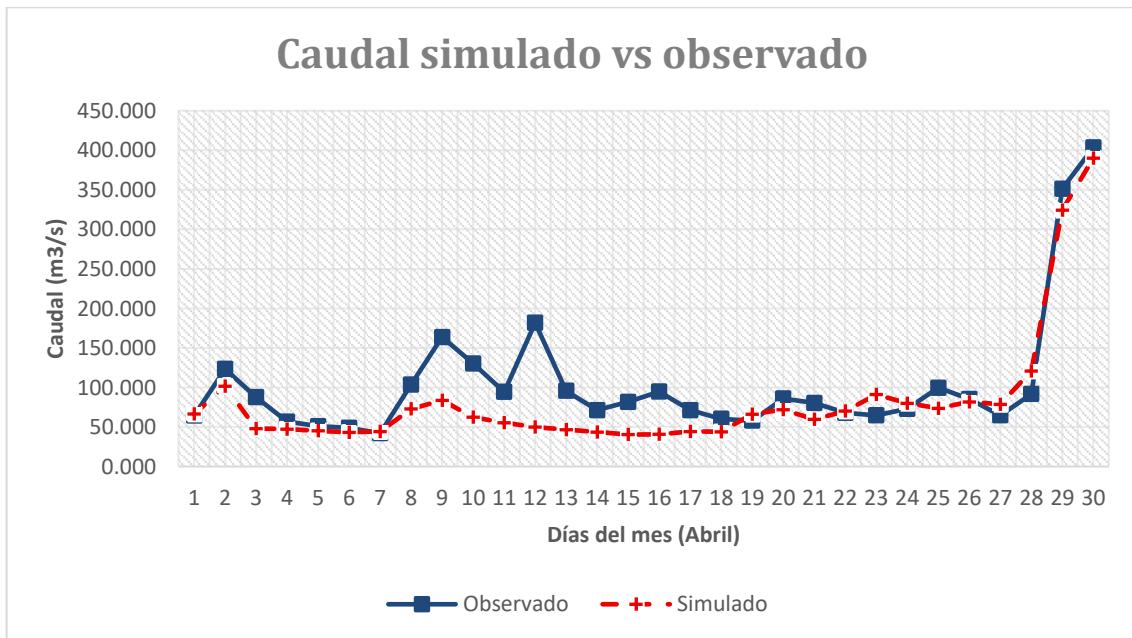
mes, en el período de valores bajos o recesión, el modelo tiende a sobreestimar consistentemente los caudales observados.

**Tabla 13** Resultados de la calibración y validación mensual

Período	Criterio	Valor	Clasificación
Calibración	NSE	0,82	Simulación muy buena
Validación	NSE	0,76	Simulación muy buena

Nota: Tabla resumen del desempeño en función del NSE para el modelo, para los períodos de marzo (Calibración) y abril (Validación) de 1987, donde ambos períodos alcanzaron una clasificación de simulación buena.

**Figura 20** Caudal diario de abril de 1987 para el periodo de validación



Nota: Hidrograma comparativo entre el caudal observado (color azul) y simulado (rojo) para la validación, donde se observa que el modelo replica adecuadamente la tendencia general y los picos del mes.

Al someter el modelo a la etapa de validación con los datos de abril de 1987, se obtuvo un Coeficiente de Eficiencia Nash-Sutcliffe (NSE) de 0,76. Como se observa en la **Tabla 13** lo cual se clasifica como “Simulación muy buena” demostrando que el modelo calibrado con los datos de marzo retiene una alta capacidad predictiva y no sufre de un sobreajuste significativo, validando su robustez para simular períodos hidrológicos independientes.

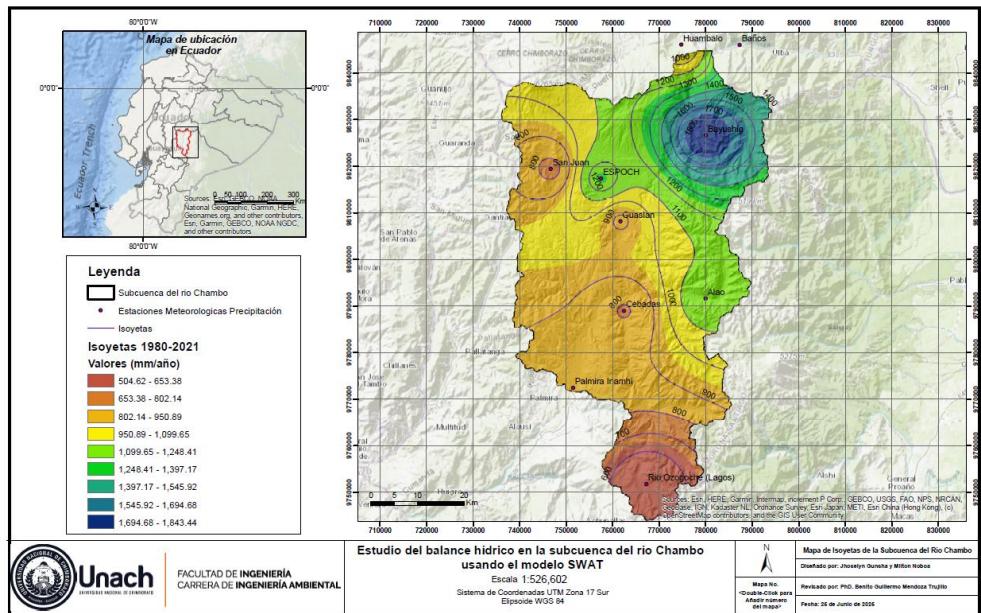
El análisis de la **Figura 20** es particularmente revelador y muestra un comportamiento dual del modelo. La simulación captura con notable precisión tanto el momento de la crecida como la magnitud de los caudales máximos observados durante los días 29 al 30, logrando capturar la magnitud de los caudales máximos. No obstante, esta fortaleza contrasta con una debilidad sistemática observada en la parte central del mes (días 8 al 18), donde el modelo subestima drásticamente, e incluso omite, varios picos de caudal de magnitud media.

#### **4.3 Análisis de las variables climáticas de entrada (1980-2021)**

##### **4.3.1 Precipitación**

Para la simulación hidrológica y el consecuente análisis de las tendencias climáticas, se recopilaron y procesaron las series temporales diarias de precipitación para el periodo 1980-2021, donde se utilizó la información contribuida por las 10 estaciones meteorológicas ubicadas en el área de influencia de la subcuenca del río Chambo.

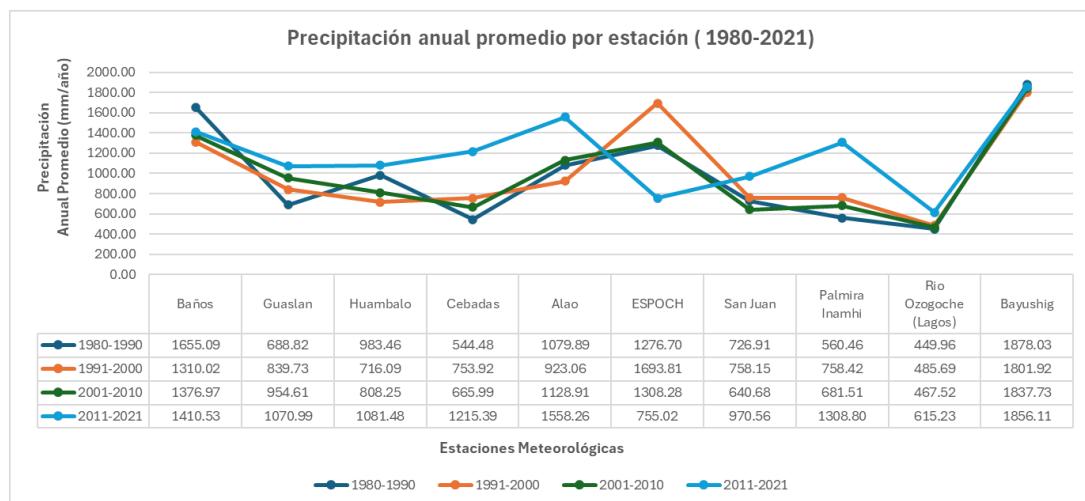
**Figura 21 Mapa de Isoyetas de la subcuenca del río Chambo (1980-2021)**



*Nota:* Distribución espacial para la precipitación medial anual, evidenciándose zonas muy húmedas al este de la subcuenca del río Chambo y zonas secas al centro oeste.

Los datos diarios fueron procesados para poder convertirse en anuales, esto con el fin de analizar la variabilidad espacial y temporal de una manera más eficiente, después estos datos anuales se promediaron a décadas, como se detalla en la **Figura 22**.

