



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS
CARRERA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**

**SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO HIDROLÓGICO Y
ANÁLISIS DE LA RELACIÓN PRECIPITACIÓN–ESCORRENTÍA EN
LA SUBCUENCA DEL RÍO PINDILIG, AFLUENTE DEL RIO PAUTE**

**PROYECTO DE INVESTIGACION PRESENTADO PREVIO A LA
OBTENCIÓN DEL TITULO DE INGENIERO HIDRAULICO**

AUTOR:

Johan Leonardo Ruiz Guato

TUTOR:

Ing. Xiomara Alejandra Zambrano Navarrete Mg

LATACUNGA – ECUADOR

AGOSTO - 2025

Latacunga, Julio 28 del 2025

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo Ruiz Guato Johan Leonardo declaro ser autor del proyecto de titulación "Simulación del comportamiento hidrológico y análisis de la relación precipitación–escorrentía en la subcuenca del Río Pindilig, afluente del Río Paute", siendo la Ing. Xiomara Alejandra Zambrano Navarrete Mg tutora del presente trabajo de titulación; y eximo expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo de titulación, son de mi exclusiva responsabilidad.

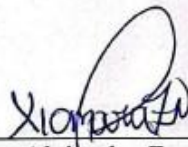


Ruiz Guato Johan Leonardo
CC: 1805803119

Latacunga, 25 julio 2025

AVAL DEL TUTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

En calidad de Tutor del Trabajo de Investigación sobre el título: “Simulación del comportamiento hidrológico y análisis de la relación precipitación–escorrentía en la subcuenca del Río Pindilig, afluente del Río Paute”, propuesto por el estudiante Johan Leonardo Ruiz Guato de la Carrera de Hidráulica, considero que dicho proyecto de titulación cumple con los requerimientos metodológicos y aportes científico-técnicos suficientes para ser sometidos al tribunal de lectores.



Ing. Xiomara Alejandra Zambrano Navarrete Mg.
C.C. 1313052453.....
TUTOR

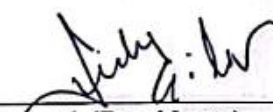
Latacunga, 29 julio 2025

AVAL DE APROBACIÓN DE LECTORES


Cumpliendo con el Reglamento de Titulación de la Universidad Técnica de Cotopaxi, en calidad de Lectores de Tribunal de Proyecto de Investigación con el Título “Análisis de la amenaza hidrometeorológica de derrumbes en las quebradas “Simulación del comportamiento hidrológico y análisis de la relación precipitación–escorrentía en la subcuenca del Río Pindilig, afluente del Río Paute”, propuesto por el estudiante Johan Leonardo Ruiz Guato de la Carrera de Ingeniería Hidráulica, me permito indicar que el estudiantes ha concluido todas las observaciones y realizado las correcciones señaladas por el Tribunal de Lectores, por lo cual presentamos el Aval de aprobación del Proyecto de Titulación correspondiente a la modalidad _Proyecto de investigación en virtud de lo cual el o la postulante puede presentarse a la Defensa de su Proyecto de Titulación.

Particular que pongo en su conocimiento para los fines legales pertinentes.

Atentamente,


Lector 1 (Presidente)
Ing. Andy Miguel
Giler Ormanza MSc.
CC: 1312820325


Lector 2
Ing. Rudys Rafael
Cusme Intriago MSc.
CC: 1313770891


Lector 3
Ing. Jorge Luis
Villarroel Guerrero MSc.
CC: 0502943491

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por darme la vida, la fuerza y la sabiduría para seguir adelante en los momentos más difíciles. Su guía fue fundamental para no rendirme.

A mi madre, Margoth, por ser madre y padre, por su amor incondicional y por enseñarme a luchar con el corazón. Todo esto es también suyo.

A mi hermana Mónica, por estar siempre a mi lado, por su cariño, apoyo y palabras que me dieron ánimo cuando más lo necesitaba.

A mi familia Mena, por su fe en mí, por acompañarme con amor y por ser ese soporte silencioso pero constante en todo este proceso.

A Camila, por su apoyo incondicional y por estar a mi lado incluso en los momentos más difíciles. Tu compañía significó más de lo que las palabras pueden decir ♡.

A mis amigos Cristofer, Joseph, Roberth, Monserrate, Marco y Jhon, por su amistad sincera, por los buenos momentos y por su apoyo incondicional en este camino.

Y para mis mascotas, Mia, Oso, Jumpio y Morita, gracias por su compañía fiel, por traer alegría a mis días y por estar siempre ahí, sin pedir nada a cambio. Su amor incondicional fue un consuelo en este proceso.

Y a la Ing. Xiomara Zambrano, mi tutora, por su orientación, comprensión y compromiso. Su guía fue clave para hacer realidad este trabajo.

Johan Ruiz

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a mi madre, Margoth, quien fue madre y padre a la vez. Su amor incondicional, sacrificio y valentía han sido el motor que me impulsó a seguir adelante. A mi hermana Mónica, por su compañía, comprensión y palabras de aliento en los momentos que más lo necesité. A mi abuelita, gracias por su amor inmenso, sus consejos sabios y por enseñarme con el ejemplo el valor del esfuerzo y la humildad. A toda mi familia Mena, por su respaldo constante y por enseñarme, con el ejemplo, el valor de la unión familiar. Y a esa persona especial que ha caminado a mi lado con paciencia, cariño y una fe inquebrantable en mí, Este logro también es tuyo. ♡. A todos ustedes, gracias por ser mi inspiración y fuerza para lograr este sueño. Como dice el Hombre Araña: 'Un gran poder con lleva una gran responsabilidad.' Que esta responsabilidad sea la guía de mis futuros pasos.

Johan Ruiz

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

TITULO: “SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO HIDROLÓGICO Y ANÁLISIS DE LA RELACIÓN PRECIPITACIÓN–ESCORRENTÍA EN LA SUBCUENCA DEL RÍO PINDILIG, AFLUENTE DEL RIO PAUTE”

Autor: Johan Leonardo Ruiz Guato

RESUMEN

El presente estudio analiza el comportamiento hidrológico de la subcuenca del río Pindilig, afluente del río Paute, mediante la implementación y calibración del modelo hidrológico SWAT+ (Soil and Water Assessment Tool Plus). Esta subcuenca es estratégica, ya que aporta caudales significativos al sistema hídrico de la presa Mazar, infraestructura clave para la generación hidroeléctrica en Ecuador.

El objetivo principal fue evaluar la relación precipitación–escorrentía para apoyar la gestión sostenible del recurso hídrico, especialmente frente a escenarios de cambio climático y crecimiento poblacional. Se aplicó una metodología mixta, combinando un análisis cualitativo del comportamiento hidrológico con simulaciones cuantitativas mediante SWAT+. Se recopilaron datos climáticos e hidrológicos del INAMHI entre 2000 y 2013, complementados con información espacial procesada en QGIS, incluyendo uso y tipo de suelo.

Durante el proceso, se realizaron calibraciones progresivas ajustando los parámetros CN2, SOL_AWC y ESCO. La simulación inicial sin ajustes mostró un pico máximo de caudal de 8,6 m³/s en junio de 2017. Tras la primera calibración, el pico aumentó a 8,73 m³/s, y finalmente, con la segunda calibración, alcanzó 9,6 m³/s, ajustándose mejor al comportamiento observado que corresponde a 11,47 m³/s.

Los indicadores estadísticos finales evidenciaron un R² de 0.91, un NSE de 0.90 y un PBIAS de -4.96%, clasificando la simulación como “muy buena”. Los resultados demostraron que SWAT+ es una herramienta eficaz para representar la dinámica hidrológica de cuencas no monitoreadas, generando información clave para la planificación y gestión integral del recurso hídrico.

Palabras clave: Escorrentía, Simulación, Precipitación, SWAT+

TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI
FACULTY OF ENGINEERING AND APPLIED SCIENCES

THEMES: “SIMULATION OF HYDROLOGICAL BEHAVIOR AND ANALYSIS OF THE PRECIPITATION–RUNOFF RELATIONSHIP IN THE PINDILIG RIVER SUB-BASIN, TRIBUTARY OF THE PAUTE RIVER”

Author: Johan Leonardo Ruiz Guato

ABSTRACT

This study analyzes the hydrological behavior of the Pindilig River sub-basin, a tributary of the Paute River, through the implementation and calibration of the SWAT+ (Soil and Water Assessment Tool Plus) hydrological model. This sub-basin is considered strategic due to its significant contribution of streamflow to the Mazar dam system, a key infrastructure for hydroelectric power generation in Ecuador.

The main objective was to evaluate the precipitation–runoff relationship to support the sustainable management of water resources, especially in the face of climate change scenarios and population growth. A mixed methodology was applied, combining a qualitative analysis of hydrological behavior with quantitative simulations using SWAT+. Climatic and hydrological data from INAMHI were collected for the period 2000–2013, complemented by spatial information processed in QGIS, including land use and soil type.

During the process, progressive calibrations were carried out by adjusting the CN2, SOL_AWC, and ESCO parameters. The initial uncalibrated simulation showed a peak flow of 8.6 m³/s in June 2017. After the first calibration, the peak increased to 8.73 m³/s, and finally, with the second calibration, it reached 9.6 m³/s, providing a better fit to the observed flow, which was 11.47 m³/s.

The final statistical indicators showed an R² of 0.91, an NSE of 0.90, and a PBIAS of - 4.96%, classifying the simulation as “very good.” The results demonstrated that SWAT+ is an effective tool for representing the hydrological dynamics of ungauged basins, generating key information for the planning and integrated management of water resources.

Keywords: Runoff, Simulation, Calibration, Precipitation, SWAT+

INDICE

1 INFORMACIÓN GENERAL	1
Tema del Proyecto	1
Modalidad de Titulación	1
Trabajo de Titulación Vinculado al Proyecto	1
Equipo de Trabajo del Trabajo de Titulación	1
Área de Conocimiento	1
2 INTRODUCCIÓN.....	2
2.1 Situación Problemática	3
2.2 Formulación del Problema.....	3
2.3 Objeto y Campo de Acción.....	4
2.3.1 Objeto de Investigación.....	4
2.3.2 Campo de Acción	4
2.4 Beneficiarios	4
2.4.1 Directo.....	4
2.4.2 Indirecto	4
2.5 Justificación	4
2.6 Objetivos	5
2.6.1 General	5
2.6.2 Específicos	5
2.7 Sistemas de Tareas.....	5
3 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	6
3.1 Ciclo Hidrológico	6
3.1.1 Definición.....	6
3.1.2 Importancia.....	6
3.1.3 Etapas del Ciclo Hidrológico	7

3.2 Precipitación	8
3.2.1 Tipos de precipitación	8
3.3 Escorrentía	10
3.3.1 Definición.....	10
3.3.2 Tipos de escorrentía	10
3.4 Cuenca Hidrográfica	11
3.4.1 Definición.....	11
3.4.2 Características de la cuenca.....	12
3.4.3 Función de la cuenca	13
3.4.4 Comportamiento hidrológico de una Cuenca.....	13
3.5 Subcuenca Hidrográfica.....	14
3.5.1 Definición.....	14
3.5.2 Delimitación de Subcuencas	14
3.6 Suelo	14
3.7 Calibración.....	15
3.8 Validación.....	15
3.9 Modelación Hidrológica	15
3.9.1 Definición.....	15
3.9.2 Importancia.....	15
3.10 Modelos de Simulación Hidrológica	16
3.11 Herramienta de evaluación del suelo y el agua (SWAT).....	16
3.11.1 Beneficios.....	16
3.11.2 Limitaciones	17
3.12 Herramientas de Modelación	17
3.12.1 Procedimientos de calibración e incertidumbre (SWAT CUP)	17
3.12.2 SUFI2 (Ajuste de incertidumbre secuencial, Version 2).....	18
3.12.3 GLUE (Estimación de la incertidumbre de verosimilitud generalizada)	18

3.12.4 ParaSOL (Archivo de datos de suelo en SWAT).....	18
3.13 Coeficientes Estadísticos	18
3.13.1 Coeficiente de Determinación (R^2)	18
3.13.2 Coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE)	19
3.13.3 Coeficiente de correlación de Pearson (R):.....	19
3.13.4 Porcentaje Sesgo (PBIAS)	19
3.14 Herramientas Alternas	19
4 MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS	20
4.1 Esquema Metodológico	20
4.2 Área de estudio	21
4.3 Datos Meteorológica Y Hidrológicos	22
4.4 Caracterización Morfológica	22
4.4.1 Área de la microcuenca (A)	22
4.4.2 Perímetro de la microcuenca (P)	23
4.4.3 Longitud axial (L_a).....	23
4.4.4 Longitud del cauce principal (L).....	23
4.4.5 Ancho promedio (A_p)	23
4.4.6 Coeficiente de compacidad (K_c).....	23
4.4.7 Coeficiente de forma (K_f)	24
4.4.8 Número de orden (N_o)	24
4.5 Uso del suelo (Land Use).....	25
4.6 Tipo de suelo (SOIL)	26
4.7 Datos Climáticos.....	27
4.8 Modelación Hidrológica	27
4.8.1 Datos de entrada para el modelo SWAT+.....	28
4.8.2 Formula del caudal en SWAT+.....	28
4.8.3 Calibración de Escenarios	29

4.8.4	Tabla de parámetros de calibración del modelo.....	33
4.9	Porcentaje de Error del Modelo Hidrológico.....	34
4.9.1	Coeficiente de determinación (R^2)	34
4.9.2	Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE)	35
4.9.3	Sesgo porcentual (PBIAS)	35
5	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	36
5.1	Caracterización Morfológica de la Subcuenca	36
5.2	Uso del suelo (Land Use).....	37
5.3	Tipo de suelo (SOIL)	38
5.4	Datos Climáticos e Hidrológicos	38
5.5	Modelación Hidrológica en SWAT+	39
5.6	Calibración de Escenarios y Validación del Modelo estadístico.....	39
5.7	Resumen de resultados.....	44
6	CONCLUSIONES.....	47
7	RECOMENDACIONES	¡Error! Marcador no definido.
8	REFERENCIAS	49
9	ANEXOS.....	1

INDICE FIGURAS

Figura 1 Unidad hidrológica y social[21].....	8
Figura 2 Cuenca Hidrográfica[21].....	12
Figura 3 Delimitación [32]	14
Figura 4 Esquema Metodológico.....	20
Figura 5 Área de Estudio	21
Figura 6 Uso del suelo LC.....	25
Figura 7 Diagrama SWAT+	27
Figura 8 Flujo y Evapotranspiración	30
Figura 9 Flujo máximo demasiado bajo	30
Figura 10 Desplazamiento de descarga	31
Figura 11 Flujo base y picos demasiados bajos.....	32
Figura 12 Carga de Nitrato	32
Figura 13 Porcentajes del Uso de Suelo	38
Figura 14 Modelación Hidrológica en SWAT+	39
Figura 15 Simulación y Calibración 1	40
Figura 16 Simulación y Calibración 2.....	41
Figura 17 Grafico estadístico - calibración 1	43
Figura 18 Grafico estadístico - calibración 2	43
Figura 19 Caudal escala logarítmica	45

INDICE TABLAS

Tabla 1 Intensidad de Precipitación.....	8
Tabla 2 Estación Meteorológica e Hidrológica	22
Tabla 3 Clasificación del Uso del Suelo en SWAT.....	25
Tabla 4SWAT+ datos de entrada de suelo requeridos	26
Tabla 5 Extracto de datos de entrada al SWAT+	28
Tabla 6 Parámetros y Rangos	33
Tabla 7 Modelo estadístico parámetros [57]	34
Tabla 8 Caracterización Morfológica	36
Tabla 9 Uso del suelo (Land Use)	37
Tabla 10 Calibración de parámetros 1	40
Tabla 11 Calibración de parámetros 2.....	41
Tabla 12 Porcentaje de Error del Modelo Hidrológico	42
Tabla 13 Resumen de resultados	44

INDICE ANEXOS

Anexo A Datos de entrada al modelo SWAT+ Fuente: INAMHI

1 INFORMACIÓN GENERAL

Tema del Proyecto

Simulación del comportamiento hidrológico y análisis de la relación precipitación–escorrentía en la microcuenca del Río Pindilig, Afluente del Rio Paute.