**Figura 22 Precipitación media anual subcuenca del río Chambo (1980-2021)**



En la **Figura 22** se ilustra el comportamiento de la precipitación en la subcuenca, donde se puede destacar:

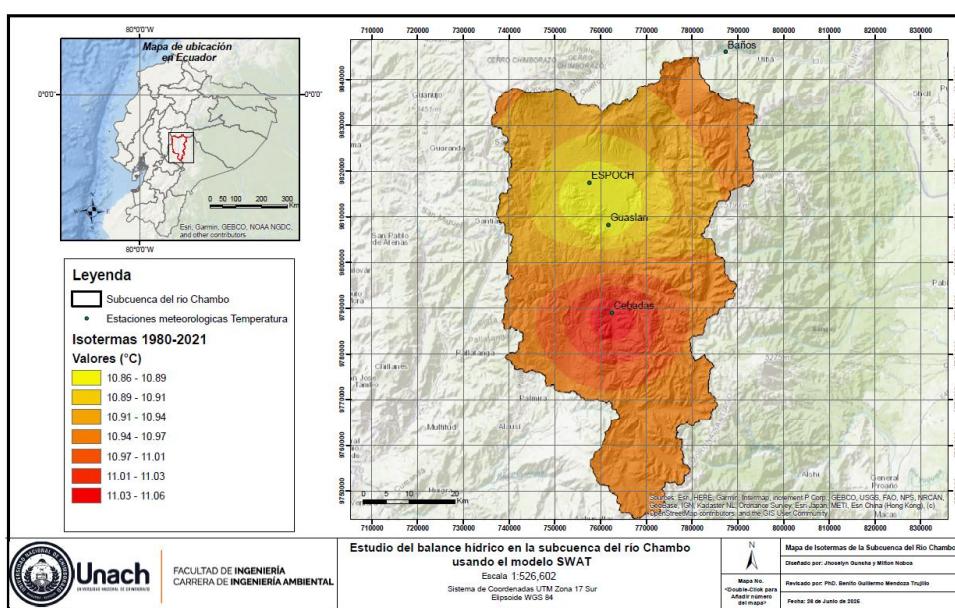
- El hallazgo más significativo es la marcada heterogeneidad espacial de la precipitación, donde se pudo observar que la subcuenca presenta regímenes pluviométricos muy distintos. Por una parte, se pueden identificar la presencia de zonas más húmedas en el lugar en el que se ubican la estación Bayushig y Baños, los cuales registran promedios históricos consistentemente superiores a los 1300 mm/año, llegando a superar los 1800 mm/año.
- Por otra parte, se observan zonas considerablemente más secas, tal es el caso de aquellas que se ubican en las estaciones Río Ozogoche (Lagos) y Palmira Inamhi, donde los promedios históricos son notablemente menores, situándose entre 440 y 620 mm/año, esta diferencia marcada justifica plenamente la necesidad del uso de un modelo hidrológico distribuido como SWAT para lograr capturar de manera satisfactoria la respuesta hidrológica de la subcuenca.
- Analizando la evolución temporal, no se observa una tendencia uniforme de aumento o disminución en todas las estaciones, presentando un comportamiento mixto. Estaciones como Alao, Palmira Inamhi y Huambalo muestran un incremento notable en la última década (2011-2021), registrando sus valores máximos de todo el periodo de estudio.
- Por otro lado, en la estación ESPOCH se puede evidenciar un comportamiento opuesto a los analizados anteriormente, registrándose su máximo valor en la década de (1991-2000), siendo de 1693,81 mm/año y una disminución considerable en las dos épocas consiguientes.
- En la estación Bayushig, los niveles de precipitación se han mantenido relativamente estables con pequeñas fluctuaciones entre décadas.

Este comportamiento complejo, tanto espacial, así como temporal, es una característica fundamental del régimen de precipitación de la subcuenca del río Chambo.

### 4.3.2 Temperatura

Es un factor muy importante debido a que controla la evapotranspiración y, por tanto, es uno de los ejes de soporte del balance hídrico. Para este estudio, se realizó el procesamiento de datos diarios de temperatura máxima y mínima del periodo 1980-2021, debido a que es un requisito para poder ingresar esta variable dentro del modelo, pero para realizar un análisis más conciso se calculó la temperatura media anual para las estaciones con área de influencia en el área de estudio, y que principalmente tengan datos observados reales. De esta forma se presentó el análisis de la distribución espacial dentro de la subcuenca y la tendencia temporal en cada una de las estaciones de registro.

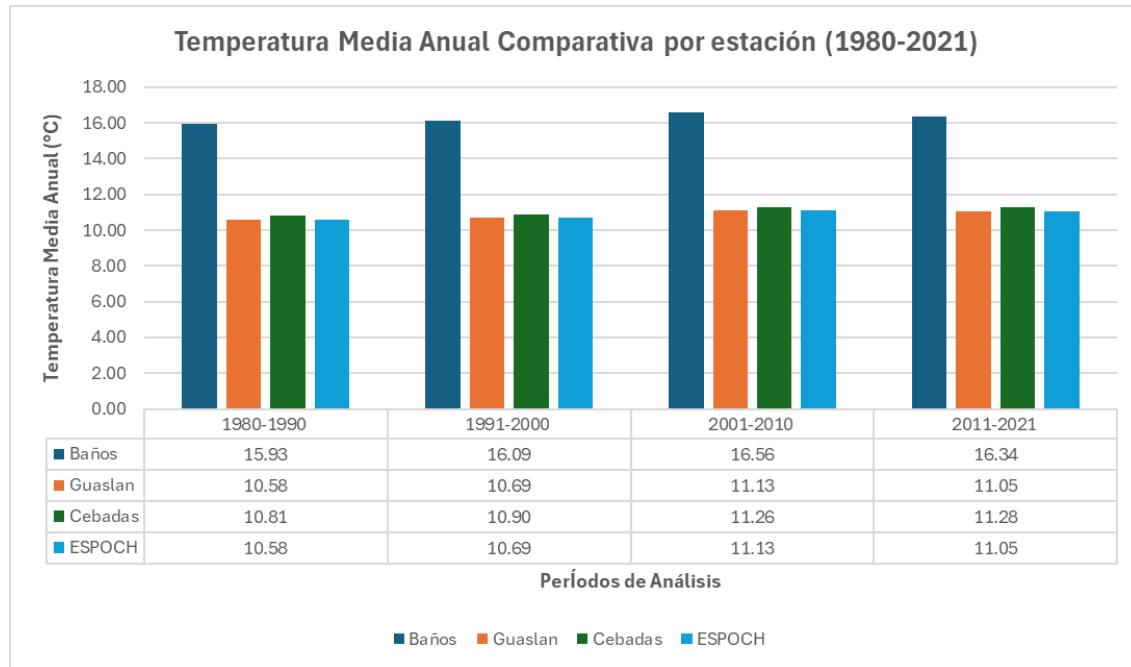
**Figura 23** Mapa de Isotermas de la subcuenca del río Chambo (1980-2021)



En el mapa de isotermas **Figura 23** se ilustro la distribución espacial de la temperatura media anual dentro de la subcuenca del río Chambo, como se pudo observar, el área de estudio presento condiciones térmicas relativamente frescas y homogéneas, con

valores promedio que oscilan los 10,86 °C y 11,06°C, siendo una temperatura media propia de la subcuenca del río Chambo.

**Figura 24** Temperatura Media Anual (1980-2021)



Con la **Figura 24** se complementó el análisis echo previamente, debido a que se muestra los diferentes cambios que ha tenido la temperatura por décadas. Se pudo observar que la estación Baños, la cual se sitúa fuera del área de la subcuenca presenta una temperatura notablemente más cálida a las que se encuentran dentro de la subcuenca del río Chambo, con promedios superiores a 15,9 °C.

Lo más notable fue la evidencia de una tendencia consistente a un aumento de temperatura en el periodo de estudio. Todas las estaciones analizadas, muestran un incremento en la temperatura media anual, esto al comparar la primera década de análisis (1980-1990) con la última (2011-2021).

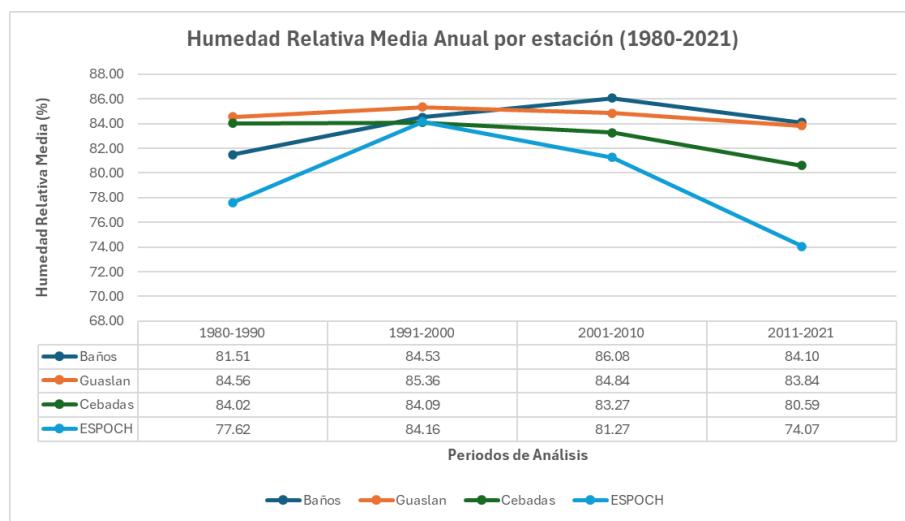
Tomando como punto de análisis la estación Cebadas, paso de un promedio de 10,81°C a 11,28 °C, mientras que la estación Baños aumento de 15,93°C a 16,34°C en los mismos periodos de tiempo. Este comportamiento es un factor que probablemente intensifico la evapotranspiración potencial en la subcuenca.

#### 4.3.3 Humedad Relativa

Es una variable climática fundamental que afecta directamente en la demanda de agua por parte de la atmósfera, debido a que controla el gradiente de presión de vapor entre la superficie, compuesta por la cobertura vegetal y el suelo y el aire. Acompañado de la temperatura, la radiación solar y el viento, los cuales son parámetros de entrada clave para que el modelo SWAT pueda calcular la evapotranspiración potencial (ETP) mediante el método de Penman-Monteith.

En la **Figura 25** se presenta el análisis comparativo de la humedad relativa media anual, la cual se encuentra promediada por décadas para cada una de las estaciones que se encargaron de su registro.

**Figura 25 Humedad Relativa (HR) Media Anual comparativa (1980-2021)**



*Nota:* Evolución temporal de la humedad relativa, donde se destaca el descenso marcado en la estación ESPOCH en la última década, indicando un medio más seco en esta zona.