Modalidad de Titulación

MODALIDAD DE TITULACIÓN	HOMOLOGACIONES PARA INFORME FINAL DE TITULACIÓN	SELECCIÓN
Propuesta tecnológica	Informe de propuesta tecnológica	
	Patente, Modelo de utilidad, Certificado de propiedad intelectual.	
	Artículo científico	
Proyecto de investigación	Informe de Proyecto de investigación	X
	Artículo científico	
	Patente, Modelo de utilidad, Certificado de propiedad intelectual.	
Examen de indicadores de RDA		

Trabajo de Titulación Vinculado al Proyecto

Gestión y uso del agua: Soluciones para comunidades de la Zona 3

Equipo de Trabajo del Trabajo de Titulación

Ruiz Guato Johan Leonardo, Ing. Xiomara Alejandra Zambrano Navarrete Mg

Área de Conocimiento

07 Ingeniería, Industria y Construcción	073 Arquitectura y construcción	0731 Arquitectura y urbanismo
		0732 Construcción e ingeniería civil

Línea de investigación

Meteorología, hidrología, mecánica de fluidos, sistemas y obras hidráulicas.

Sublíneas de investigación de la Carrera

Gestión y manejo sostenible y/o sustentable del recurso hídrico.

2 INTRODUCCIÓN

En la actualidad los recursos hídricos enfrentan una crisis a nivel global y en Ecuador no es la excepción, ya que factores como el crecimiento de la población, cambio climático y contaminación han generado que la situación se agrave. En este contexto las cuencas hidrográficas juegan un papel clave ya que son espacios naturales donde circula el agua proveniente de las precipitaciones. Por ello, es importante comprender los procesos hidrológicos que se suceden dentro de ella, en particular la relación entre precipitación y escorrentía, teniendo en cuenta que este enfoque permite tomar decisiones de manera eficiente para el correcto uso de estos, sobre todo en los escenarios como el cambio climático [1].

La subcuenca del Río Pindilig representa un área de gran interés debido a su importancia en el abastecimiento de agua a las comunidades cercanas y a las actividades productivas de la zona. Forma parte de la red hidrográfica que alimenta al río Paute, uno de los sistemas fluviales más importantes del Ecuador. Esta subcuenca se ubica en la zona alta del sistema y actúa como un afluente clave que contribuye con caudales significativos, especialmente durante épocas de lluvia. Su comportamiento hidrológico tiene un impacto directo en el régimen de escorrentía del río Paute, lo que convierte al Pindilig en una unidad estratégica para el manejo integral de los recursos hídricos de la región[2]. Por otro lado aguas abajo, el río Paute alimenta la presa Mazar, una infraestructura fundamental para la generación hidroeléctrica en el país. Por lo tanto entender la dinámica del río Pindilig no solo es importante a nivel local, sino que también tiene implicaciones en el abastecimiento de agua para la presa y en la planificación energética nacional[3]. Un manejo adecuado de esta subcuenca permite mejorar la eficiencia en la regulación del embalse, reducir riesgos hidrológicos y garantizar la sostenibilidad del recurso hídrico en el sistema Paute[4].

Además, el conocimiento técnico y aplicado sobre el comportamiento hidrológico del río Pindilig, mediante la simulación de su respuesta ante eventos de lluvia y el análisis de la relación precipitación–escorrentía nos permite entender cómo influyen distintos factores físicos y climáticos en el caudal[5] lo cual puede ser de gran utilidad para instituciones encargadas de la gestión del agua, la planificación territorial y la operación de infraestructuras estratégicas como la presa Mazar, Sin embargo a pesar de su valor estratégico, el conocimiento sobre su comportamiento hidrológico es limitado lo que dificulta una gestión y planificación adecuada de sus recursos [6]. Esta problemática se agrava ante los escenarios de cambio climático ya que podría alterar los patrones hidrológicos actuales y generar impactos significativos en la disponibilidad de agua y en la ocurrencia de eventos extremos como inundaciones o sequías[7].

Para entender como es el comportamiento del agua en la Subcuenca del Río Pindiling, especialmente en la relación precipitación – escorrentía, para ello se usó el modelo hidrológico SWAT+ este nos permite simular de manera más detallada los procesos naturales, combinando datos del clima, suelo y uso del terreno[8]. El objetivo es aportar información que sirva para tomar mejores decisiones sobre el uso y manejo del agua, en un momento en que el cambio climático y la sobre población estén generando más presión sobre este recurso vital[9]. Aunque esta investigación se enfoca en una zona específica del país, su importancia va más allá ya que puede ser una base útil para otros lugares que enfrenten desafíos similares en la gestión hídrica. Finalmente es fundamental continuar promoviendo estudios a nivel de subcuenca que integren herramientas de simulación hidrológica como SWAT+, ya que permiten anticipar comportamientos del recurso hídrico y tomar decisiones más informadas. Este tipo de investigaciones no solo fortalecen la planificación y gestión del agua en el país, sino que también contribuyen a enfrentar los retos del cambio climático con una base técnica sólida y orientada al desarrollo sostenible[10].

2.1 Situación Problemática

La subcuenca del Río Pindiling presenta un comportamiento hidrológico poco documentado e estudiado, esto hace que se limite la gestión adecuada del recurso hídrico ya que en esta zona es importante para el abastecimiento de agua, por la misma razón que esta expuesta a variaciones climáticas y cambios del suelo, para esto hay que tener muy en cuenta que se pueden presentar varios factores que alteren los procesos naturales como la escorrentía y la infiltración. Es necesario aclarar que la relación entre precipitación y escorrentía en esta subcuenca no ha sido analizada con profundidad, lo que dificulta prever el comportamiento del caudal en eventos extremos como lluvias o sequías.

Actualmente, no se cuenta con suficientes herramientas técnicas que permitan simular y predecir adecuadamente estos tipos de procesos. Por tanto, se vuelve necesario aplicar modelos hidrológicos como SWAT, que integren variables físicas y climáticas del territorio, para comprender mejor la dinámica hídrica. Esta información es clave para tomar decisiones informadas que garanticen un uso eficiente y sostenibilidad del agua en la región.

2.2 Formulación del Problema

Utilizar herramientas de simulación hidrológica y el análisis de la relación precipitación – escorrentía facilitan la comprensión del comportamiento de la subcuenca del río Pindiling,

2.3 Objeto y Campo de Acción

2.3.1 Objeto de Investigación

Simulación precipitación y escorrentía.

2.3.2 Campo de Acción

2508 Hidrología	2508.99 Otras (Simulación Hidrológica)
-----------------	--

2.4 Beneficiarios

2.4.1 Directo

Povincia de Cañar, Canton Azoguez.

2.4.2 Indirecto

Comunidad científica en general.

2.5 Justificación

El análisis del comportamiento hidrológico de una subcuenca permite entender cómo responde el sistema natural frente a eventos de precipitación, lo cual es fundamental para la gestión adecuada del recurso hídrico. En este estudio se eligió la subcuenca del Río Pindilig por su importancia como tributaria de la presa Mazar, dentro de la cuenca del Río Paute. Esta zona cumple un papel clave en el aporte de agua a una infraestructura estratégica, por lo tanto, conocer su dinámica hidrológica ayuda a tomar decisiones informadas sobre conservación, planificación y manejo del agua.

Mediante la aplicación del modelo SWAT+, se simuló la relación entre la precipitación y la escorrentía en la subcuenca, utilizando datos reales de clima, suelo y uso del terreno. Esta simulación permite identificar posibles variaciones en los caudales ante diferentes condiciones, lo que resulta útil para prever riesgos hidrológicos y proponer soluciones sostenibles. Por ello, esta investigación contribuye con información técnica valiosa para el estudio y protección de fuentes hídricas en la región.

2.6 Objetivos

2.6.1 General

Analizar el comportamiento hidrológico de la subcuenca del río Pindilig mediante la implementación y calibración de un modelo hidrológico, evaluando la relación precipitación – escorrentía y su influencia en la disponibilidad y distribución del recurso hídrico en la zona de estudio.

2.6.2 Específicos

- Compilar datos meteorológicos e hidrológicos históricos provenientes de fuentes confiables para caracterizar el comportamiento climático y las condiciones hidrológicas de la subcuenca del Río Pindilig.
- Implementar un modelo hidrológico utilizando SWAT para simular los componentes los principales procesos del ciclo hidrológico en la subcuenca del Río Pindilig, con énfasis en la relación entre la precipitación y la escorrentía.
- Validar el modelo hidrológico mediante indicadores estadísticos para asegurar su precisión y confiabilidad en la simulación del comportamiento hidrológico de la subcuenca.

2.7 Sistemas de Tareas

Objetivos específicos	Actividades (tareas)	Resultados esperados	Técnicas, Medios e Instrumentos
<p>Compilar datos meteorológicos e hidrológicos históricos provenientes de fuentes confiables para caracterizar el comportamiento climático y las condiciones hidrológicas de la microcuenca del río Pindilig.</p>	<p>Recopilacion de datos Meterologicos de la estacion M0031</p>	<p>Base de datos validada de precipitación, temperatura, humedad, evapotranspiración, caudales.</p>	<p>Fuentes oficiales del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI)</p>
	<p>Analisis de datos Hidrologicos de la estacion H0902</p>		

Implementar un modelo hidrológico utilizando SWAT para simular los principales procesos del ciclo hidrológico en la microcuenca del río Pindilig, con énfasis en la relación entre la precipitación y la escorrentía.	Se generaron mapas de uso del suelo (land use) y tipos de suelo (soil) utilizando el software QGIS	Simulación hidrológica	Software SWAT, QGIS
	Simulación de los procesos hidrológicos en la subcuenca del río Pindilig con SWAT, enfocada en la relación precipitación-escorrentía.		
Validar el modelo hidrológico mediante indicadores estadísticos para asegurar su precisión y confiabilidad en la simulación del comportamiento hidrológico de la microcuenca.	Buscar metodos estadísticos hidrológicos que se adapten a la simulación.	Informe técnico de validación del modelo hidrológico	Hoja de cálculo en Excel
	Aplicación de métodos estadísticos para evaluar el desempeño del modelo (NSE, R ² , PBIAS)		

3 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

3.1 Ciclo Hidrológico

3.1.1 Definición

El ciclo hidrológico es el conjunto de procesos físicos mediante los cuales el agua se intercambia de forma continua entre la atmósfera, la superficie terrestre y el subsuelo. Incluye etapas como la evaporación, condensación, precipitación, infiltración, escorrentía y percolación. Este ciclo regula la disponibilidad del recurso hídrico y controla el balance de agua en los ecosistemas y cuencas hidrográficas [11]

3.1.2 Importancia

El ciclo hidrológico es fundamental para mantener el equilibrio del agua en los ecosistemas, ya que permite su constante movimiento, recarga de acuíferos y abastecimiento de ríos, lagos y suelos. Además, regula procesos climáticos, permite la vida vegetal y animal, y es esencial para actividades humanas como la agricultura, el consumo doméstico y la generación de energía.

Comprender este ciclo es clave para una gestión sostenible del recurso hídrico, especialmente ante escenarios de cambio climático y aumento de la demanda de agua [12].

3.1.3 Etapas del Ciclo Hidrológico

A continuación, se describen las principales etapas:

- **Precipitación:** Es el proceso por el cual el vapor de agua es condensado en la atmósfera y vuelve a la superficie terrestre en forma de lluvia, nieve, granizo o llovizna. Así mismo representa la principal fuente de ingreso de agua al sistema hidrológico, alimentando suelos, cuerpos de agua superficiales y acuíferos subterráneos [13].
- **Evaporación:** Consiste en la transformación del agua líquida en vapor debido al calentamiento solar por tanto este fenómeno ocurre principalmente en océanos, lagos, ríos y suelos húmedos cabe recalcar que este es fundamental para el inicio del ciclo hidrológico por otra parte, permite que el agua ascienda hacia la atmósfera [14].
- **Condensación:** Este proceso ocurre cuando el vapor de agua en la atmósfera se enfría y se transforma en gotas líquidas así originando la formación de nubes ya que este proceso es esencial para que posteriormente se genere la precipitación [15].
- **Transpiración:** En esta se da la liberación de vapor de agua por parte de las plantas, a través de los estomas en sus hojas dado que este vapor proviene del agua absorbida desde el suelo y contribuye activamente al contenido de humedad en la atmósfera [16].
- **Evapotranspiración:** Corresponde a la combinación de la evaporación desde superficies libres de agua y la transpiración de las plantas, puesto que representa la pérdida total de agua hacia la atmósfera desde un ecosistema ya que el mismo es mayor en áreas con cobertura vegetal [17].
- **Intercepción:** En esta etapa parte de la precipitación es retenida por la vegetación (*hojas, ramas y tallos*) antes de alcanzar el suelo dado que el agua interceptada puede evaporarse directamente sin incorporarse al sistema terrestre [18].
- **Infiltración:** Proceso mediante el cual el agua precipitada que alcanza la superficie del suelo penetra hacia el interior del mismo por lo tanto alimenta la humedad edáfica y en algunos casos este actúa recargando los acuíferos [19].
- **Escorrentía superficial:** Es el flujo de agua sobre la superficie del terreno ocurre cuando la precipitación excede la capacidad de infiltración del suelo es decir esta agua se desplaza hacia cauces y cuerpos de agua, formando parte del sistema de drenaje de la cuenca [20].