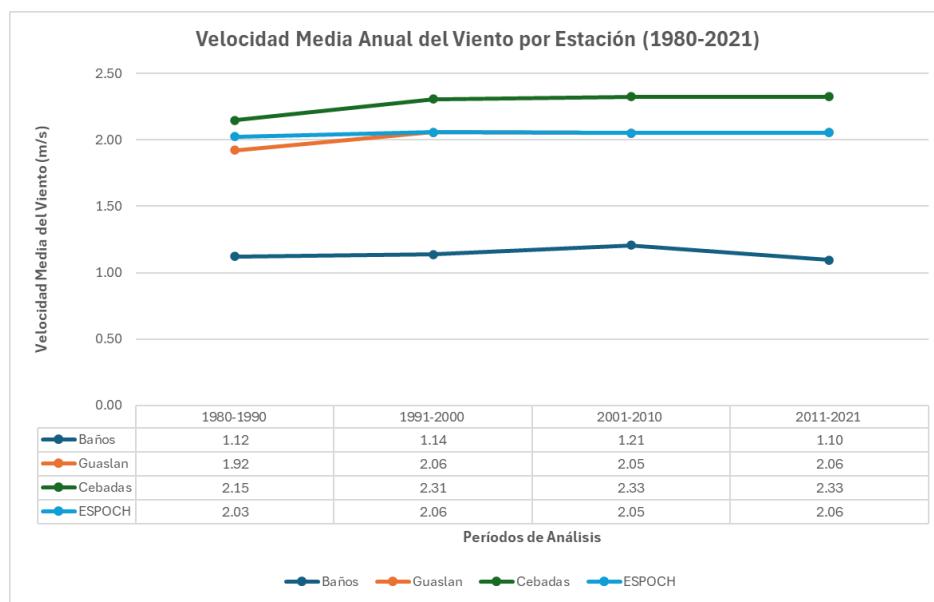
- Uno de los cambios más representativos se encuentra en el lugar de medición de la humedad relativa efectuada por la estación ESPOCH , debido a que se presentó un pico en la década de 1991-2000 la cual fue de 84,16% , para después presentar un descenso muy marcado en las dos décadas siguientes , llegando hasta un

valor de 74,07% en la década de 2011-2021, siendo un cambio drástico que apunta a un proceso de aumento de la demanda de evaporación de agua por parte de la atmósfera, esto se atribuye generalmente al aumento marcado de la urbe lo que ha contribuido en la disminución de la cobertura vegetal.

#### 4.3.4 Velocidad del Viento

Es un parámetro esencial en la ecuación de Penman-Monteith debido a que ayuda a regular la transferencia de vapor de agua desde la superficie, compuesta por el suelo y la cobertura vegetal hacia la atmósfera, al existir una mayor velocidad del viento acelera el proceso de evapotranspiración al mover el campa límite del aire húmedo que se forma sobre la misma. En la **Figura 26** se presenta el análisis comparativo de la velocidad media anual del viento por estación y década.

**Figura 26** Velocidad media anual del viento comparativa (1980-2021)



*Nota:* Comportamiento del viento en las estaciones de monitoreo, donde se muestran que la velocidad del viento se mantiene relativamente estables y más altas en las zonas de la estación Cebadas y Guaslan.

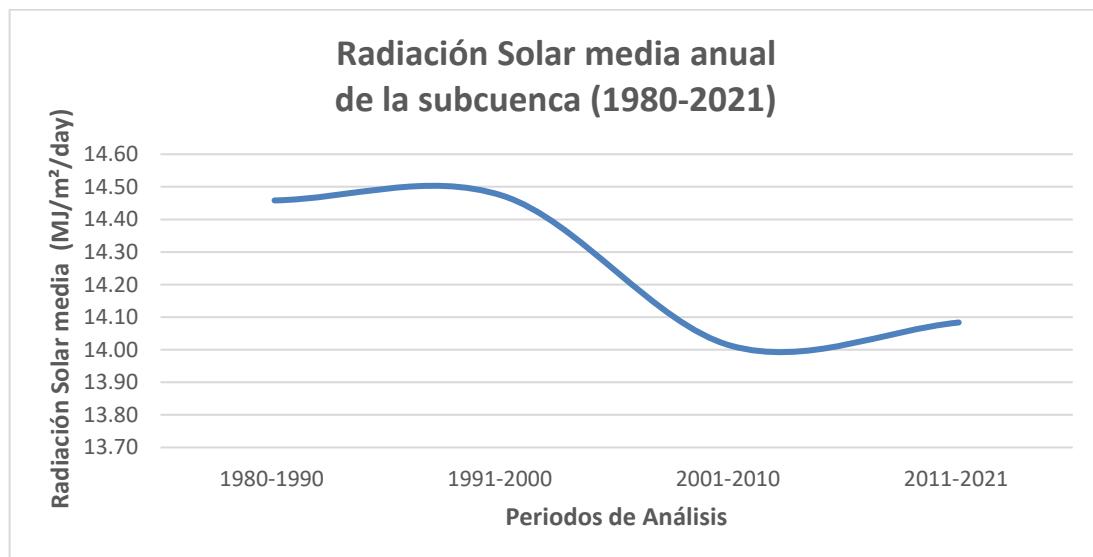
- La estación Baños, la cual se encuentra afuera de la subcuenca del río Chambo midió velocidades del viento relativamente bajas , promediando entre 1,1 y 2,2 m/s, por otro lado, en las estaciones Guaslan, Cebadas y ESPOCH se ubican en zonas significativamente más ventosas, con promedios consistentes por encima de 1,9 m/s, siendo en la estación Cebadas que se registró velocidades superiores a 2,1 m/s, la presencia de un viento constante actúa como un motor que favorece al proceso de evapotranspiración.
- En las estaciones Guaslan y ESPOCH se mantienen mediciones casi perfectamente estables y planas, mostrando que el régimen de viento no ha tenido cambios visibles en toda la época de análisis.

#### 4.3.5 Radiación Solar

La radiación solar (Rads) al ser la fuente principal que impulsa el proceso de evapotranspiración, se convierte en el componente que provee la energía necesaria para que el agua se evapore, convirtiéndolo en uno de los ejes principales de este proceso.

Para la modelación, se utilizó un conjunto de datos diarios, resultado en valores espacialmente uniformes, por lo tanto, el análisis de esta variable se centró exclusivamente en su tendencia temporal. Como se puede observar en la **Figura 27**, la evolución de la radiación solar media anual se analizó por décadas.

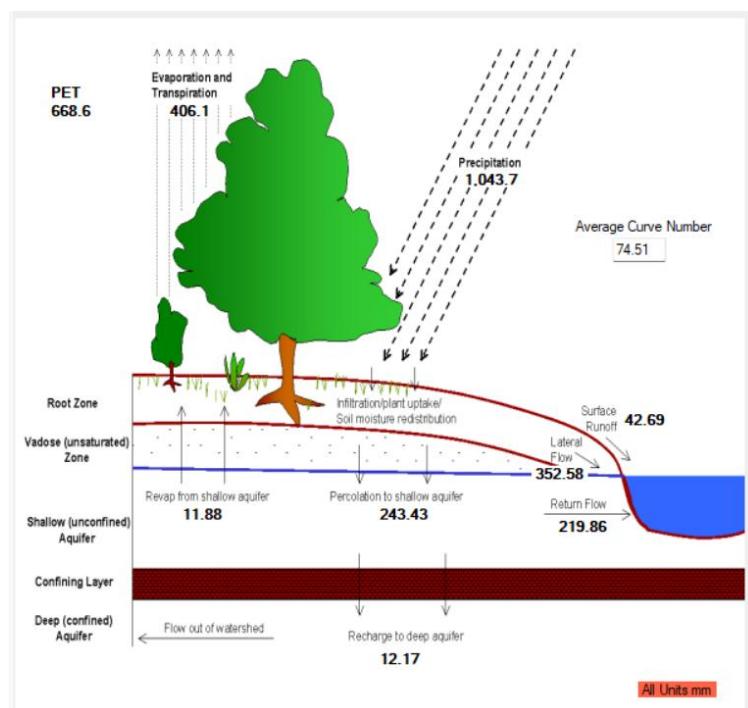
**Figura 27 Radiación Solar Media Anual en la Subcuenca (1980-2021)**



Durante las primeras dos décadas, la radiación solar se mantuvo relativamente estable con valores promedios de 14,46 y 14,47 (MJ/m<sup>2</sup>/día), para que en los consecuentes períodos (2001-2021), se llegó a observar un descenso en la energía solar incidente, estabilizándose en un promedio más bajo de 14,01 y 14,08 (MJ/m<sup>2</sup>/día).

#### 4.4 Balance Hídrico Promedio de la subcuenca del río Chambo

**Figura 28 Balance hídrico promedio simulado por el modelo SWAT en la subcuenca del río Chambo (1980 – 2021).**



La **Figura 28** muestra que el balance hídrico promedio simulado por el modelo SWAT muestra una precipitación media anual de 1043,7 mm, la cual constituye la principal fuente de ingreso hídrico en la subcuenca. De esta cantidad, una parte significativa se pierde por procesos de evapotranspiración, siendo 406,1 mm, reflejando una alta demanda atmosférica de agua, típica de zonas con cobertura vegetal densa.

El número de curva promedio ( $CN = 74,51$ ) indica una capacidad de infiltración media, lo que sugiere que el suelo tiene una moderada propensión a generar escorrentía. En efecto, el escurrimiento superficial alcanza un valor promedio de 42,69 mm, equivalente a cerca del 4% de precipitación total, lo que evidencia que la mayor parte del agua infiltrada se redistribuye en el perfil del suelo y contribuye a los flujos subterráneos.