Figura 1 Unidad hidrológica y social[21]

3.2 Precipitación

3.2.1 Tipos de precipitación

La precipitación puede clasificarse según tres criterios principales :

- Por su intensidad.
- Por su forma de manifestación.
- Por su origen.

Dado que esta clasificación permite entender de mejor manera su impacto en los procesos hidrológicos y en la generación de escorrentía [20].

3.2.1.1 Por su intensidad

Este proceso se refiere a la cantidad de agua que cae por unidad de tiempo ya que esta es expresada comúnmente en milímetros por hora (mm/h), sin embargo se clasifica como débil, moderada, fuerte, muy fuerte o torrencial, dependiendo del volumen de precipitación registrado en un intervalo determinado [22].

Tabla 1 Intensidad de Precipitación

Intensidad	Acumulacion
Debilidad	Entre 0,1 y 2 mm/h
Moderado	Entre 2,1 y 1,5 mm/h
Fuerte	Entre 15,1 y 30 mm/h
Muy fuerte	Entre 30,1 y 60 mm/h
Torrencial	Más de 60 mm/h

3.2.1.2 Por la forma de manifestación

Puede clasificarse de acuerdo con su forma física al alcanzar la superficie terrestre así mismo distinguiéndose de dos tipos principales como (*líquida y sólida*) teniendo en cuenta que depende de las condiciones atmosféricas como la temperatura [22].

- **Precipitaciones Sólidas**

Se caracterizan por presentarse en forma de gotas de agua por lo tanto se clasifican según el tamaño de las gotas y la intensidad con la que caen:

- **Llovizna:** Está compuesta por una gran cantidad de gotas muy pequeñas con un diámetro inferior a 0,5 mm debido a que cae de forma continua y con baja intensidad por lo tanto genera acumulaciones reducidas[22].
- **Lluvia:** Consiste en gotas de agua con diámetros superiores a 0,5 mm, que caen de manera más intensa y sostenida, puesto que su velocidad de caída es moderada y puede variar en duración e intensidad [22].
- **Chubascos:** Estas son precipitaciones de corta duración pero con alta intensidad a causa de esto las gotas suelen ser grandes y caen de forma repentina, las mismas a menudo están asociadas a nubes convectivas [22].

3.2.1.3 Según su origen

Se basa en el proceso atmosférico que da lugar a la formación de las nubes y al mismo al tipo de precipitación generada, los principales tipos se clasifican en:

- **Precipitaciones orográficas**

Estas se generan cuando una masa de aire húmedo es obligada a ascender al encontrarse con una barrera montañosa ya que durante el ascenso el aire se enfría progresivamente dando como resultado la condensación del vapor de agua y la formación de nubes que originan la precipitación [22].

- **Precipitaciones convectivas**

Son causadas por el ascenso vertical de aire cálido y húmedo desde la superficie terrestre ya que este tipo de precipitación se caracteriza por ser intensa, de corta duración puesto a que la misma está asociada con tormentas eléctricas, en especial en regiones tropicales o durante el verano [22].

- **Precipitaciones frontales**

Se producen en las zonas de transición es decir que se dan dos masas de aire con diferentes características térmicas y de humedad las mismas que son denominadas frentes, dicho de esta

manera se da cuando el aire cálido asciende sobre el aire frío en estos frentes generando así precipitación [22].

3.3 Escorrentía

3.3.1 Definición

Es un proceso hidrológico esencial que consiste en el desplazamiento del agua precipitada sobre la superficie terrestre en otras palabras cuando esta no logra ser interceptada por la vegetación ni infiltrarse en el suelo, cabe recalcar que este fenómeno se produce cuando la intensidad o acumulación de la precipitación supera la capacidad de infiltración del terreno[23].

3.3.2 Tipos de escorrentía

La escorrentía se clasifica en función a la vía por la cual el agua fluye hacia el sistema de drenaje:

3.3.2.1 Escorrentía superficial o directa

La escorrentía superficial es aquella porción del agua de precipitación que al no ser interceptada por la vegetación ni infiltrarse en el suelo esta empieza a fluir inmediatamente sobre la superficie terrestre así desplazándose por acción de la gravedad hacia la red de drenaje natural es decir este tipo de escorrentía no queda retenida en depresiones del terreno ni está sujeta a los procesos de evapotranspiración debido a que lo constituye el componente más rápido y dinámico del escurrimiento el mismo que es responsable del aumento repentino del caudal en los ríos durante eventos de lluvia intensa[24].

3.3.2.2 Escorrentía hipodérmica

Es aquella parte del agua de precipitación que, tras infiltrarse en el suelo se desplaza de forma subhorizontal a través de los horizontes superiores del mismo, posteriormente puede reaparecer de manera súbita en la superficie generalmente en forma de manantial, para luego incorporarse a pequeños surcos superficiales que la conducirán hacia la red de drenaje [24].

3.3.2.3 Escorrentía subterránea

Es la lluvia que entra en el nivel freático que circula hasta llegar a la red de drenaje[25], teniendo en cuenta que se forma con la unión de las partículas del agua precipitada que penetra a través de los poros y fisuras de las rocas del subsuelo a este proceso se lo conoce como infiltración

sabiendo que en este proceso el agua que se infiltra se realizará con una velocidad pequeña o lenta [26].

3.3.2.4 Factores que afecta la generación de escorrentía

Esta influenciada por diversos factores los cuales pueden agruparse en cuatro categorías que vendrían a ser las principales:

- **Factores meteorológicos:** Se refieren principalmente a la precipitación y la temperatura ya que determinan la cantidad de agua disponible y la capacidad de evaporación.
- **Factores geográficos:** Incluyen la localización geográfica de la cuenca teniendo en cuenta su latitud, longitud y altitud. Asimismo, la morfología del terreno juega un papel importante ya que influye en la velocidad y dirección del flujo superficial.
- **Factores hidrogeológicos:** Comprenden características como la permeabilidad del suelo y la profundidad de sus capas puesto que estas condicionan la infiltración por tanto la proporción de agua que se convierte en escorrentía [27].

3.4 Cuenca Hidrográfica

3.4.1 Definición

Una cuenca hidrográfica es un área delimitada por la topografía, es decir toda el agua de lluvia que cae en ella es recolectada y drenada por un mismo sistema de ríos o quebradas hasta salir por un único punto de descarga tomando en cuenta que dentro de la cuenca por lo general se reconocen tres zonas principales:

- Alta
- Media
- Baja

Estas zonas pueden influir tanto en el comportamiento del clima local como en la forma en que se usan y gestionan el recurso hídrico[28].

CUENCA HIDROGRÁFICA

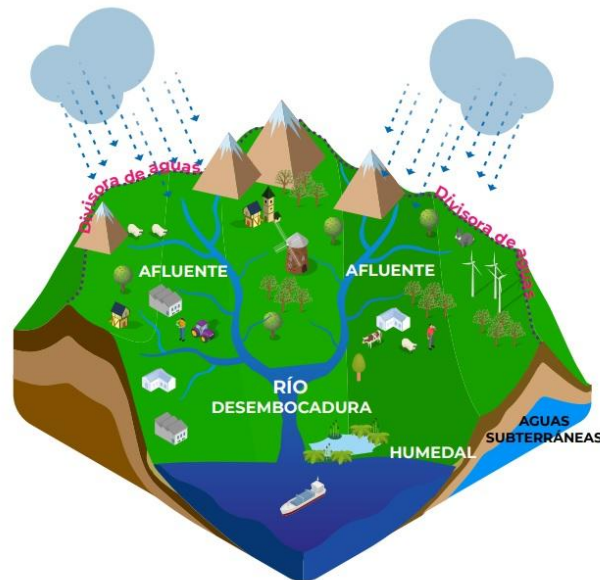


Figura 2 Cuenca Hidrográfica[21].

3.4.2 Características de la cuenca

Las características de esta son fundamentales para entender cómo responder con mayor facilidad ante eventos hidrológicos.

- **Propiedades Geométricas**

Incluyen el tamaño, la forma y la densidad de drenaje, tienen en cuenta que estos factores influyen directamente en el tiempo de concentración y en la rapidez con que fluye el agua hacia la salida de la cuenca [29].

- **Propiedades Físicas**

Se refieren al uso del suelo, la capacidad de infiltración, tipos de suelo, características geológicas como la permeabilidad y el rendimiento y la retención específica, por lo tanto estos se consideran aspectos topográficos como la pendiente, la orientación y la elevación del terreno[29].

3.4.2.1 Área de drenaje

Corresponde a la superficie proyectada horizontalmente que es limitada por la línea divisoria de aguas ya que esta área define el espacio donde se recoge el agua que fluye hacia la red de drenaje [30].

3.4.2.2 Forma

La forma de una cuenca es determinada principalmente por factores geológicos ya que al mismo tiempo este un aspecto clave porque influye en el tiempo de concentración sabiendo que el mismo define el tiempo que tarda una gota de agua en recorrer la distancia desde el punto más lejano de la cuenca hasta su salida [30].

3.4.2.3 Sistema de drenaje

Este sistema puede analizarse a través de dos elementos importantes:

- **Grado de ramificación**

Se refiere al nivel de orden de los ríos puesto que estos forman la red de drenaje en la cuenca.

- **Densidad de drenaje**

Se relaciona con la cantidad total de canales de drenaje por unidad de superficie ya que esto nos permite evaluar la eficiencia con la que la cuenca evacua el agua[30].

3.4.3 Función de la cuenca

Cumple diversas funciones que integran aspectos hidrológicos, ecológicos, ambientales y socioeconómicos. Cada uno de estos componentes desempeña un papel clave en el equilibrio y funcionamiento del sistema natural [30].

3.4.3.1 Función hidrológica

La función hidrológica de una cuenca se manifiesta a través de varias acciones esenciales para el ciclo del agua, entre las principales se destacan el drenaje del agua de la precipitación, la recarga de las fuentes de agua subterránea y la recarga de las fuentes de agua superficial [30].

3.4.4 Comportamiento hidrológico de una Cuenca

Se refiere a la forma en que actúa la cuenca frente a la precipitación teniendo en consideración los procesos como la infiltración, escorrentía, almacenamiento y flujo subterráneo. Este tipo de comportamiento depende de múltiples factores como el tipo de suelo, la cobertura vegetal, la pendiente del terreno, el uso del suelo y las condiciones climáticas[30].

3.5 Subcuenca Hidrográfica

3.5.1 Definición

Una subcuenca hidrográfica es una porción de terreno cuya escorrentía superficial fluye completamente hacia un punto determinado dentro del curso de agua asimismo en este punto puede ser un lago, una confluencia de ríos u otra ubicación dentro de una cuenca mayor, en otras palabras la subcuenca forma parte de una cuenca principal pero con la diferencia que tiene límites definidos que permiten un análisis más detallado de los flujos hídricos[31].

3.5.2 Delimitación de Subcuencas

Es una etapa clave en los estudios hidrológicos y en la planificación de proyectos de gestión del agua, por ello este proceso permite identificar con precisión las áreas que aportan escorrentía hacia un punto específico del sistema de drenaje, gracias a esta información es posible analizar el comportamiento del agua en distintos sectores de la cuenca y hacer facilitar la toma de decisiones y proponer medidas de manejo adecuadas para cada zona [31].



Figura 3 Delimitación [32]

3.6 Suelo

El término suelo al igual que muchas palabras comunes puede tener varios significados, por lo tanto se entiende como el medio natural que permite el crecimiento de las plantas. Sin embargo el mismo es el resultado de un proceso complejo que ocurre a lo largo del tiempo teniendo en cuenta que este es influenciado por factores como el clima, la topografía, los organismos (*flora, fauna y actividad humana*) y los materiales parentales es decir las rocas y minerales de origen [33].

3.7 Calibración

Es un proceso fundamental en la modelación hidrológica ya que permite verificar qué tan representativos son los caudales simulados respecto a los datos históricos observados, sin importar cuán avanzado o complejo sea un modelo siempre existirá cierto grado de incertidumbre a lo largo de sus diferentes fases.

Este proceso se desarrolla en varias etapas claves:

- Se definen los parámetros de entrada del modelo.
- Se ejecutan simulaciones basadas en esos valores.
- Finalmente se evalúan los resultados obtenidos.

El objetivo principal es aplicar parámetros que permita que el modelo reproduzca de manera satisfactoria el comportamiento del sistema real [34].

3.8 Validación

Mediante este proceso se demuestra que un modelo es capaz de realizar predicciones confiables en un lugar específico y durante un período distinto al utilizado para su calibración, en otras palabras un modelo se considera validado si al aplicarlo fuera del período calibrado el mismo mantiene una precisión aceptable y teniendo en cuenta que los errores se encuentren dentro de límites razonables.

Cabe destacar que la validación no puede ser generalizada ya que depende del área de estudio y de las condiciones particulares del sistema modelado, por esta razón suele asumirse que el modelo seguirá siendo válido en el futuro siempre que las condiciones climáticas de uso de suelo y demás factores permanezcan relativamente estables [34].

3.9 Modelación Hidrológica

3.9.1 Definición

Es una herramienta eficiente que permite analizar a detalle el comportamiento de los distintos procesos que ocurren dentro de una cuenca hidrográfica por lo tanto entre estos procesos se incluye la distribución espacial y temporal de la precipitación así como la generación y el movimiento de la escorrentía superficial [35].

3.9.2 Importancia

Su importancia radica en la capacidad de representar y simular matemáticamente el funcionamiento de las cuencas puesto que esto facilita la comprensión de los procesos que

forman parte del ciclo hidrológico así permitiendo prever eventos relacionados con el agua, como inundaciones, sequías o variaciones en la disponibilidad del recurso hídrico. Además la modelación hidrológica apoya la toma de decisiones en la planificación y gestión sostenible del agua [36].

3.10 Modelos de Simulación Hidrológica

3.11 Herramienta de evaluación del suelo y el agua (SWAT)

El modelo SWAT es una herramienta de simulación hidrológica que fue desarrollada para evaluar el impacto de distintas prácticas de manejo en el agua, el suelo y la calidad ambiental dentro de una cuenca hidrográfica, este es un modelo continuo en el tiempo, semidistribuido y basado en procesos físicos. Su función se centra en el principio del balance hídrico, puesto que permite estimar las entradas, salidas y almacenamiento de agua dentro de la cuenca, por ello hay que tener en cuenta que el mismo lleva a cabo procesos como la simulación ya que el área de estudio se divide en subcuencas dado que representan unidades más pequeñas con características relativamente homogéneas [37].

La precisión este modelo se mejora mediante un proceso de calibración aunque se basa en datos históricos de escorrentía y sedimentos. Además, diversos estudios han incorporado parámetros relacionados con la pérdida de suelo en pendientes lo cual contribuye a una mejor representación del comportamiento hidrológico. El uso de subcuencas dentro de la simulación resulta especialmente útil en regiones donde el uso del suelo, las características topográficas y las propiedades físicas del terreno son heterogéneas. Ya que dicho programa requiere información detallada sobre variables climáticas, tipo de suelo, cobertura vegetal, uso del suelo, topografía y prácticas agrícolas presentes en el área de estudio [37].