Dentro de la dinámica subsuperficial, la percolación hacia el acuífero somero es de 243,43 mm, mientras que el flujo lateral aporta 352,58 mm, ambos procesos claves en la recarga y descarga de los acuíferos locales. Además, se registra una recarga hacia el acuífero profundo de 12,17 mm, un valor bajo que sugiere una limitada conexión hidráulica con las capas más profundas debido a la presencia de una capa confinante.

El flujo de retorno (219,86 mm) representa la fracción del agua subterránea que retorna hacia el cauce principal, contribuyendo significativamente al caudal base del río. Por otra parte, el revaporizado desde el acuífero somero (11,88 mm) muestra que una pequeña cantidad de agua asciende nuevamente hacia la zona radicular, participando en el ciclo de evapotranspiración.

En conjunto, el balance hídrico evidencia que la subcuenca del río Chambo presenta un comportamiento hidrológico equilibrado, donde la mayor proporción del agua precipitada se distribuye entre los procesos de infiltración, evapotranspiración y flujo subsuperficial, con menor contribución de la escorrentía superficial. Este patrón es

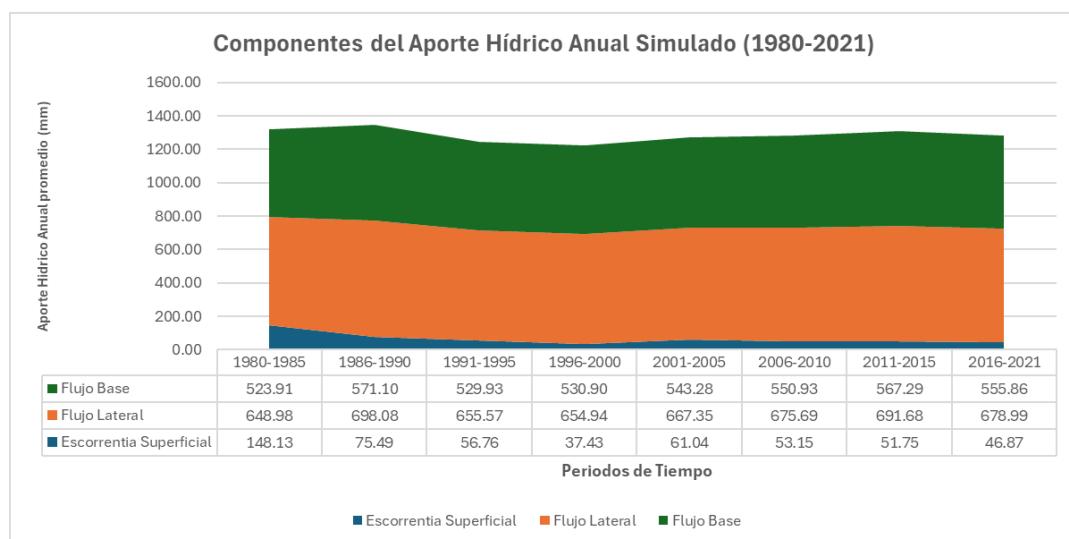
característico de cuencas con suelos de permeabilidad media y buena cobertura vegetal, que favorecen la recarga hídrica y el mantenimiento de flujos base durante todo el año.

#### 4.3.6 Análisis del comportamiento y tenencias hidrológicas (1980-2021)

En esta sección se analizó los resultados de la simulación hidrológica, centrándose en la escorrentía total y su composición, siendo que este aporte hídrico se descompone en tres flujos claves simulados por SWAT, siendo la escorrentía superficial (respuesta rápida a la lluvia), el flujo lateral (flujo subsuperficial en el suelo) y el flujo base (aporte lento del acuífero).

De esta manera, para poder observar los cambios estructurales a largo plazo y de esta manera evitar que se produzca una distorsión estadística causada por eventos climáticos anuales extremos, los componentes del caudal se agruparon y promediaron en ocho períodos de 5 a 6 años. Revelando con este método de una manera más clara la evolución de la respuesta hidrológica de la subcuenca del río Chambo, como se presentó en la **Figura 29**.

**Figura 29** Componentes del aporte hídrico anual simulado (1980-2021)



*Nota:* Grafico de áreas en los que se representa cada uno de los componentes del aporte

hídrico anual en mm, representándose al flujo base de color verde, flujo lateral de color anaranjado y la escorrentía superficial de color azul.

El análisis de los componentes promediados del caudal por periodos, brindo una visión más clara sobre las tendencias a largo plazo del recurso hídrico en la subcuenca, aquí se destacan tres hallazgos principales:

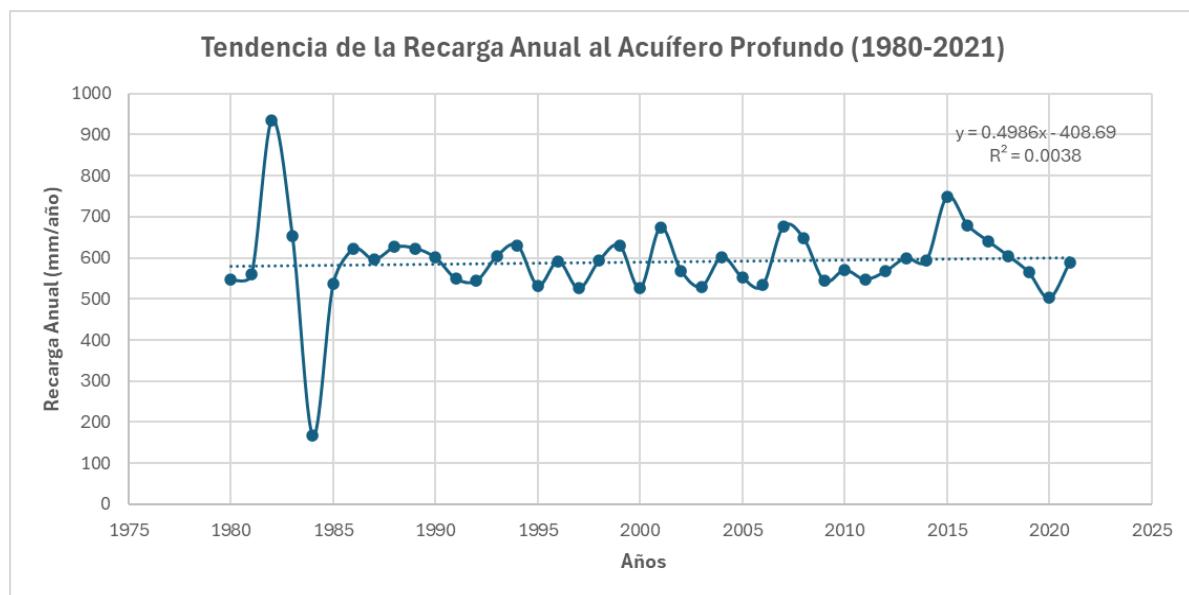
- En la gráfica es evidente que el Flujo Lateral, y el Flujo Base son los que constituyen la gran mayoría del aporte hídrico, llegando a ser más del 90% en la gran mayoría de periodos, de esta manera confirmando que en la subcuenca del río Chambo existe un sistema de alta infiltración, donde la mayor parte de la precipitación pasa por el interior del suelo antes de llegar a los diferentes cauces.
- Se pudo evidenciar una anomalía muy notable en el periodo 1980-1985, debido a que la Escorrentía Superficial, fue alta, alcanzado un promedio de 148,13 mm, siendo un valor de más del doble que cualquiera de los otros periodos de análisis en este flujo, esto se atribuye a la influencia de eventos climáticos extremos, tal y como el fenómeno del niño, el cual sucedió en los años 1982 y 1983, los cuales provocaron que se supere la capacidad de infiltración de la subcuenca.
- El indicador más importante para la sostenibilidad hídrica de la subcuenca nos muestra que el Flujo Base, se muestra de una forma robusta y notablemente estable, lo cual lejos de mostrar una degradación, los valores promedios de las últimas dos décadas siendo de 567,29 mm y 555,86 mm, fueron superiores al valor del primer periodo 523,91 mm, indicando que la capacidad de regulación y almacenamiento de agua no se avistó degradado.

#### 4.3.7 Tendencia de la recarga al acuífero profundo

Representa el agua que percola más allá de la zona radicular y del acuífero somero (el que alimenta al flujo base), dirigiéndose de esa manera a reservorios subterráneos más profundos, siendo un indicador clave de la sostenibilidad hídrica a largo plazo y de la potencial explotación o degradación del sistema.

Partiendo de este punto, se utilizó un gráfico de dispersión de los totales anuales de la recarga (1980-2021), y se calculó una línea de tendencia, como se muestra en la **Figura 30**.

**Figura 30** *Tendencia de la recarga anual del acuífero profundo (1980-2021)*



El grafico de la recarga al acuífero profundo(mm) muestra dos características principales:

- Se observó una alta variabilidad interanual, al igual que el aporte hídrico, la recarga profunda es altamente variable, esto debido a que responde directamente a los eventos climáticos, destacando el pico extremo en el año de 1982, superando los 900 mm, y el año de recarga mínima en el año de 1984, fue de apenas 168 mm, coincidiendo de esta manera con el periodo en el que sucedió el evento climático extremo, el fenómeno del niño.

- A pesar de la alta variabilidad anual, la línea de tendencia es casi plana, teniendo una pendiente de 0,4986, la cual es casi nula.

Así como el Flujo Base se mantuvo estable, la recarga al acuífero profundo también presentó el mismo comportamiento, indicando que a pesar de los cambios en las variables climáticas, en los que existió un aumento de la temperatura y descenso de la humedad relativa, la capacidad de la subcuenca para infiltrar agua y recargar sus reservorios subterráneos no se ha visto afectada, durante el periodo de análisis no se observó cambios drásticos del suelo o degradación del mismo que lleguen a impedir procesos de percolación profunda del agua.

#### 4.3.8 Discusión de Resultados

Los datos climáticos ponen en evidencia la tendencia que tiene la subcuenca a aumentar ligeramente la temperatura y a disminuir la cantidad de humedad presente, esto se evidenció en estaciones meteorológicas clave, siendo una combinación que contribuye al aumento de la demanda de agua por parte de la atmósfera, ejerciendo de esta manera una presión creciente sobre los recursos hídricos.

La limitación más significativa para la presente investigación fue la dificultad para calibrar y validar exitosamente el modelo SWAT usando los períodos hidrológicos completos propuestos (2000-2021), este desafío es consistente con las diferentes dificultades reportadas en la modelación hidrológica de cuencas andinas, las cuales se caracterizan por una alta complejidad topográfica, además de una representativa escasez de datos hidrometeorológicos lo cual es mencionado por (Gonzalez et al., 2023), quienes realizaron su investigación enfocada en la Cuenca del río Paute buscando analizar los cambios hidrológicos ocasionados por las actividades humanas y los cambios climáticos, esto con el fin de seleccionar técnicas estadísticas para seleccionar de mejor manera las variables de entrada, aquí se reportó un buen rendimiento a escala mensual , y aunque el

modelo presento limitaciones para simular picos de crecida diarios , se consideró valido para cumplir con los requisitos de esta investigación relacionado directamente al balance hídrico realizado a escala mensual y estacional, con esto en mente es completamente valido realizar la calibración enfocada en un solo mes, siempre y cuando se cuenten con datos observados reales de la fecha que se esté realizando el análisis.

Por otro lado , analizando el modelamiento efectuado por SWAT, la respuesta hidrológica de la subcuenca del río Chambo se muestra estable, esto debido a que el análisis de los componentes del caudal llego a demostrar que no existen signos de degradación hidrológica significativa , esto evidenciado al poco aumento en la escorrentía superficial, por el contrario, el sistema demuestra una alta capacidad de infiltración , siendo un 93% del flujo aquel que se infiltra y recorre por debajo de la superficie del suelo, además de una notable estabilidad en el flujo base , lo cual es un indicador de una buena condición hídrica a largo plazo.

Es muy importante denotar que el calentamiento producido por el aumento en la temperatura en la subcuenca del río Chambo no es una anomalía local, debido a que tiene mucho sentido con las tendencias regionales y globales, estudios como aquel realizado por (Porras, 2016) en los que se confirma que ha existido un aumento de temperatura base hasta en 1,4 °C en todas las zonas de la sierra ecuatoriana, este comportamiento sumado a la reducción de humedad relativa, fue una clara evidencia de las problemáticas que causan tanto el crecimiento de la urbe y la reducción de la cobertura vegetal , siendo un proceso que influye directamente sobre el ciclo hidrológico.

Mientras los factores climáticos aportaron un aumento en la evapotranspiración, los resultados hidrológicos no mostraron un alto avance en la degradación hídrica , si no que la escorrentía superficial o flujo rápido no aumento, si no que se estabilizo después de lo ocurrido por el fenómeno del niño en los años 1982-1983, por otro lado el flujo base

se mantuvo estable durante los 42 años de análisis y la recarga al acuífero profundo se mantuvo estable con una pendiente no significativa, así confirmando que el balance hídrico confirmó que el sistema es un filtro con una alta infiltración , donde más del 90% del caudal total es generado por el flujo lateral y el flujo base, este comportamiento se debe en gran medida por algunos factores, uno de ellos debido a que la zona alta de la subcuenca del río Chambo se encuentra dominada por ecosistemas de paramo, los cuales en una investigación realizada por Pool & Váscones (2003), respalda la idea de que estos brindan una función de esponja, llegando a capturar el agua , en lugar de permitir que esta escurra de manera superficial, generando un proceso de infiltración que va liberando el agua lentamente a los diferentes cauces, lo que contribuyen en conjunto con los suelos de origen volcánico que dominan en la región al comportamiento hidrológico de subcuenca como la del río Chambo.

## CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 Conclusiones

- El modelo hidrológico SWAT fue implementado, calibrado y validado exitosamente para la subcuenca del río Chambo, alcanzando coeficientes de eficiencia Nash-Sutcliffe (NSE) de 0,82 (“Muy bueno”) en la calibración y 0,76 (“Muy bueno”) en la validación. Esto confirma que SWAT es una herramienta robusta y adecuada para analizar la hidrología de esta subcuenca andina, aunque presente limitaciones para simular con precisión picos extremos y caudales de recesión.
- El balance hídrico promedio de la subcuenca (1980-2021) está dominado por procesos subsuperficiales. Más del 90% del aporte hídrico total proviene del flujo lateral y el flujo base, mientras que la escorrentía superficial representa solo un 4% de la precipitación total. Esto confirma la alta capacidad de infiltración y regulación hídrica del sistema, atribuible a la cobertura de páramo y los suelos volcánicos.
- Se identificó una tendencia climática estadísticamente significativa de aumento de la temperatura media anual en todo el periodo de estudio (1980-2021). En contraste, la precipitación mostró una alta heterogeneidad espacial, con zonas secas (400-620 mm/año) y zonas muy húmedas ( $>1800$  mm/año), y no presentó una tendencia temporal uniforme.
- A pesar de las presiones climáticas (aumento de temperatura) y la ocurrencia de eventos extremos (como el FEN 1982-1983m, que generó una escorrentía superficial anómala de 148,13 mm), la subcuenca del río Chambo demuestra una notable resiliencia hidrológica. Los análisis de tendencia del flujo base y de la recarga al acuífero profundo se mantuvieron estables y robustos durante los 41

años del estudio, indicando que la capacidad de almacenamiento y regulación del sistema no ha mostrado signos de degradación.

## 5.2 Recomendaciones

- Se recomienda de manera prioritaria a las entidades competentes (INAMHI, GAD's provinciales) invertir en la instalación, mantenimiento y financiamiento de la recolección continua de datos en estaciones hidrométricas clave. La principal limitación de este estudio fue la ausencia de datos de caudales observados recientes, lo que impidió la calibración en los periodos propuestos originalmente (2000-2021). Disponer de series temporales actuales es fundamental para validar futuros modelos hidrológicos y aumentar su confiabilidad para la toma de decisiones.
- Dado que el balance hídrico de la subcuenca está dominado por procesos subsuperficiales, se recomienda priorizar y robustecer las políticas de ordenamiento territorial para la protección estricta de los ecosistemas del páramo. Los resultados confirman la alta capacidad de infiltración y regulación del sistema, atribuible a la función de "esponja" de estos ecosistemas y los suelos volcánicos, por lo que su conservación es vital para mantener la resiliencia hídrica.
- Utilizar el modelo SWAT implementado, que alcanzó calificaciones "Muy buenas" en su calibración (NSE 0,82) y validación de (NSE 0,76), como una herramienta activa de gestión para el GAD de Chimborazo. Se sugiere emplear el modelo calibrado para la simulación de escenarios, evaluando el impacto potencial de cambios de uso de suelo (como la expansión de la frontera agrícola) o los efectos de la variabilidad climática sobre la oferta hídrica a futura.
- Se recomienda que los futuros Planes de Gestión de Recursos Hídricos integren activamente las tendencias climáticas identificadas. El estudio

confirmó un aumento estadísticamente significativo de la temperatura media anual y una disminución de la humedad relativa en estaciones clave, lo que incrementa la presión por evapotranspiración. Aunque la subcuenca ha demostrado resiliencia, estos factores de estrés climático deben ser monitoreados.

- En futuras investigaciones de modelación hidrológica en la subcuenca, se recomienda enfocar esfuerzos en perfeccionar la simulación de eventos hidrológicos extremos. El modelo calibrado, si bien robusto en la tendencia general, mostró limitaciones para replicar con precisión la magnitud de los picos de crecida y la dinámica de los caudales de recesión. El uso de datos de precipitación con mayor resolución temporal (sub-diaria) podría mejorar el ajuste de estos eventos.

## BIBLIOGRAFÍA

- AL-Falahi, A. H., Saddique, N., Spank, U., Pluntke, T., Gebrechorkos, S. H., Mauder, M., & Bernhofer, C. (2024). Hydrological investigation of climate change impact on water balance components in the agricultural terraced watersheds of Yemeni highland. *Theoretical and Applied Climatology*, 155(6), 4703–4720. <Https://doi.org/10.1007/s00704-024-04913-x>
- Álvarez, A., Breogán Ferreiro-Lera, G., González-Pérez, A., Merino, Á. P., & Río González, S. Del. (2022). *Caracterización bioclimática del principado de asturias*.
- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., & Williams, J. R. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment part i: model development1. *Jawra Journal of the American Water Resources Association*, 34(1), 73–89. <Https://doi.org/10.1111/J.1752-1688.1998.TB05961.X>
- Benavides Holger, & Román Kevin. (2025). Hydrodynamic modeling and flood mitigation strategies in an Andean Valley City. *PLOS Water*, 4(7 June). <Https://doi.org/10.1371/journal.pwat.0000397>
- Bernal, C. A. (2010). *Metodología de la investigación administración, economía, humanidades y ciencias sociales*. Chrome-extension://efaidnbmnnibpcajpcgkclefindmkaj/https://abacoenred.org/wp-content/uploads/2019/02/El-proyecto-de-investigaci%C3%b3n-F.G.-Arias-2012-pdf.pdf
- Buytaert, W., & Bievre, B. De. (2012). Water for cities: The impact of climate change and demographic growth in the tropical Andes. *Water Resources Research*, 48(8). <Https://doi.org/10.1029/2011WR011755>
- Cabrera Carme, Vera Ruth, León Vanessa, & Falconí Alex. (2024). *Estudio del comportamiento del viento en zonas Alto Andinas, Chimborazo - Ecuador*.
- Cabrera, J. (2019). *Calibración de Modelos Hidrológicos*. [Https://www.imefen.uni.edu.pe/Temas\\_interes/modhidro\\_2.pdf](Https://www.imefen.uni.edu.pe/Temas_interes/modhidro_2.pdf)
- Carvalho, A. C., Lorandi, R., Lollo, J. A. Di, Collares, E. G., & Moschini, L. E. (2022). Hydrological response of hydrographic sub-basins in the Piracicaba River Basin - Southeast Region of Brazil. *Sociedade & Natureza*, 34(1), e63522. <Https://doi.org/10.14393/SN-V34-2022-63522>