3.11.1 Beneficios

Una de las principales ventajas de SWAT+ es que se puede aplicar incluso en cuencas donde no existen datos históricos disponibles ya que esto permite hacer simulaciones con base en información estimada ayudando a proyectar diferentes escenarios, como el cambio en el uso del suelo o por el cambio climático.

Además este modelo permite cuantificar cómo varían las diferentes fases del ciclo hidrológico como la escorrentía, la infiltración o la evapotranspiración, teniendo en cuenta que al momento de que se calibra correctamente se obtienen resultados que se ajusta bastante bien a la realidad,

lo que lo convierte en una herramienta útil y confiable para estudios de gestión del recurso hídrico [37].

3.11.2 Limitaciones

El principio de equifinalidad plantea que en los modelos hidrológicos pueden existir múltiples combinaciones de parámetros que generan resultados similares en la simulación del caudal, lo que implica que no necesariamente existe una única solución óptima [38].

Este concepto adquiere especial relevancia en modelos como SWAT+, uno de los métodos más utilizados es el enfoque de Monte Carlo, que consiste en ejecutar numerosas simulaciones con combinaciones aleatorias de parámetros, permitiendo identificar aquellas configuraciones que mejor representan el comportamiento hidrológico observado [39].

Para la implementación en SWAT+ esta técnica debido a que es una herramienta relativamente nueva, con una estructura más detallada y exigente, además requiere un tiempo considerable para ejecutar cada simulación. A pesar de esta restricción, comprender el principio de equifinalidad resulta fundamental para interpretar los resultados del modelo.

3.12 Herramientas de Modelación

3.12.1 Procedimientos de calibración e incertidumbre (SWAT CUP)

SWAT CUP es un programa que se utiliza junto al modelo SWAT+ para mejorar la precisión del mismo ya que su principal función es ayudar en la calibración pero también permite hacer la validación, el análisis de sensibilidad y el análisis de incertidumbre.

El mismo integra distintos métodos de calibración como SUFI2, GLUE, ParaSOL, MCMC y PSO, asimismo todos estos procedimientos están disponibles dentro de la herramienta y se pueden usar según los objetivos del estudio o con la información que se tenga [40].

Una de sus ventajas es que permite ajustar los parámetros del modelo de forma más eficiente así ayudando a que las simulaciones se acerquen mejor a los datos reales para que se pueda entender con mayor claridad cómo responde la cuenca ante distintos escenarios. Además, ayuda a identificar qué parámetros influyen más en los resultados permitiéndonos reducir la incertidumbre del modelo. Por esto, SWAT CUP se ha convertido en una herramienta muy útil en estudios hidrológicos para los que buscan resultados confiables [41].

3.12.2 SUFI2 (Ajuste de incertidumbre secuencial, Version 2)

El algoritmo SUFI2 (Ajuste de incertidumbre secuencial, Version 2) realiza la calibración del modelo mediante un proceso iterativo, teniendo en cuenta que cada iteración incluye múltiples simulaciones sabiendo que las cuales se ajustan progresivamente utilizando los resultados obtenidos en la ronda anterior. De esta forma, se optimizan los valores de las variables simuladas y al finalizar el proceso se obtiene un conjunto de rangos para los parámetros, los cuales representan de forma más precisa los procesos hidrológicos de acuerdo a las condiciones físicas de cada cuenca [42].

3.12.3 GLUE (Estimación de la incertidumbre de verosimilitud generalizada)

Explorar el espacio de parámetros, conserva solo los modelos "comportamentales" y reconoce la equifinalidad (varios conjuntos que explican bien los datos). Estimación de incertidumbre basada en distribución de densidad[43].

3.12.4 ParaSOL (Archivo de datos de suelo en SWAT)

ParaSOL es un archivo utilizado en SWAT+ que contiene información detallada sobre las propiedades físicas y químicas del suelo. Sabiendo que entre los datos que almacena se incluyen la profundidad del perfil, la densidad aparente, la capacidad de retención de agua, la conductividad hidráulica saturada y el contenido de carbono orgánico, por esta razón este tipo de información es clave para representar de forma adecuada la interacción entre el suelo y el agua en los modelos hidrológicos [44].

3.12.4.1 MCMC (Cadena de MárkovMonte ZCarlo)

Genera cadenas de Markov para muestrear de la distribución posterior de parámetros. Explora correlaciones y ofrece estimación completa de incertidumbre[43].

3.13 Coeficientes Estadísticos

3.13.1 Coeficiente de Determinación (R^2)

El coeficiente de determinación es representado como R^2 y mide la proporción de la variabilidad observada que es explicada por el modelo dado que su valor varía entre 0 y 1 donde valores cercanos a 1 indican una buena capacidad del modelo para representar los datos observados [45].

3.13.2 Coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE)

Este coeficiente evalúa la precisión de las simulaciones respecto a los datos observados teniendo en cuenta que un valor de 1 indica una predicción perfecta mientras que valores menores a 0 indican que la media observada sería mejor estimador que el modelo [46].

3.13.3 Coeficiente de correlación de Pearson (R):

Este coeficiente mide la relación lineal entre dos variables por ejemplo, valores observados y simulados, teniendo en cuenta que su valor varía entre -1 y 1 [47].

- $R = 1$: correlación positiva perfecta.
- $R = -1$: correlación negativa perfecta.
- $R = 0$: sin correlación

3.13.4 Porcentaje Sesgo (PBIAS)

El PBIAS mide la tendencia del modelo a sobrestimar o subestimar los valores observados. Un valor cercano a 0 indica una simulación precisa [48].

- $PBIAS > 0$: subestimación.
- $PBIAS < 0$: sobrestimación.

3.14 Herramientas Alternas

3.14.1.1 QGIS

La herramienta QGIS es un sistema de información geográfica (SIG) de código abierto en el análisis geoespacial. A lo largo de dos décadas se ha transformado en un proyecto amateur así convirtiéndose en una plataforma reconocida a nivel mundial. Por esta razón su evolución ha estado acompañada por una comunidad activa que ha enfrentado retos técnicos y de gobernanza ayudando a impulsar mejoras constantes en su funcionamiento y accesibilidad [49].

3.14.1.2 MapSWAT

MapSWAT es un complemento de QGIS para generar mapas de entrada SWAT o SWAT+ listos para usar. Este optimiza el proceso de obtención y preparación de los mapas de entrada para ambas versiones QGIS de SWAT [50].

4 MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS

En este proyecto la metodología utilizada es Cuantitativa y Cualitativa, cualitativa para el análisis del comportamiento hidrológico en la subcuenca del río Pindilig, y el enfoque cuantitativo nos permitirá obtener la relación que existe entre precipitación y escorrentía mediante los caudales observados y simulados, identificando a través de estadística la precisión del modelo hidrológico.

4.1 Esquema Metodológico

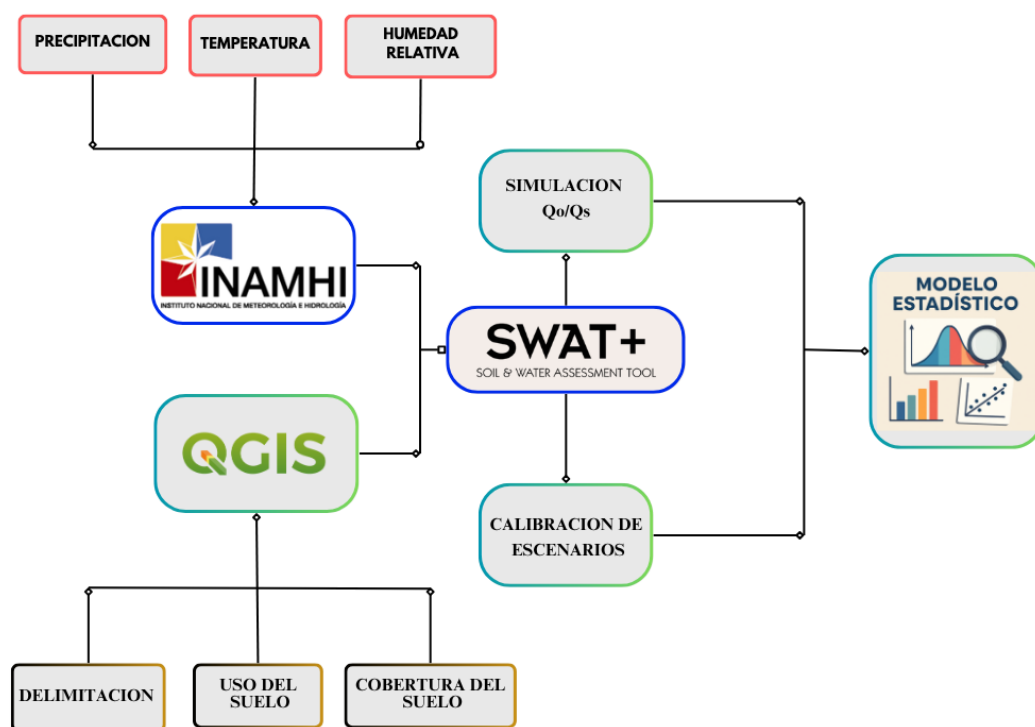


Figura 4 Esquema Metodológico

La metodología a seguir consiste en una recopilación de datos e información del área de estudio obtenida y tratada en el programa QGIS junto con ello los datos proporcionados del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) como son la precipitación, la temperatura máxima y mínima, humedad relativa entre otros, asimismo se procedió con la parte de la modelación para luego pasar a la calibración y por último comprobar los resultados con un modelo estadístico.

4.2 Área de estudio

El Río Pindilig está formado por la confluencia de los ríos Macas y Dudas. Se localiza en la parte occidental de la cuenca del Paute, formando la subcuenca del Río Pindilig con una superficie de 16810,74 Ha constituye una de las subcuencas tributarias más importantes aguas arriba de la presa Mazar.

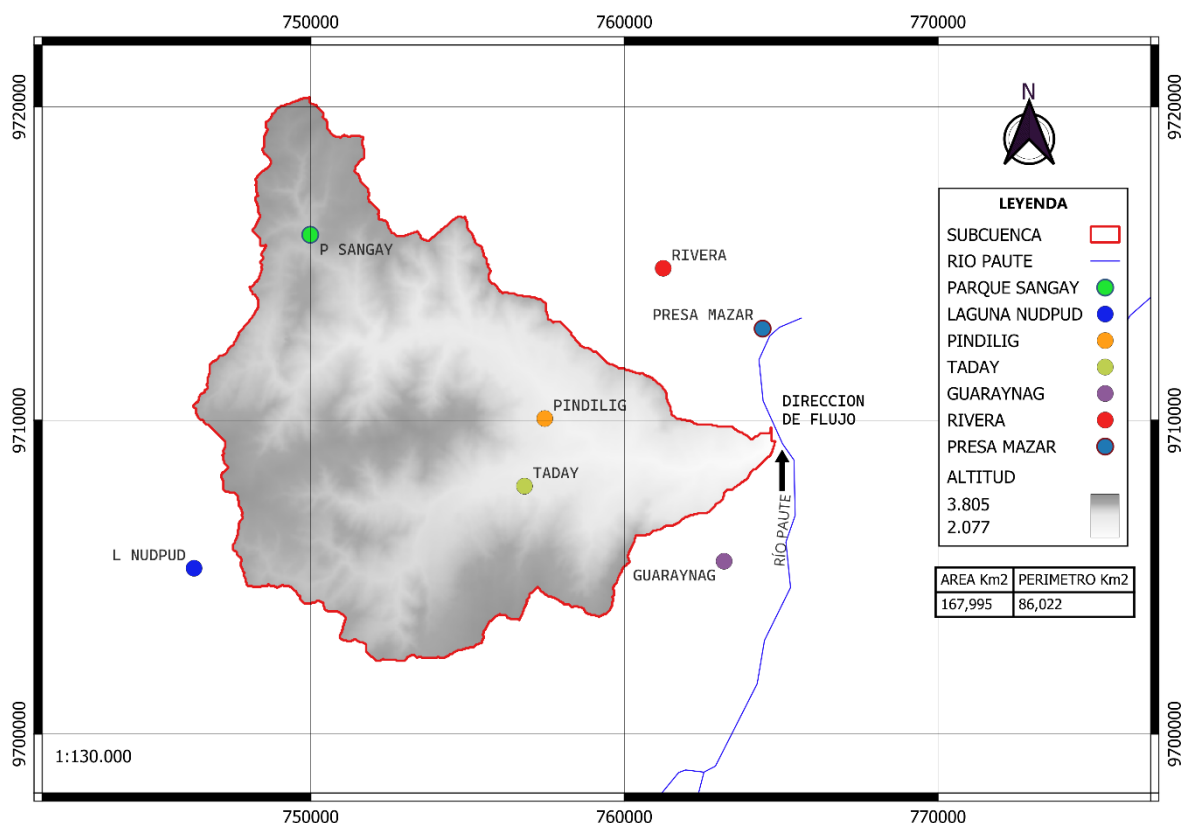
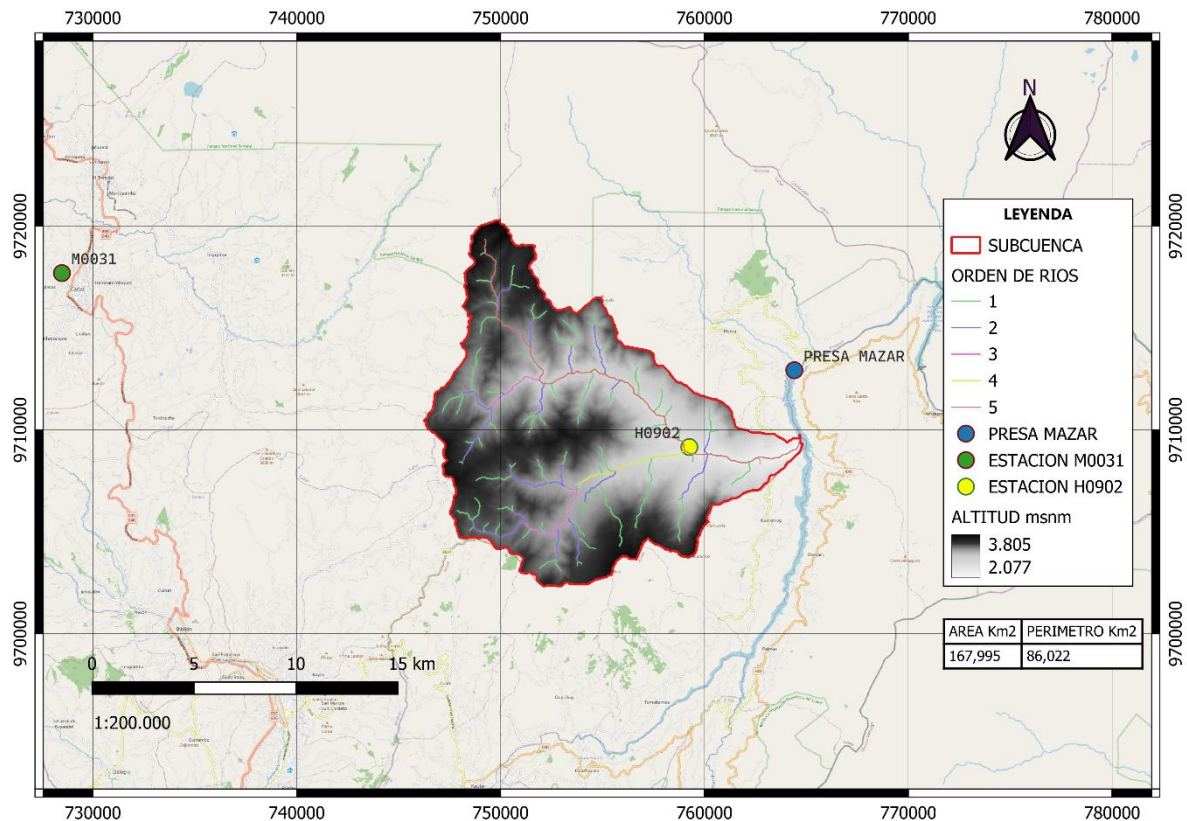


Figura 5 Área de Estudio

4.3 Datos Meteorológica Y Hidrológicos



Para los datos de precipitación, humedad, temperatura máxima y mínima se obtuvo del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) de la estación más cercana a la zona de estudio la cual se muestra en la tabla 2.