- CEPAL. (2020). *Recursos hídricos en América Latina y el Caribe: desafíos y oportunidades para la sostenibilidad. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL)*. <Https://www.cepal.org/es/publicaciones/46593-recursos-hidricos-america-latina-caribe-desafios-oportunidades-sostenibilidad>
- Chidichimo, F., Mendoza, B. T., De Biase, M., Catelan, P., Straface, S., & Di Gregorio, S. (2018). Hydrogeological modeling of the groundwater recharge feeding the Chambo aquifer, Ecuador. *AIP Conference Proceedings*, 2022. <Https://doi.org/10.1063/1.5060683>
- Cogliati, M. G., Ostertag, G., Caso, M., Florencia Gisella, F., & Groch, D. (2018). Análisis del balance hídrico medio mensual en la provincia del Neuquén (Argentina). *Boletín Geográfico*, 40(2), 27–45. <Https://revele.uncoma.edu.ar/index.php/geografia/article/view/2163>
- Colín, G., Palacios, E., Fernández, D. S., López, A., Flores, H., Ascencio, R., & Canales, E. I. (2022). *Modelación hidrológica con el modelo SWAT empleando diferentes distribuciones espaciales del tipo suelo en la cuenca del Río Mixteco Hydrological modeling with the SWAT model using different spatial distributions of soil type in the Mixteco River Basin*. <Https://doi.org/10.28940/terra>
- Creswell, J. W. (2020). *Research Design: Qualitative, Quantitative and Mixed Methods Approaches*. 3. [Https://extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.ucg.ac.me/skladiste/blog\\_609332/objava\\_105202/fajlovi/Creswell.pdf](Https://extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.ucg.ac.me/skladiste/blog_609332/objava_105202/fajlovi/Creswell.pdf)
- De Cabo, L., & Marconi, P. L. (2021). *Estrategias de remediación para las cuencas de dos ríos urbanos de llanura matanza-riachuelo y reconquista*.
- Gobierno Autónomo Descentralizado de Chimborazo. (2019). *Honorable gobierno autónomo descentralizado de la provincia de chimborazo*. <Https://extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://chimborazo.gob.ec/principal/wp-content/uploads/2022/06/PDOT.pdf>
- Gonzalez, M. D., Zhina, D. X., Guanuchi-Quito, A., & Aviles-Anazco, A. (2023). Comparison of methodologies for flow prediction through teleconnection indices. Case study: Paute river basin. *Revista Tecnológica - ESPOL*, 35(2), 27–49. <Https://doi.org/10.37815/rte.v35n2.1028>
- Guevara Ochoa, C., Cazenave, G., Vives, L. S., & Vázquez Amábile, G. G. (2014). *Empleo del modelo hidrológico SWAT en regiones de llanuras*.

- Hernández Sampieri, Roberto., & Mendoza Torres, C. Paulina. (2018). *Metodología de la investigación: las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. McGraw-Hill Education.
- Chrome-extension://efaidnbmnnibpcajpcglclefindmkaj/http://www.biblioteca.cij.gob.mx/Archivos/Materiales\_de\_consulta/Drogas\_de\_Abuso/Articulos/sampierilasrutas.pdf
- Horna, S. D., Guaiña, J. I., Lara, N. X., Vaca, P. V., & Cushquicullma, D. F. (2022). *Tendencias Temporales del Índice Mejorado de la Vegetación (Evi) en tres Ciencias Naturales Artículo de Investigación.* 66, 270–283. <Https://doi.org/10.23857/pc.v7i1.3477>
- Horna Shirley, Guaiña Jonny, Lara Norma, & Vaca Pedro. (2022). *Tendencias Temporales del Índice Mejorado de la Vegetación (Evi) en tres Ciencias Naturales Artículo de Investigación.* 66, 270–283. <Https://doi.org/10.23857/pc.v7i1.3477>
- Hoyos Stephanie. (2025). *Estudio de la normal climatológica de radiación solar en Ecuador para el periodo 1985 - 2015 y su impacto en el sector floricultor*. Chrome-extension://efaidnbmnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.redalyc.org/journal/6538/653881802024/653881802024.pdf
- Instiuto Nacional de Meteorología e Hidrología. (2025). Anuarios Metereologicos – INAMHI. <Https://servicios.inamhi.gob.ec/anuarios-metereologicos/>
- Jódar, J., Carpintero, E., & Martos-Rosillo, S. (2018). Combinación de modelos hidrológicos agrupados y de teledetección para evaluar los recursos hídricos en una cuenca hidrográfica semiárida de gran altitud no aforada de Sierra Nevada. *Ciencia Del Total*. <Https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004896971733735X>
- Lawal, I. M., Bertram, D., White, C. J., & Jagaba, A. H. (2023). Integrated framework for hydrologic modelling in data-sparse watersheds and climate change impact on projected green and blue water sustainability. *Frontiers in Environmental Science*, 11. <Https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1233216>
- Maldonado, C., Franco, C., & Jáuregui, U. J. (2023). Gestión integrada de las cuencas hidrográficas: hacia un nuevo paradigma en la gobernanza del agua. *Ciencia, Ambiente y Clima*, 6(2), 67–101. <Https://doi.org/10.22206/cac.2023.v6i2.2951>
- Martínez Yaset, & Vallejo Víctor. (2018). *La gestión integrada de los recursos hídricos: una necesidad de estos tiempos The integrated water resources management: a nowadays need:* Vol. XXXIX (Issue 1). Chrome-extension://efaidnbmnnibpcajpcglclefindmkaj/http://scielo.sld.cu/pdf/riha/v39n1/riha05118.pdf

- Mekoya, A., Tesfaye, A., & Bekele, D. A. (2025). Rainfall, air temperature, and reference evapotranspiration variability and trend and their implication for agroforestry development in the Lake Tana sub-basin of Ethiopia. *Discover Atmosphere*, 3(1). <Https://doi.org/10.1007/s44292-025-00045-7>
- Ministerio de Agricultura Y Ganadería. (2019). Geoportal del Agro Ecuatoriano. <Http://geoportal.agricultura.gob.ec/>
- Mohammadi, B. (2021). A review on the applications of machine learning for runoff modeling. *Sustainable Water Resources Management*, 7(6). <Https://doi.org/10.1007/s40899-021-00584-y>
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Liew, M. W. Van, Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (1983). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. In *Transactions of the ASABE* (Vol. 50, Issue 3).
- NASA. (2024). *NASA POWER. Prediction Of Worldwide Energy Resources*. Retrieved June 6, 2025, from <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>.
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., & Williams, J. R. (2005). *Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2005*.
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., & Williams, J. R. (2011). *College of agriculture and life sciences Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009*.
- Nikolaou, G., Neocleous, D., Manes, A., & Kitta, E. (2024). Calibration and validation of solar radiation-based equations to estimate crop evapotranspiration in a semi-arid climate. *International Journal of Biometeorology*, 68(1), 1–15. <Https://doi.org/10.1007/s00484-023-02566-5>
- Pandi, D., Kothandaraman, S., & Kuppusamy, M. (2023). Simulation of Water Balance Components Using SWAT Model at Sub Catchment Level. *Sustainability (Switzerland)*, 15(2). <Https://doi.org/10.3390/su15021438>
- Petch, S., Dong, B., Quaife, T., King, R. P., & Haines, K. (2023). Water and energy budgets over hydrological basins on short and long timescales. *Hydrology and Earth System Sciences*, 27(9), 1723–1744. <Https://doi.org/10.5194/HESS-27-1723-2023>,
- Pimentel, J. N., Rogéliz Prada, C. A., & Walschburger, T. (2021). Hydrological Modeling for Multifunctional Landscape Planning in the Orinoquia Region of Colombia. *Frontiers in Environmental Science*, 9. <Https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.673215>
- Pool Segarra, R. H., & Váscones Mena, P. (2003). *Los Páramos del Mundo*. UICN.