Tabla 2 Estación Meteorológica e Hidrológica

Información Meteorológica		Información Hidrológica	
Código	M0031	Código	H0902
Estación	Cañar	Estación	Dudas de Pindilig
Latitud	2° 33' 7" S	Latitud	2° 37' 45" S
Longitud	78° 56' 43" W	Longitud	78° 40' 6" W
Elevación	3083 msnm	Elevación	2450 msnm

4.4 Caracterización Morfológica

4.4.1 Área de la microcuenca (A)

El área de la microcuenca o también conocida como área de drenaje representa la superficie total que contribuye al escurrimiento hacia un punto de salida específico, cabe recalcar que este

se expresa comúnmente km^2 ya que constituye uno de los parámetros fundamentales para entender el comportamiento hidrológico de una cuenca [51].

4.4.2 Perímetro de la microcuenca (P)

El perímetro de la microcuenca corresponde a la longitud total del contorno que delimita su superficie teniendo en cuenta que este límite está definido por las divisorias de aguas es decir las elevaciones más altas que rodean la cuenca y separan su área de drenaje [51].

4.4.3 Longitud axial (La)

Es la distancia más larga que es medida a lo largo del cauce principal de la microcuenca que va desde su punto de origen en la parte más alta hasta su desembocadura, dado que representa el trayecto máximo del flujo de agua dentro del sistema de drenaje [51].

4.4.4 Longitud del cauce principal (L)

Se refiere a la distancia recorrida por el flujo de agua a lo largo del río o quebrada principal es decir desde su nacimiento en la parte alta de la microcuenca hasta su desembocadura o punto de salida ya que esta medida se obtiene siguiendo el recorrido natural del cauce[51].

4.4.5 Ancho promedio (Ap)

El mismo se calcula dividiendo el área total entre la longitud axial teniendo en cuenta que este valor proporciona una idea general de la forma de la cuenca y sugiere qué tan extendida o compacta es en sentido perpendicular al flujo principal [51].

$$Ap = \frac{A}{La}$$

(1)

Dónde:

Ap: Ancho promedio en km .

A: Área de la microcuenca en km^2 .

La: Longitud axial en km .

4.4.6 Coeficiente de compacidad (Kc)

Se obtiene mediante la relación entre el perímetro de la microcuenca y el perímetro de una circunferencia que tenga la misma área demostrando así que este índice permite evaluar qué tan

compacta o irregular es la forma de la cuenca sabiendo que mientras más cercano a 1 sea el valor más circular más eficiente será la forma en términos de escurrimiento [51].

$$Kc = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}}$$

(2)

Dónde:

Kc: Coeficiente de compacidad (adimensional).

P: Perímetro en *km*.

A: Área de la microcuenca en *km*².

4.4.7 Coeficiente de forma (Kf)

Permite analizar la forma geométrica de la microcuenca que se obtiene mediante la relación entre el área y el cuadrado de la longitud del cauce principal es decir el valor alto indica una cuenca más ancha y corta mientras que un valor bajo sugiere una cuenca más alargada [51].

$$Kf = \frac{A}{L^2}$$

(3)

Dónde:

Kf: Coeficiente de compacidad (adimensional).

A: Área de la microcuenca en *km*².

L: Longitud del cauce principal en *km*.

4.4.8 Número de orden (No)

El número de orden representa el grado de ramificación del sistema fluvial dentro de la microcuenca en el cual una corriente sin afluentes se clasifica como de primer orden, sabiendo que la unión de dos corrientes del mismo orden genera una corriente de orden superior. Por ejemplo dos corrientes de primer orden forman una de segundo orden y dos de segundo orden forman una de tercer orden y así sucesivamente puesto que este parámetro permite evaluar la complejidad y desarrollo de la red hidrográfica [51].

4.5 Uso del suelo (Land Use)

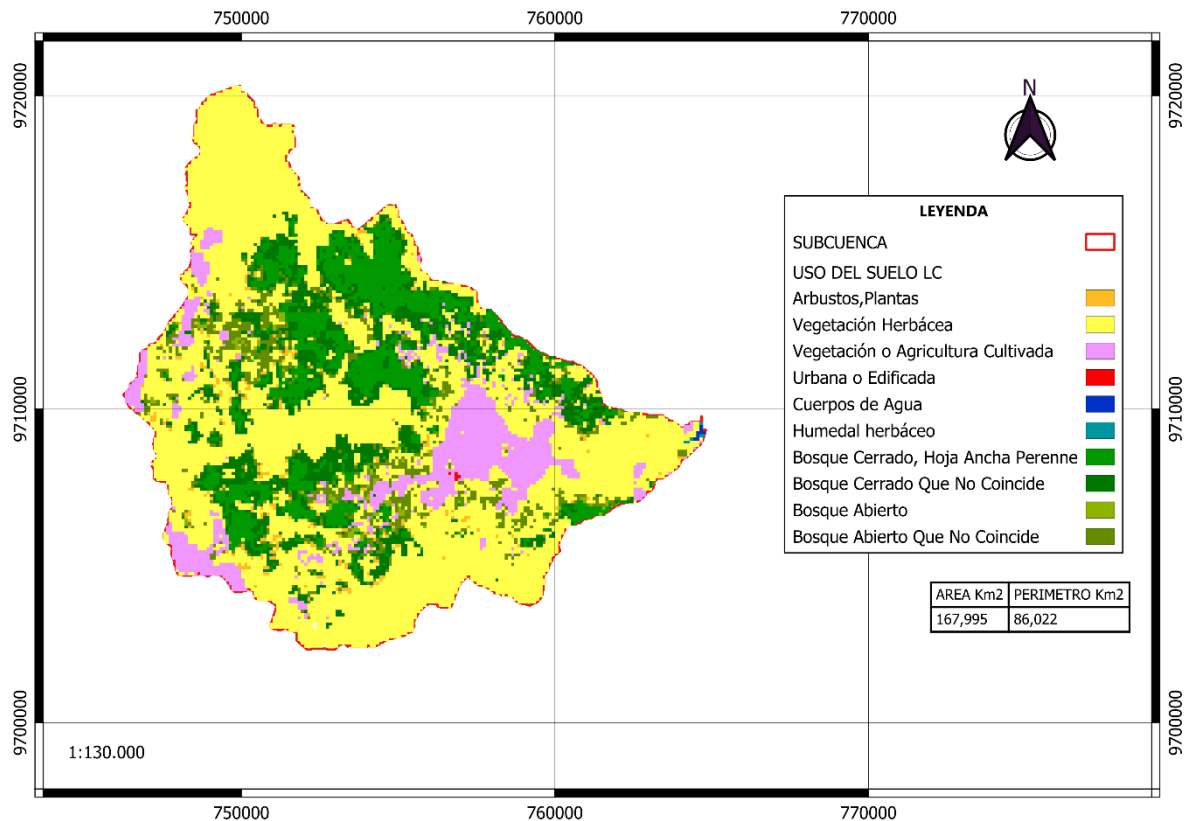


Figura 6 Uso del suelo LC

Para el desarrollo de la investigación se empleó el mapa de cobertura terrestre dinámica con resolución de 100 m (CGLS-LC100) que fue proporcionado por el Servicio Global de Tierras de Copernicus (CGLS). Este producto corresponde al Land Cover y está disponible para el periodo 2015-2019, el mismo combina una clasificación estándar con capas continuas lo que permite representar con mayor precisión las áreas de cobertura heterogénea. La información obtenida fue adaptada a la clasificación interna de usos y coberturas de suelo que maneja el modelo SWAT el cual cuenta con un sistema propio para definir las categorías de suelo y vegetación, facilitando así su integración en los procesos de simulación hidrológica y análisis de uso del suelo[52].

Tabla 3 Clasificación del Uso del Suelo en SWAT

Categoría	Código
Tierra agrícola – uso genérico	AGRL
Tierra agrícola – cultivos en hileras	AGRR
Tierra agrícola – cultivos de cobertura cerrada	AGRC
Plantaciones frutales (huertos)	ORCD

Praderas de heno	HAY
Bosque mixto	FRST
Bosque caducifolio	FRSD
Bosque perennifolio	FRSE
Humedales	WETL
Humedales arbolados	WETF
Humedales no arbolados	WETN
Matorrales	SHRB
Pastizales	PAST
Pastizales de verano	SPAS
Pastizales de invierno	WPAS
Pastizales de gramíneas	RNGE
Pastizales arbustivos	RNGB
Pastizales áridos	SWRN
Cuerpos de agua	WATR

4.6 Tipo de suelo (SOIL)

Los datos de uso de uso de suelo se obtuvieron de Google Earth Engine (GEE), utilizando la base de datos global de suelos de la FAO/UNESCO, esta base de datos proporciona información sobre las características incluyendo el área de estudio la cual fue descargada por el plugin MapSwat con una resolución espacial de de 250 metros por píxel basado en datos históricos [53].

Tabla 4 SWAT+ datos de entrada de suelo requeridos

Parámetro	Descripción	Unidades
SOLO	Número de horizontes del suelo dentro del perfil del suelo	–
ZMX	Profundidad máxima de enraizamiento del perfil del suelo	mm
Z1	Profundidad desde la superficie hasta el fondo del horizonte del suelo	mm
BD ¹	Densidad aparente del suelo	g/cm ³
AWC ¹	Capacidad de agua disponible	mm/mm
K ¹	Conductividad hidráulica saturada	mm/hora
CBN ¹	Contenido de carbono orgánico	% del peso del suelo
ARCILLA ¹	Fracción de arcilla	% del peso del suelo
LIMO ¹	Fracción de limo	% del peso del suelo
ARENA ¹	Fracción de arena	% del peso del suelo
ROCA ¹	Contenido de fragmentos gruesos	% del peso total
ALBA	Albedo del suelo húmedo del horizonte superficial del suelo	–

USLE_K	Factor de erosionabilidad del suelo del horizonte superficial del suelo	cm/día
--------	---	--------

4.7 Datos Climáticos

Los datos climáticos usados para la modelación fueron proporcionados por el INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología) como son la temperatura máxima y mínima, precipitación, humedad relativa, nubosidad, caudales entre otros con una serie de datos alrededor del 2000 - 2013 la misma que sirvió de entrada para el programa Swat+.

4.8 Modelación Hidrológica

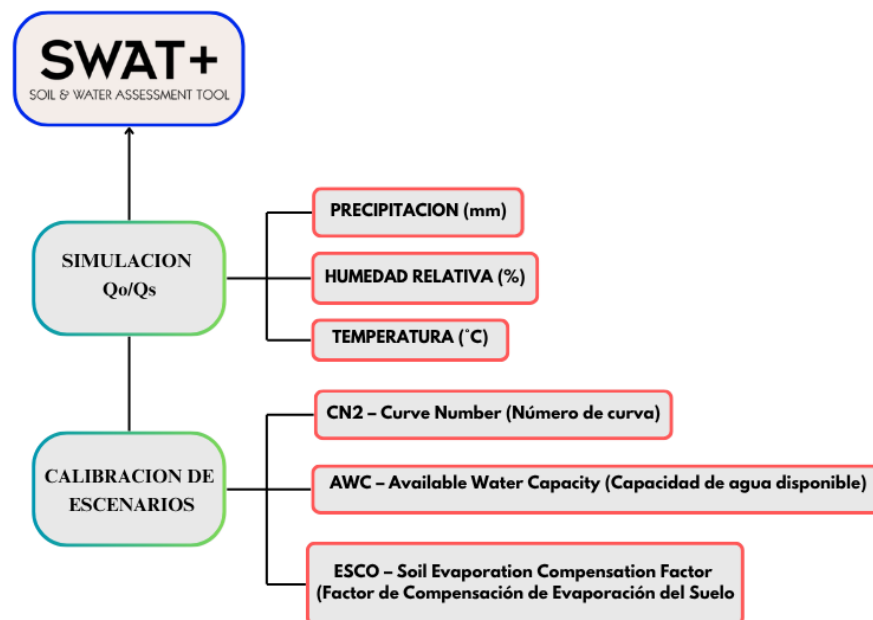


Figura 7 Diagrama SWAT+

El modelo SWAT+ (Soil and Water Assessment Tool) se utilizó para simular el comportamiento del caudal en la subcuenca del Río Pindilig, como parte de la metodología, se ingresaron datos climáticos esenciales como la precipitación (mm), la humedad relativa (%) y la temperatura (°C), los cuales fueron obtenidos de fuentes oficiales como el INAMHI, además la información permitió representar las condiciones atmosféricas de la zona de estudio, necesarias para iniciar el proceso de modelación hidrológica y generar los caudales simulados. Luego de la modelación inicial, se realizó la calibración de escenarios para mejorar el ajuste entre los datos simulados y observados, esta etapa se centró en la modificación de parámetros clave como CN2 (número de curva), AWC (capacidad de agua disponible en el suelo) y ESCO (factor de evaporación del suelo), considerados altamente sensibles dentro del modelo,

evaluando los resultados obtenidos en cada simulación hasta lograr un comportamiento que represente adecuadamente la realidad de la subcuenca.

4.8.1 Datos de entrada para el modelo SWAT+

Tabla 5 Extracto de datos de entrada al SWAT+

Año	Mes	Precipitación (mm)	T Max (°C)	T Min (°C)	Humedad %	Caudal m ³ /s
2001	1	48.7	16.9	7.1	0.80	0,36
2001	2	21.9	16.6	7.9	0.760	0,26
2001	3	76.8	16.7	7.6	0.770	0,8
2001	4	33.2	17.4	8.0	0.710	1,39
2001	5	41.2	17.5	8.5	0.710	1,9
2001	6	37.7	15.8	7.9	0.680	6,3
2001	7	9.7	16.4	8.4	0.680	4,55
2001	8	22.7	14.7	7.4	0.710	4,54
2001	9	24.0	16.8	7.8	0.690	3,14
2001	10	3.3	18.1	8.3	0.660	2,66
2001	11	51.5	17.6	7.3	0.710	1,27
2001	12	77.3	17.2	8.3	0.760	1,55

Las tabla 5 presenta un extractos representativos de los archivos climáticos utilizados como datos de entrada para el modelo SWAT+, estos archivos fueron estructurados en formato de texto compatible con el modelo, incluyendo información mensual de tres variables fundamentales: precipitación, temperatura, y humedad relativa, cada archivo contiene parámetros como latitud, longitud y elevación del punto de muestreo, lo que permite que el modelo asocie correctamente los datos climáticos con la ubicación espacial correspondiente dentro de la subcuenca.

4.8.2 Formula del caudal en SWAT+

El modelo SWAT+ usa la fórmula SCS-CN para calcular la escorrentía, que depende de la lluvia y del número de curva. El CN refleja el tipo de suelo y uso del terreno, y determina cuánto agua se infiltra o se convierte en escorrentía [54].

$$Q = \frac{(P - 0,2S)^2}{P - 0,8S}$$

(4)

Donde:

S:Almacenamiento potencial:

P:Precipitacion

Q: Escorrentia Directa

$$S = \frac{1000}{CN} - 10$$

(5)

Donde:

S:Almacenamiento potencial

CN: Numero de curva

4.8.3 Calibración de Escenarios

La calibración de escenarios se realizó ajustando los parámetros hidrológicos más sensibles del modelo SWAT+, como CN2, SOL_AWC y ESCO, basados en lo mencionado por Karim C. Abbaspour de la Universidad de Semnan Iran, quien en su investigación desarrolla un modelo de hidrología basados en la calibración e incertidumbre de un modelo SWAT a gran escala y alta resolución, quien menciona además, que los métodos desarrollados son generales y pueden aplicarse a cualquier región extensa del mundo Esta metodología permitió calibrar el modelo para toda la subcuenca del Río Pindilig y obtener resultados que respalda el impacto de la relacion precipitacion-escorrentia en base a los datos simulados y observados

4.8.3.1 Condiciones de Calibración

- **Flujo base demasiado bajo y evapotranspiración demasiado alta**

Un flujo base demasiado bajo y una evapotranspiración demasiado alta nos da a entender que existe una excesiva perdida de agua y un poco recarga al rio, para corregirlo se debe disminuir GWQMN.gw y GW_REVAP.gw para aumentar el aporte subterráneo y reducir la evaporación, y aumentar RECHARGE.gw para mejorar la recarga del acuífero. Esto equilibrará mejor el ciclo del agua en la simulación[55].

GWQMN.gw ↓
 GW_REVAP.gw ↓
 RENOVACIÓN.gw ↑

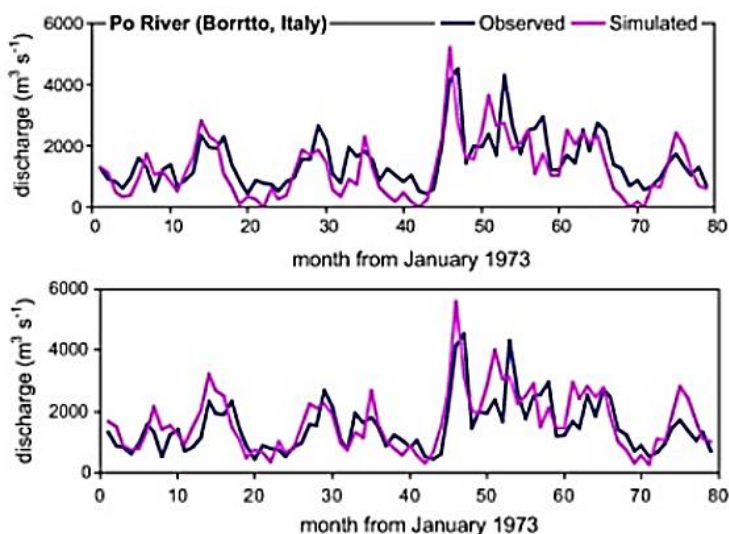


Figura 8 Flujo y Evapotranspiración

- **Flujo demasiado bajo**

Un flujo máximo demasiado bajo indica que el modelo no está representando bien los picos de caudal durante eventos de lluvia intensa. Para corregir esto, se debe aumentar CN2.mgt para generar más escorrentía superficial, y disminuir SOL_AWC.sol y ESCO.hru para reducir la retención y evaporación del agua en el suelo estos ajustes permiten que más agua llegue rápidamente al río, elevando los picos simulados y mejorando la coincidencia con los datos observados[55].

CN2.mgt ↑
 SOL_AWC.sol ↓
 ESCO.hru ↓

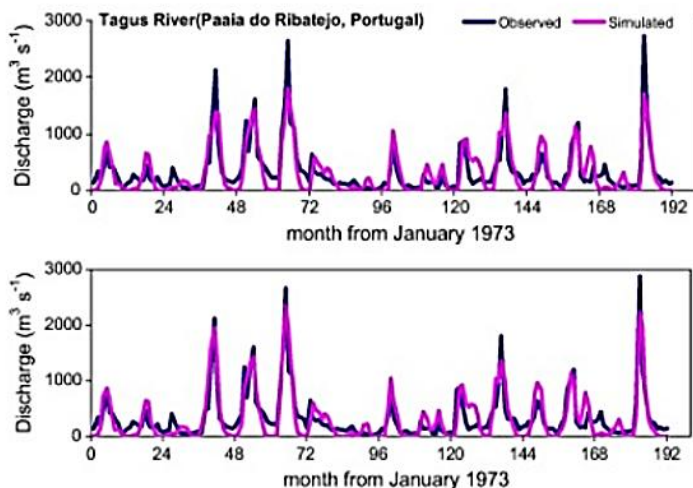


Figura 9 Flujo máximo demasiado bajo

- **Desplazamiento de descarga hacia la derecha**

Un desplazamiento de descarga hacia la derecha indica que el modelo simula los picos de caudal más tarde de lo que ocurren en la realidad. Para corregir este retraso, se debe aumentar

HRU_SLP para acelerar el escurrimiento superficial, y disminuir OV_N.hru y SLSUBBSN.hru para reducir la resistencia al flujo y el tiempo de concentración. Estos cambios permiten que el agua llegue más rápido al cauce, alineando mejor los picos simulados con los observados[55].

HRU_SLP ↑
 OV_N.hru ↓
 SLSUBBSN.hru ↓

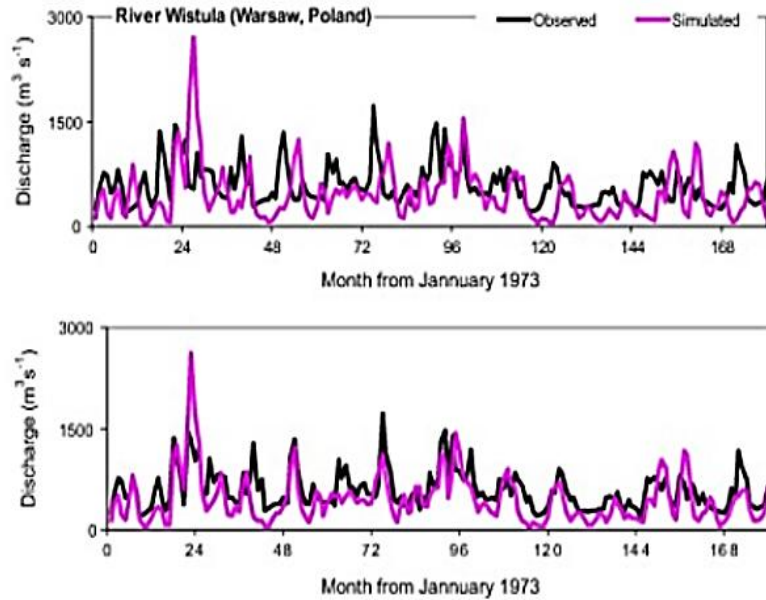


Figura 10 Desplazamiento de descarga

- **Flujo base demasiado alto y picos demasiados bajos**

Un flujo base demasiado alto y picos de caudal muy bajos indican que el modelo está liberando demasiada agua de forma constante y no está representando bien los eventos de lluvia intensa. Para corregirlo, se debe aumentar CN2.mgt para generar más escorrentía, y disminuir SOL_AWC.sol y ESCO.hru para que el suelo retenga y evapore menos agua. Además, se debe subir GWQMN.gw y GW_REVAP.gw para limitar el flujo base y la evaporación subterránea, y bajar RECHARGE.gw (renovación) para reducir el exceso de agua en el acuífero[55].

CN2.mgt ↑
 SOL_AWC.sol ↓
 ESCO.hru ↓
 GWQMN.gw ↑
 GW_REVAP.gw ↑
 RENOVACIÓN.gw ↓

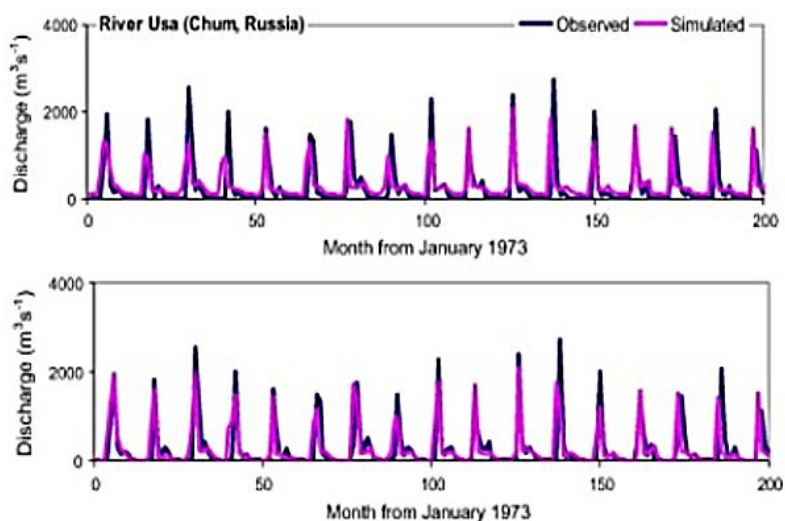


Figura 11 Flujo base y picos demasiados bajos

- **La carga de nitrato es demasiado alta**

Una carga de nitrato demasiado alta en la simulación indica que el modelo está generando más contaminación por nitratos de la que realmente ocurre. Para corregir esto, se deben reducir parámetros relacionados con la aplicación y el movimiento del nitrógeno, como DEBERÁ_N.gw, RCN.bsn, NPERO.bsn, CMN.bsn y SOL_NO3.chm, lo que disminuye la cantidad de nitrato en el suelo y su transporte al agua. Además, se debe bajar FRT_SURFACE.mgt para reducir la cantidad de fertilizante aplicado en superficie. Estos ajustes ayudan a que la simulación represente mejor los niveles reales de nitratos en el agua [55].

DEBERÁ_N.gw ↓
 RCN.bsn ↓
 NPERO.bsn ↓
 CMN.bsn ↓
 SOL_NO3.chm ↓
 FRT_SURFACE.mgt ↓

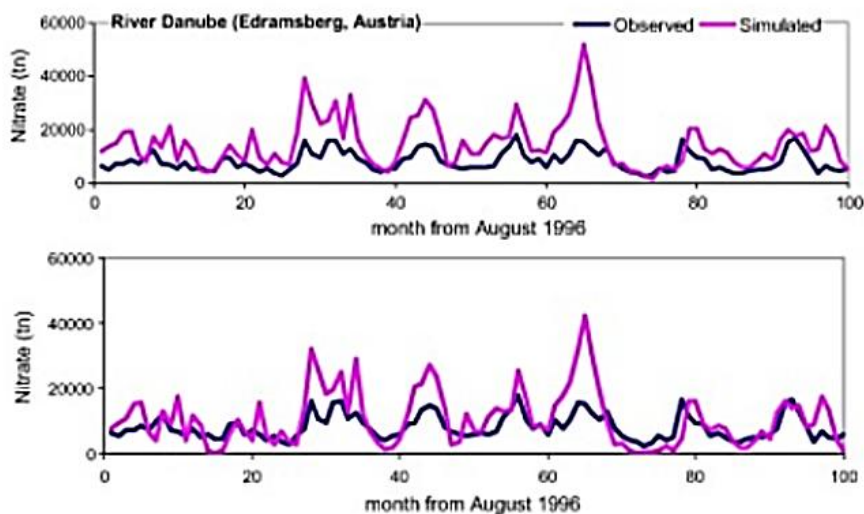


Figura 12 Carga de Nitrato

4.8.4 Tabla de parámetros de calibración del modelo

Para nuestra simulación se seleccionó el (FLUJO DEMASIADO BAJO) ya que presentaba la misma similitud de caudales observado y simulados, para luego proceder a calibrar los parámetros mencionados con son CN2.mgt,SOL_AWC.sol y ESCO.hru.

Los parámetros presentados en la tabla 6 corresponden a las variables hidrológicas y de calidad del agua que fueron calibradas o consideradas en el modelo SWAT+. Cada uno influye directamente en procesos clave como la escorrentía, infiltración, evaporación y transporte de nutrientes, etc. La selección y ajuste de estos parámetros se realizó con base en el enfoque metodológico propuesto por Xuesong Zhang, quien establece su importancia en la simulación hidrológica a diferentes escalas, priorizando aquellos que tienen mayor sensibilidad sobre la salida del modelo[56].