- Porras A, E. G. (2016). *Análisis de tendencias climáticas y eventos climáticos extremos para ecuador Ecuador-agosto De 2016*.
- Romero, D. C., Domínguez, I., & Oviedo-Ocaña, E. R. (2022). Effect of agricultural activities on surface water quality from páramo ecosystems. *Environmental Science and Pollution Research* 2022 29:55, 29(55), 83169–83190. <Https://doi.org/10.1007/S11356-022-21709-6>
- Rosales, I, O. A., Enrique Alfonso-Valdés, J. I., Santana-Amar, I. I., Socorro-García, A. I., Carmen Duarte-Díaz III, D. E., & Rosales-Rodríguez, O. A. (2022). *ARTÍCULO ORIGINAL Comparison of methods for estimating the evapotranspiration of tomato cultivation in growing houses Autor para correspondencia.* 12(2). <Https://doi.org/10.13140/RG.2.2.28326.32325>
- Ruiz, V. H., Asensio-Grima, C., Ramírez-García, A. G., & Monterroso-Rivas, A. I. (2023). The Hydrological Balance in Micro-Watersheds Is Affected by Climate Change and Land Use Changes. *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(4). <Https://doi.org/10.3390/app13042503>
- Trenberth, K. E. (2011). Changes in precipitation with climate change. *Climate Research*, 47(1–2), 123–138. <Https://doi.org/10.3354/cr00953>
- Wang, X., & Liu, L. (2023). The Impacts of Climate Change on the Hydrological Cycle and Water Resource Management. In *Water (Switzerland)* (Vol. 15, Issue 13). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <Https://doi.org/10.3390/w15132342>

## ANEXOS

### *Anexo I Datos de estaciones meteorológicas 1980-2010*

- **Precitación (mm)**

#### *Datos de precipitación media anual 1980-2021*

<b>Estaciones</b>	<b>Códigos</b>	<b>Media</b>	<b>Media</b>	<b>Media</b>	<b>Media</b>
		<b>Anual</b>	<b>Anual</b>	<b>Anual</b>	<b>Anual</b>
		<b>1980-</b>	<b>1991-</b>	<b>2001-</b>	<b>2011-</b>
		<b>1990</b>	<b>2000</b>	<b>2010</b>	<b>2021</b>
<b>Alao</b>	M0396	1079,89	923,057	1128,91	1559,079
<b>Baños</b>	M0029	1655,09	1310,024	1376,972	1421,55
<b>Bayushig</b>	M0097	1878,03	1801,918	1837,726	1862,114
<b>Cebadas</b>	M0395	544,48	753,922	665,994	1161,822
<b>ESPOCH</b>	M1036	1276,70	1693,809	1308,277	749,669
<b>Guaslán</b>	M0133	688,82	839,727	954,606	1010,939
<b>Huambaló</b>	M0380	983,46	716,09	808,251	1028,639
<b>Palmira</b>	M0398	560,46	758,417	681,512	1246,029
<b>RIO</b>	M0401	449,96	485,692	467,523	600,469
<b>OZOGOCHE(LAGOS)</b>					
<b>San Juan</b>	M0393	726,91	758,146	640,681	899,494

- **Temperatura máxima y mínima (°C)**

#### **Temperatura máxima (°C)**

#### *Datos de estaciones meteorológicas de temperatura máxima 1980-2021*

Estaciones	Códigos	Media	Media	Media	Media
		Anual	Anual	Anual	Anual
		1980-	1991-	2001-	2011-
		1990	2000	2010	2021
<b>Baños</b>	M0029	19,68	20,01	20,74	20,12
<b>Cebadas</b>	M0395	16,29	16,43	16,93	16,76
<b>ESPOCH</b>	M1036	15,88	16,04	16,76	16,39
<b>Guaslán</b>	M0133	15,88	16,04	16,76	16,39

### Temperatura mínima (°C)

*Datos de estaciones meteorológicas de temperatura mínima 1980-2021*

Estaciones	Códigos	Media	Media	Media	Media
		Anual	Anual	Anual	Anual
		1980-	1991-	2001-	2011-
		1990	2000	2010	2021
<b>Baños</b>	M0029	12,73	12,96	13,27	13,32
<b>Cebadas</b>	M0395	6,73	6,91	7,22	7,32
<b>ESPOCH</b>	M1036	6,52	6,72	7,04	7,08
<b>Guaslán</b>	M0133	6,52	6,72	7,04	7,08

### • Radiación solar (MJ/m<sup>2</sup>)

*Datos de satelitales de radiación solar 1980-2021*

Estaciones	Códigos	Media	Media	Media	Media
		Anual	Anual	Anual	Anual
		1980-	1991-	2001-	2011-
		1990	2000	2010	2021
<b>Baños</b>	M0029	14,46	14,47	14,01	14,08

<b>Cebadas</b>	M0395	14,46	14,47	14,01	14,08
<b>ESPOCH</b>	M1036	14,46	14,47	14,01	14,08
<b>Guaslán</b>	M0133	14,46	14,47	14,01	14,08

- **Humedad relativa (%)**

*Datos de estaciones meteorológicas de humedad relativa 1980-2021*

<b>Estaciones</b>	<b>Códigos</b>	<b>Media</b>	<b>Media</b>	<b>Media</b>	<b>Media</b>
		<b>Anual</b>	<b>Anual</b>	<b>Anual</b>	<b>Anual</b>
		<b>1980-</b>	<b>1991-</b>	<b>2001-</b>	<b>2011-</b>
		<b>1990</b>	<b>2000</b>	<b>2010</b>	<b>2021</b>
<b>Baños</b>	M0029	81,51	84,53	86,08	84,10
<b>Cebadas</b>	M0395	84,02	84,09	83,27	80,59
<b>ESPOCH</b>	M1036	77,62	84,16	81,27	74,07
<b>Guaslán</b>	M0133	84,57	85,36	84,84	83,84

- **Velocidad del viento (m/s)**

*Datos de estaciones meteorológicas de velocidad del viento 1980-2021*

<b>Estaciones</b>	<b>Códigos</b>	<b>Media</b>	<b>Media</b>	<b>Media</b>	<b>Media</b>
		<b>Anual</b>	<b>Anual</b>	<b>Anual</b>	<b>Anual</b>
		<b>1980-1990</b>	<b>1991-</b>	<b>2001-</b>	<b>2011-</b>
		<b>2000</b>	<b>2010</b>	<b>2021</b>	
<b>Baños</b>	M0029	1,12	1,14	1,21	1,10
<b>Cebadas</b>	M0395	2,15	2,31	2,33	2,33
<b>ESPOCH</b>	M1036	2,03	2,06	2,05	2,06
<b>Guaslán</b>	M0133	1,92	2,06	2,05	2,06

**Anexo 2 Tabla estadística de Calibración exitosa del modelo SWAT**

<b>Año</b>	<b>Mes</b>	<b>Dia</b>	<b>Observado</b>	<b>Simulado</b>	<b>(Obs-Sim)<sup>2</sup></b>	<b>(Obs-Promedio Obs)<sup>2</sup></b>	<b>NSE</b>
<b>3/1/1987</b>	3	1	119,524	108,923	112,391	2294,988	0,82
<b>3/2/1987</b>	3	2	115,878	93,734	490,372	1958,950	
<b>3/3/1987</b>	3	3	100,803	85,915	221,640	851,766	
<b>3/4/1987</b>	3	4	87,754	94,017	39,226	260,372	
<b>3/5/1987</b>	3	5	125,042	129,006	15,714	2854,127	
<b>3/6/1987</b>	3	6	127,044	125,394	2,723	3072,045	
<b>3/7/1987</b>	3	7	118,633	111,928	44,951	2210,413	
<b>3/8/1987</b>	3	8	132,859	106,077	717,262	3750,464	
<b>3/9/1987</b>	3	9	97,351	100,147	7,816	662,189	
<b>3/10/1987</b>	3	10	87,084	92,529	29,651	239,198	
<b>3/11/1987</b>	3	11	70,597	84,078	181,742	1,042	
<b>3/12/1987</b>	3	12	67,948	79,078	123,871	13,469	
<b>3/13/1987</b>	3	13	62,825	79,609	281,704	77,316	
<b>3/14/1987</b>	3	14	64,107	71,464	54,128	56,415	
<b>3/15/1987</b>	3	15	62,825	65,492	7,115	77,316	
<b>3/16/1987</b>	3	16	64,075	60,951	9,759	56,896	
<b>3/17/1987</b>	3	17	93,216	56,828	1324,106	466,475	
<b>3/18/1987</b>	3	18	71,307	54,615	278,614	0,097	
<b>3/19/1987</b>	3	19	61,756	51,616	102,817	97,258	
<b>3/20/1987</b>	3	20	49,925	48,877	1,099	470,585	
<b>3/21/1987</b>	3	21	52,749	46,661	37,060	356,038	
<b>3/22/1987</b>	3	22	44,122	58,491	206,459	756,028	
<b>3/23/1987</b>	3	23	46,715	70,894	584,646	620,158	
<b>3/24/1987</b>	3	24	40,650	55,093	208,607	959,015	
<b>3/25/1987</b>	3	25	42,616	51,861	85,477	841,114	
<b>3/26/1987</b>	3	26	40,650	48,409	60,205	959,015	
<b>3/27/1987</b>	3	27	41,646	45,757	16,901	898,319	
<b>3/28/1987</b>	3	28	36,430	45,136	75,798	1238,193	
<b>3/29/1987</b>	3	29	31,621	42,845	125,987	1599,757	
<b>3/30/1987</b>	3	30	31,621	41,664	100,867	1599,757	
<b>3/31/1987</b>	3	31	30,784	43,691	166,596	1667,413	