Tabla 6 Parámetros y Rangos

Condiciones	Parámetros	Descripción	Rango
Flujo base demasiado bajo y evapotranspiración demasiado alta	GWQMN.gw ↓	Límite mínimo del almacenamiento del acuífero para generar flujo base	0 – 5000
	GW_REVAP.gw ↓	Coeficiente de transferencia de agua del acuífero a la zona no saturada	0.02 – 0.2
	REVAMPM.gw ↑	Límite mínimo de agua en el acuífero para la evaporación	0 – 500
Flujo demasiado bajo	CN2.mgt ↑	Número de curva del SCS	±20%
	SOL_AWC.sol ↓	Capacidad de retención de agua del suelo disponible	±20%
	ESCO.hru ↓	Factor de ajuste de evaporación del suelo	0 – 1
Desplazamiento de descarga hacia la derecha	HRU_SLP ↑	Pendiente del HRU	0–1
	OV_N.hru ↓	Rugosidad para escorrentía superficial	0.01–0.3
	SLSUBBSN.hru ↓	Longitud de la pendiente de la subcuenca	10–150
Flujo base demasiado alto y picos demasiados bajos	CN2.mgt ↑	Número de curva del SCS	±20%
	SOL_AWC.sol ↓	Capacidad de retención de agua del suelo disponible	±20%
	ESCO.hru ↓	Factor de ajuste de evaporación del suelo	0 – 1
	GWQMN.gw ↑	Límite para flujo base	0 – 5000
	GW_REVAP.gw ↑	Coeficiente de transferencia vertical	0.02 – 0.2

	REVAMPM.gw ↓	Límite mínimo para evaporación desde acuífero	0 – 500
La carga de nitrato es demasiada alta	SHALLST_N.gw ↓	Contenido inicial de agua en el acuífero	0–1
	RCN.bsn ↓	Concentración de N en escorrentía superficial	0–10 mg/L
	NPERO.bsn ↓	Fracción de N perdido por percolación	0–1
	CMN.bsn ↓	Tasa de mineralización de N orgánico	0–0.6
	SOL_NO3.chm ↓	Concentración inicial de nitrato en el suelo	0–50 mg/kg
	FRT_SURFACE.mgt ↓	Cantidad de fertilizante aplicado en superficie	Variable (kg/ha)

4.9 Porcentaje de Error del Modelo Hidrológico.

Estas métricas permiten medir la correlación, eficiencia y sesgo entre los valores observados y simulados, validando así el desempeño del modelo en distintos escenarios[57].

Tabla 7 Modelo estadístico parámetros [57]

Medida	Variable evaluada	Escala temporal	Muy bueno	Bueno	Satisfactorio	No satisfactorio
R ²	Flow	D-M-A	R ² > 0.85	0.75 < R ² ≤ 0.85	0.60 < R ² ≤ 0.75	R ² ≤ 0.60
NSE	Flow	D-M-A	NSE > 0.80	0.70 < NSE ≤ 0.80	0.50 < NSE ≤ 0.70	NSE ≤ 0.50
PBIAS	Flow	D-M-A	PBIAS < ±5	±5 ≤ PBIAS < ±10	±10 ≤ PBIAS < ±15	PBIAS ≥ ±15

4.9.1 Coeficiente de determinación (R²)

El coeficiente de determinación R² se utiliza para medir qué tan bien un modelo representa el comportamiento de los datos observados. Indica el grado de relación entre los valores simulados y los reales, mostrando si el modelo es capaz de reproducir adecuadamente las tendencias del sistema que se está evaluando [58].

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i) (P_i - P)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - O)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - P)^2}} \right]^2$$

(4)

R²: Coeficiente de determinación

- n:** Número de observaciones
- O_i :** Valor observado
- P_i :** Valor simulado
- O:** Media de los valores observados
- P:** Media de los valores simulados
- Σ :** Sumatoria

4.9.2 Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE)

El índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) se utiliza para evaluar la precisión de un modelo al simular datos observados. Este indicador muestra qué tan bien el modelo reproduce las variaciones del sistema real a lo largo del tiempo mientras más eficiente sea el modelo, más se parecerán los valores simulados a los observados [58].

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O)^2} \quad (5)$$

- NSE:** Nash-Sutcliffe Efficiency
- n:** Número de observaciones
- O_i :** Valor observado
- P_i :** Valor simulado
- O:** Media de los valores observados
- Σ :** Sumatoria

4.9.3 Sesgo porcentual (PBIAS)

El PBIAS se utiliza para medir el sesgo de un modelo es decir si tiende a sobreestimar o subestimar los valores observados esto nos permite evaluar si el modelo simula más o menos agua, sedimentos o contaminantes de lo que ocurre en la realidad, ayudando a identificar errores sistemáticos en la simulación [58].

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - P_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \times 100 \quad (6)$$

- PBIAS:** Percent Bias
- n:** Número de observaciones

O_i : Valor observado

P_i : Valor simulado

Σ : Sumatoria

PBIAS positivo: modelo subestima

PBIAS negativo: modelo sobreestima

5 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El análisis que se muestra a continuación es el resultado de la investigación, cálculos, modelado y simulación de datos obtenidos de entidades gubernamentales con es el (INAMHI), Fuentes oficiales del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología centrándonos en la subcuenca del Rio Pindilig.

5.1 Caracterización Morfológica de la Subcuenca

La caracterización morfológica nos permitió conocer las propiedades físicas de la cuenca para así entender el comportamiento hidrológico y tener una base de estudio de subcuenca con los siguientes resultados de la siguiente tabla 9.

Tabla 8 Caracterización Morfológica

PARAMETROS	VALOR	UNIDAD
Area (a)	168,00	km^2
Perimetro (p)	86,022	km^2
Ancho maximo	18,089	km
Longitud axial (la)	18,597	km
Cota maxima	3805	$msnm$
Cota minima	2077	$msnm$
Longitud de todos los cauces	142,676	km
Longitud del cauce principal (l)	25,888	km
Numero de orden (no)	5	Adimensional
Ancho promedio (ap)	9,033	km
Coficiente de compacidad (kc)	1,872	Adimensional
Coficiente de forma (kf)	0,25	Adimensional

El área de la cuenca es de $168 Km^2$ lo cual indica que es un tamaño moderado y se la designó como subcuenca. Además el coeficiente de forma $K_f = 0,25$ nos indica una subcuenca alargada, lo que generalmente produce un tiempo de concentración más largo y menor riesgo de crecidas repentinas. Mientras que, la diferencia altitudinal entre cota máxima 3805 msnm y mínima 2077

msnm es de 1728 m, lo que implica una pendiente significativa en algunos sectores. Por lo que que, el orden del cauce es $No = 5$ que representa un sistema hídrico bastante ramificado, indicando una red fluvial bien desarrollada.

5.2 Uso del suelo (Land Use)

El uso del suelo es un factor importante para determinar el comportamiento hidrológico, se utilizó información de Copernicus Global Land Cover, es un componente del servicio de tierras multiuso que proporciona una serie de productos biogeofísicos sobre el estado y la evolución de la superficie terrestre a escala global. En resolución espacial de 100 metros por píxel para el período 2015-2019. Utilizando el software Qgis con ayuda del plugin de MapSWAT que nos dio como resultado la siguiente tabla 10 [59].

Tabla 9 Uso del suelo (Land Use)

Código	Categoría	Área (ha)	Área (km ²)	Porcentaje (%)
AGRL	Tierra agrícola – uso genérico	1636,62	16,37	9,74
FRSE	Bosque perennifolio	2072,22	20,72	12,34
FRST	Bosque mixto	3387,1	33,87	20,15
PAST	Pastizales	9590,27	95,9	57
RNGB	Pastizales arbustivos	22,35	0,22	0,13
SHRB	Matorrales	93,16	0,93	0,55
WETL	Humedales	9,02	0,09	0,05
Total	—	16810,74	168,11	100

La subcuenca del Río Pindilig muestra una gran porcentaje de pastizales como cobertura vegetal dominante que corresponde al 57% del área total, el porcentaje de bosque perennifolio y bosques mixtos en conjunto superan el 32% del área, la agricultura impacta notablemente en la generación de escorrentía y el potencial de pérdida de suelo en ausencia de buenas prácticas de conservación, mientras que los matorrales, humedales, pasto natural se convierten en una parte relevante desde el punto de vista ecológico, esta distribución del uso del suelo fue considerada para asignar los parámetros hidrológicos en el modelo SWAT+ como se muestra en la figura.

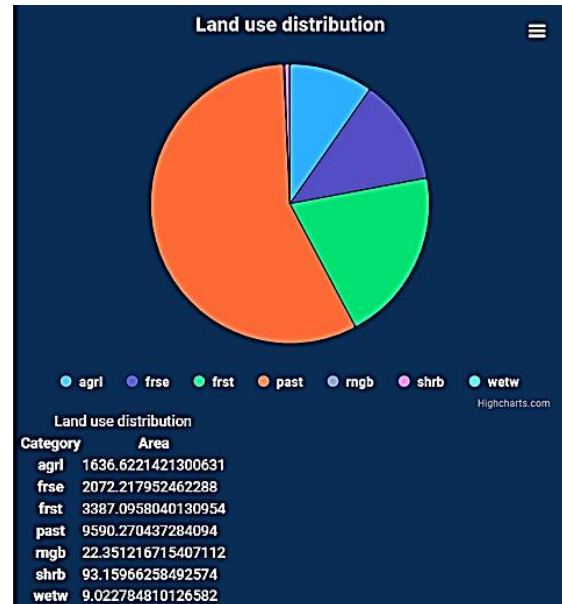
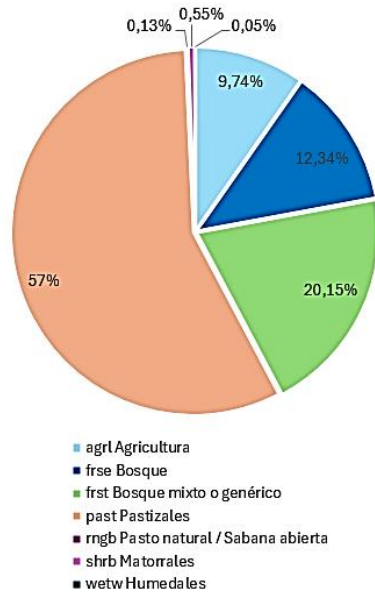


Figura 13 Porcentajes del Uso de Suelo

5.3 Tipo de suelo (SOIL)

El Mapa Digital de Suelos Abiertos (DSOLMap) es un nuevo mapa digital global de propiedades del suelo con una resolución espacial de 250 metros y un perfil detallado de seis horizontes, diseñado para su uso directo con el modelo SWAT+[60].

El análisis del tipo de suelo (SOIL) se realizó con los datos de la base global FAO/UNESCO a través de Google Earth Engine, integrados al modelo SWAT+ mediante el plugin MapSwat, la información recolectada nos permitió caracterizar los suelos de la subcuenca según sus propiedades física y hidráulicas, importantes para simular con precisión los procesos de escorrentía y infiltración.

La tabla generada por MapSWAT contiene campos como:

- **SoilID:** Identificador del tipo de suelo
- **TextureID:** Tipos de Textura (arcillo, franco, etc)
- **Order, Suborder, Group:** Clasificación del suelo según el sistema taxonomico (estructura, origen, condición climatica)
- **Horizon_1, Horizon_2, Horizon_3:** Son las capas del suelo a distintas profundidades con variaciones en textura, densidad, capacidad de retención de agua y conductividad hidráulica.

5.4 Datos Climáticos e Hidrológicos

Para la simulación del comportamiento hidrológico en la subcuenca del Rio Pindilig se utilizó información climática e hidrológica proporcionada por el Instituto Nacional de Meteorología e

Hidrología (INAMHI), La estación meteorológica e hidrológicas utilizadas fueron Cañar (M0031) y Dudas de Pindilig (H0902) respectivamente, se recopilieron datos mensuales de precipitación, temperatura máx. y min, humedad relativa y caudales para el periodo 2000 – 20013, esta información fue importante ya que permitió alimentar al modelo SWAT+.

5.5 Modelación Hidrológica en SWAT+

El software utilizado en la modelación fue SWAT+ (Soil and Water Assessment Tool Plus), este cual permite simular los procesos del ciclo hidrológico con base en información climática, edafológica, topográfica. A través del plugin MapSWAT en QGIS se uso datos espaciales como la unidad de respuesta hidrológica (HRU) en el uso del suelo y el tipo de suelo. Los datos climáticos diarios (precipitación, temperatura, humedad relativa) y los parámetros físicos del terreno fueron incorporados para representar las condiciones reales de la subcuenca.

Una vez cargado la información se procedió con la simulación hidrológica dandonos como resultado una serie de caudales simulados sin ninguna calibracion, los cuales fueron comparados con los caudales observados proporcionados del INAMHI, esto nos permitió analizar el comportamiento hidrológico de la subcuenca como se muestra en la figura.

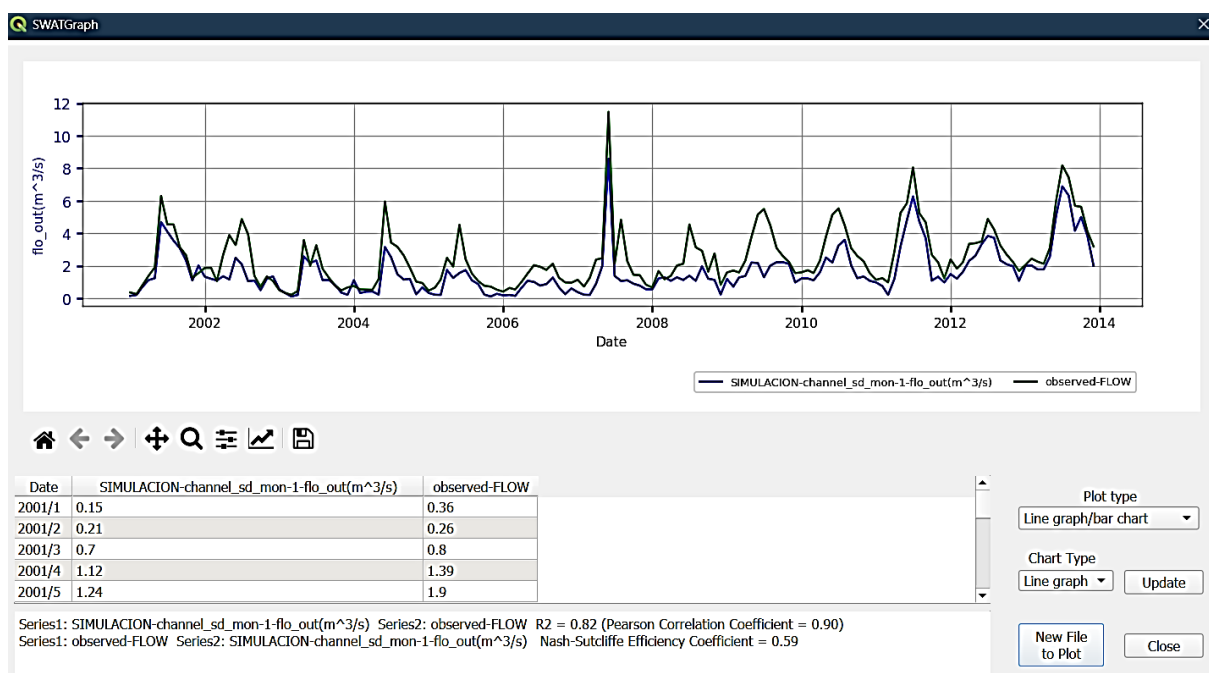


Figura 14 Modelación Hidrológica en SWAT+

5.6 Calibración de Escenarios y Validación del Modelo estadístico

La calibración del modelo SWAT+ se realizo ajustando los parámetros hidrológicos mas sensibles para asegurar que los caudales simulados coincidan con los acuadles observados,

enfocandonos en las variables relacionadas a la generación de escorrentía, infiltración, evaporación y flujo base.