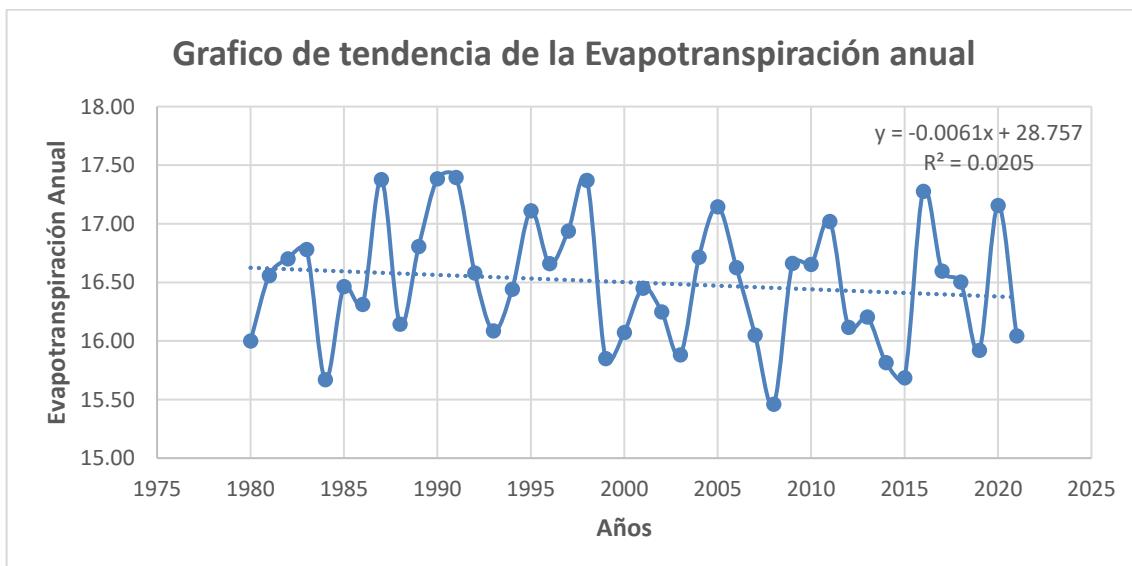
*Anexo 3 Tabla estadística de la validación del modelo SWAT*

<b>ANIO</b>	<b>Mes</b>	<b>Dia</b>	<b>Observado</b>	<b>Simulado</b>	<b>(Obs-Sim)<sup>2</sup></b>	<b>(Obs-Promedio Obs)<sup>2</sup></b>	<b>NSE</b>
<b>4/1/1987</b>	4	1	64,478	66,439	3,847	1642,840	0,76
<b>4/2/1987</b>	4	2	123,373	101,589	474,543	337,201	
<b>4/3/1987</b>	4	3	87,754	48,100	1572,418	297,768	
<b>4/4/1987</b>	4	4	56,772	47,312	89,494	2326,901	
<b>4/5/1987</b>	4	5	51,034	45,184	34,227	2913,405	
<b>4/6/1987</b>	4	6	48,846	43,316	30,583	3154,391	
<b>4/7/1987</b>	4	7	42,156	44,258	4,417	3950,621	
<b>4/8/1987</b>	4	8	103,662	72,847	949,576	1,817	
<b>4/9/1987</b>	4	9	163,813	83,853	6393,594	3457,797	
<b>4/10/1987</b>	4	10	130,377	62,325	4631,019	643,486	
<b>4/11/1987</b>	4	11	94,385	55,429	1517,569	112,890	
<b>4/12/1987</b>	4	12	181,873	49,833	17434,504	5907,926	
<b>4/13/1987</b>	4	13	95,829	46,699	2413,751	84,290	
<b>4/14/1987</b>	4	14	71,307	43,631	765,976	1135,890	
<b>4/15/1987</b>	4	15	81,784	40,418	1711,182	539,446	
<b>4/16/1987</b>	4	16	94,770	40,740	2919,275	104,857	
<b>4/17/1987</b>	4	17	71,307	44,336	727,422	1135,890	
<b>4/18/1987</b>	4	18	60,353	44,065	265,311	1994,245	
<b>4/19/1987</b>	4	19	57,937	66,217	68,551	2215,864	
<b>4/20/1987</b>	4	20	85,915	72,022	193,003	364,618	
<b>4/21/1987</b>	4	21	80,453	59,664	432,163	603,045	
<b>4/22/1987</b>	4	22	67,940	70,101	4,670	1374,182	
<b>4/23/1987</b>	4	23	64,758	91,109	694,375	1620,221	
<b>4/24/1987</b>	4	24	73,009	80,041	49,448	1024,062	
<b>4/25/1987</b>	4	25	99,615	73,754	668,797	29,106	
<b>4/26/1987</b>	4	26	85,530	81,798	13,927	379,469	
<b>4/27/1987</b>	4	27	64,758	78,696	194,268	1620,221	
<b>4/28/1987</b>	4	28	91,695	120,875	851,472	177,288	
<b>4/29/1987</b>	4	29	351,362	324,360	729,082	60689,324	
<b>4/30/1987</b>	4	30	403,454	390,014	180,634	89068,841	

**Anexo 4 Tabla de Evapotranspiración anual obtenida a partir del modelo SWAT basado en la ecuación de Penman-Monteith**

<b>Años</b>	<b>Evapotranspiración (cms)</b>
<b>1980</b>	16,00
<b>1981</b>	16,56
<b>1982</b>	16,70
<b>1983</b>	16,78
<b>1984</b>	15,67
<b>1985</b>	16,47
<b>1986</b>	16,31
<b>1987</b>	17,38
<b>1988</b>	16,14
<b>1989</b>	16,81
<b>1990</b>	17,38
<b>1991</b>	17,40
<b>1992</b>	16,58
<b>1993</b>	16,09
<b>1994</b>	16,44
<b>1995</b>	17,11
<b>1996</b>	16,66
<b>1997</b>	16,94
<b>1998</b>	17,37
<b>1999</b>	15,85
<b>2000</b>	16,07
<b>2001</b>	16,45
<b>2002</b>	16,25
<b>2003</b>	15,88
<b>2004</b>	16,72
<b>2005</b>	17,15
<b>2006</b>	16,63
<b>2007</b>	16,05
<b>2008</b>	15,46
<b>2009</b>	16,66
<b>2010</b>	16,65
<b>2011</b>	17,02
<b>2012</b>	16,12
<b>2013</b>	16,21
<b>2014</b>	15,82
<b>2015</b>	15,69
<b>2016</b>	17,28
<b>2017</b>	16,60
<b>2018</b>	16,50
<b>2019</b>	15,92
<b>2020</b>	17,16
<b>2021</b>	16,04

*Anexo 5 Grafico de tendencia de la evapotranspiración anual*



**Anexo 6 Oficio dirigido al Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología “Inamhi” para la solicitud de datos observados de caudal de la estación H0826**



Riobamba, 01 de Junio del 2025

Oficio

Doctor Bolívar Erazo

**Director Ejecutivo**

Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología

En su despacho.-

De mis consideraciones

Yo, Milton Fernando Noboa Díaz solicito de la manera más comedida, autorice a quién corresponda facilitar los datos horarios **diarios** (X)

De los parámetros Meteorológicos de : **Caudales** (X) de la estación Ref.- **Meteorológica/s** (M) o **Hidrológica/s** (H): ( **H0826 Chambo en Hda,Cahuaji** ),correspondiente/s al sector de **(Caguaji ) Provincia(Chimborazo) Cantón(Penipe )** Del Periodo: 1 de enero 1970 al 31 de diciembre de 2021

**Observaciones** Por motivos de funcionalidad de las estaciones, es posible encontrar días sin registros o datos faltantes por algunos lapsos; así mismo se entregan todos los registros en archivo digital en formato de texto (TXT).

Con sentimientos de consideración y estima.

Atentamente,

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Milton Fernando Noboa Díaz".

.....

**Firma**

Dirección: Núñez de Vela y Corea. Código postal: 170507/ Quito Ecuador  
Teléfono: (593) 2 397-1100 ext: 81003 - [www.serviciometeorologico.gob.ec](http://www.serviciometeorologico.gob.ec)



**Anexo 7 Oficio dirigido al Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología “Inamhi” para la solicitud de datos meteorológicos de múltiples estaciones**



Ministerio del  
Ambiente, Agua y  
Transición Ecológica

Riobamba, 06 de mayo del 2025

Oficio

Doctor Bolívar Erazo

**Director Ejecutivo**

Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología

En su despacho.-

De mis consideraciones

Yo, Milton Fernando Noboa Díaz solicito de la manera más comedida, autorice a quién corresponda facilitar los datos horarios diarios (X)

De los parámetros Meteorológicos de: Precipitación (X) Temperatura (X) Humedad (X) Radiación (X) Viento (X) Caudales (X) Temperatura Máxima(X) Temperatura Mínima (X) de la/s estación/es **Ref. Meteorológica/s (M) o Hidrológica/s (H): Baños(M0029), Guaslán(M0133), Huambaló(M0380), Cebadas(M0395), Alao(M0396), ESPPOCH(M1036), San Juan(M0393), Palmira(M0398), Bayushig(M0097) y para los datos de caudal , además de los solicitados, la estación hidrometeorológica Ozogoche en los Lagos(H783) correspondiente/s a:**

Código de Estación	Nombre de la Estación	Tipo (M/H)	Provincia	Cantón	Parroquia
M0029	Baños	M	Tungurahua	Baños de Agua Santa	Baños (Urbanas)
M0133	Guaslán	M	Chimborazo	Riobamba	Guaslán (rural)
M0380	Huambaló	M	Tungurahua	Pelileo	Huambaló
M0395	Cebadas	M	Chimborazo	Guamote	Cebadas
M0396	Alao	M	Chimborazo	Riobamba	Pungala
M1036	ESPOCH	M	Chimborazo	Riobamba	Lizarzaburú
M0393	San Juan	M	Chimborazo	Riobamba	San Juan
M0398	Palmira	M	Chimborazo	Guamote	Palmira
M0097	Bayushig	M	Chimborazo	Penipe	Bayushig
H783	Ozogoche en los Lagos	H	Chimborazo	Alausí	Achupallas

**Del Período: 01 de enero de 1979 al 31 de diciembre de 2022.**

**Observaciones** Por motivos de funcionalidad de las estaciones, es posible encontrar días sin registros o datos faltantes por algunos lapsos; así mismo se entregan todos los registros en archivo digital en formato de texto (TXT).