Entre los parámetros modificados se encuentran CN2 (Número de curva) SOL_AWC (Capacidad disponible en el suelo), ESCO (Coeficiente de evaporación del suelo). A cada uno se le ajustó con base a las condiciones de calibración, con el objetivo de reducir el error entre el caudal simulado y el real.

En la primera calibración del modelo, se modificaron los ajustes iniciales de los parámetros hidrológicos más influyentes. Consiguientemente se aumentó el valor del parámetro CN2 en un 0,7% para incrementar la escorrentía superficial como mientras que AWC se redujo en un 0,7% para disminuir la capacidad de retención de agua en el suelo. Además al coeficiente ESCO se le ajustó su valor por defecto de 1 a 0.95 con el fin de reducir la pérdida de agua y el suelo (evaporación) como se muestra en la figura 18, se siguió las recomendaciones del estudio de Karim C. Abbaspour para lograr una representación más certera del comportamiento hidrológico[61].

Tabla 10 Calibración de parámetros 1

CAL_PARM	CHG_VAL
CN2	0,7
AWC	-0,7
ESCO	0,95

Obteniendo como resultado una simulación diferente como se muestra en la figura 19.

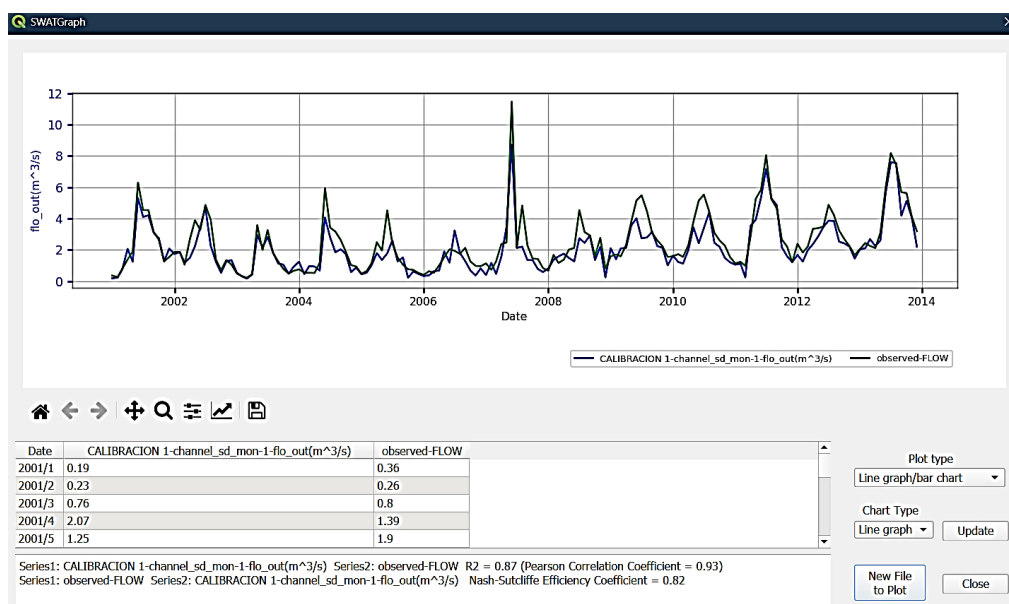


Figura 15 Simulación y Calibración 1

En la segunda calibración, los parámetros se ajustaron con mayor precisión para seguir corrigiendo el exceso de escorrentía generado en ciertos eventos. CN2 se incrementó en un 10%, intensificando ligeramente la escorrentía superficial, y AWC se redujo en un 10%, favoreciendo una respuesta más rápida del sistema. Además, se disminuyó ESCO a 0,9, buscando conservar más humedad en el perfil del suelo y atenuar los picos altos de caudal que el modelo seguía sobrestimando. Estos ajustes contribuyeron a estabilizar la curva de caudales simulados y mejorar la relación con los datos observados en la subcuenca del Río Pindilig.

Tabla 11 Calibración de parámetros 2

CAL_PARM	CHG_VAL
CN2	10
AWC	-10
ESCO	0,9

Luego de esta última calibración nos dio como resultado una simulación nueva con indicadores de precisión y correlación del modelo calibrado.

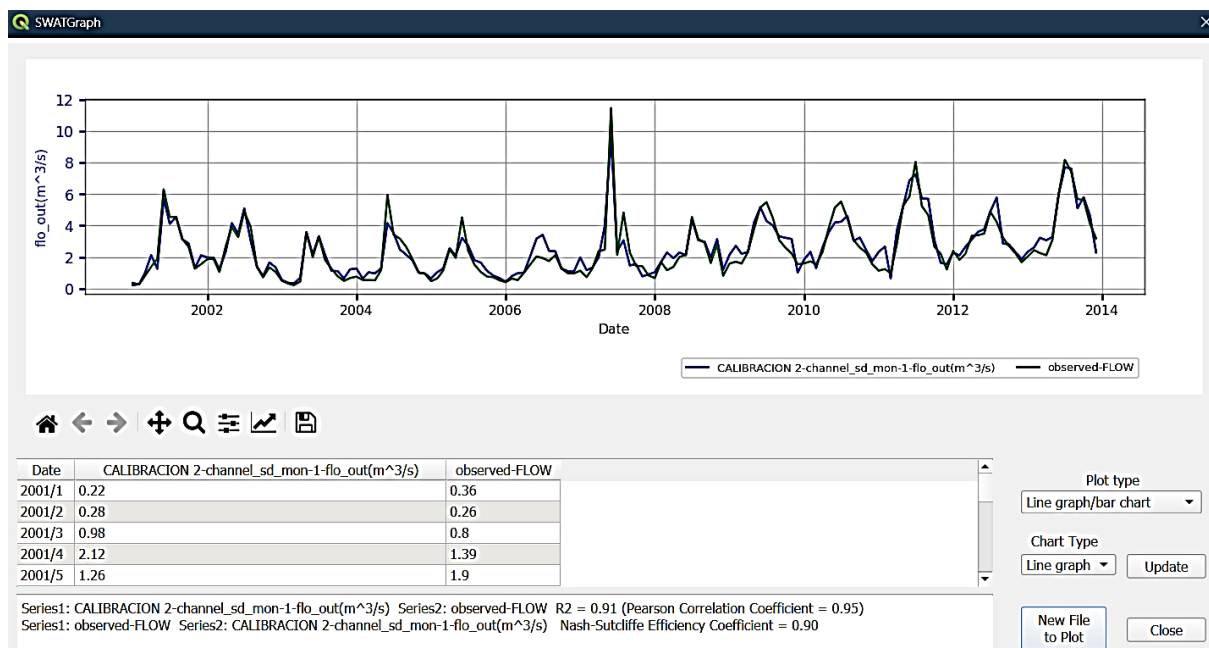


Figura 16 Simulación y Calibración 2

Para identificar el porcentaje de error del modelo SWAT + se aplico tres indicadores estadísticos ampliamente utilizados en la modelación hidrológica como el coeficiente de determinación R^2 , también el coeficiente de eficiencia de Nash Sutcliffe (NSE) y el sesgo porcentual (PBIAS). El cálculo de estos indicadores se realizó con el criterios establecidos "Modelos Hidrológicos y de Calidad del Agua: Medidas de Desempeño y Criterios de Evaluación" que fue desarrollado

por *Moriasi* [62]. Así mismo estos indicadores permiten cuantificar el grado de ajuste entre los caudales simulados y los caudales observados considerando tanto la correlación lineal como la eficiencia predictiva del modelo.

A continuación se realizó la primera calibración del modelo en la que se obtuvo un R^2 de 0,87 y un NSE de 0,82, ambos clasificados como buenos pues según *Moriasi* [62] gracias a que este indica un buen ajuste entre caudales simulados y observados. En PBIAS obtuvimos como resultado un 15,20 y a este se lo consideró insatisfactorio puesto que reflejaba una ligera subestimación del caudal por parte del modelo.

En la segunda calibración los indicadores estadísticos mostraron una mejora significativa en el desempeño del modelo debido a que R^2 fue de 0,91 y el coeficiente de correlación de Pearson alcanzó 0,95 dado que ambos fueron clasificados como muy buenos según *Moriasi* [62] lo que indica una excelente correlación entre los datos simulados y observados. Así mismo, el NSE fue de 0,90 y el PBIAS de -4,96, lo que confirma que el modelo reproduce con alta precisión el comportamiento del caudal, con un nivel mínimo de sesgo como se muestra en la tabla 11.

Tabla 12 Porcentaje de Error del Modelo Hidrológico

Simulación				
R^2	0,82	R	0,9	Bueno
NSE	0,59	Satisfactorio		
PBIAS	33,48%	Insatisfactorio		
Calibración 1				
R^2	0,87	R	0,93	Muy bueno
NSE	0,82	Muy bueno		
PBIAS	15,2%	Insatisfactorio		
Calibración 2				
R^2	0,91	R	0,95	Muy bueno
NSE	0,9	Muy bueno		
PBIAS	-4,96%	Muy Bueno		

Para complementar el análisis estadístico, se elaboraron gráficas comparativas entre los caudales simulados por SWAT+ y los caudales observados. Estas representaciones permitieron visualizar de manera directa el grado de ajuste del modelo, evidenciando que los datos simulados reproducen adecuadamente la tendencia y magnitud del comportamiento hidrológico de la subcuenca del río Pindilig. En particular, la calibración 2 mostró una alta similitud entre

ambas series, con diferencias mínimas, lo que confirma el buen desempeño del modelo y un bajo porcentaje de error, respaldado por los resultados obtenidos en los indicadores estadísticos.

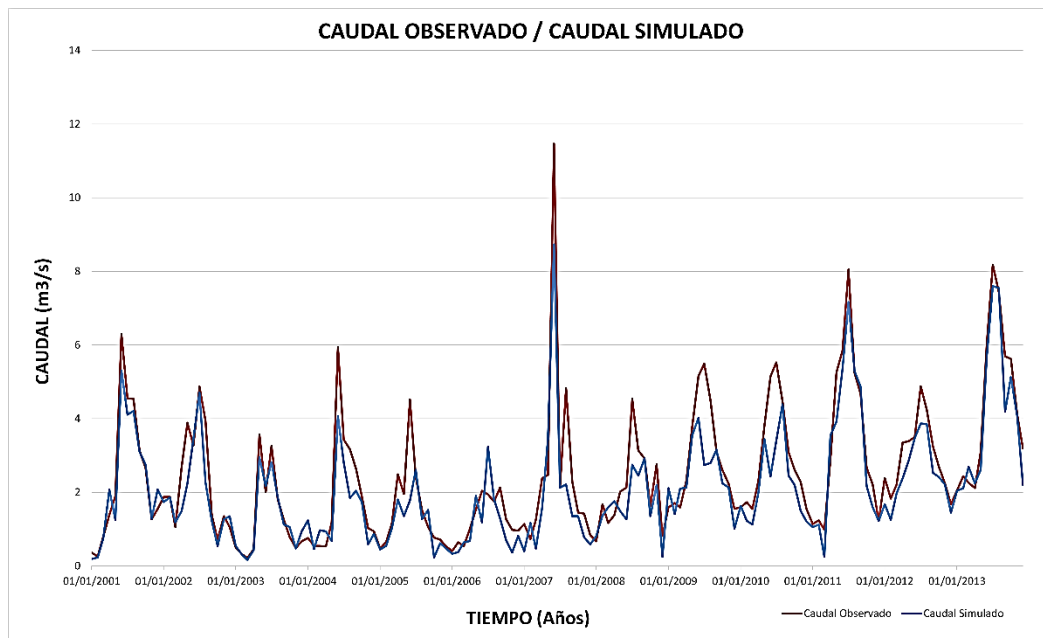


Figura 17 Grafico estadístico - calibración 1

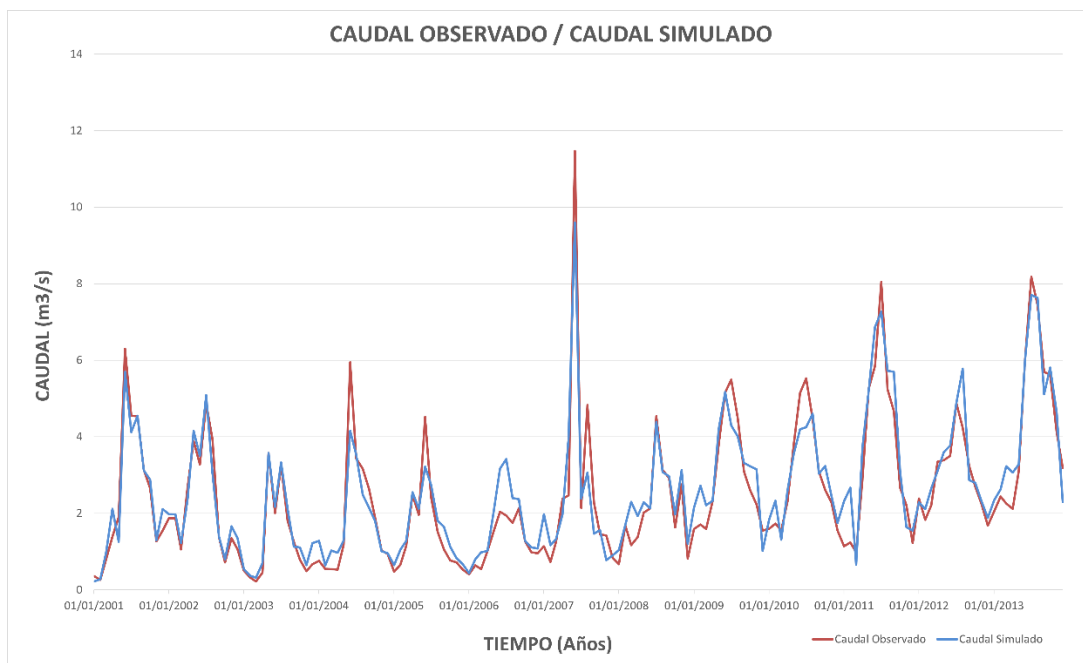
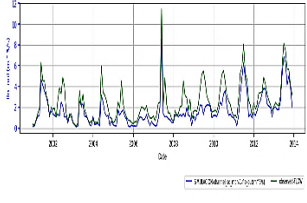
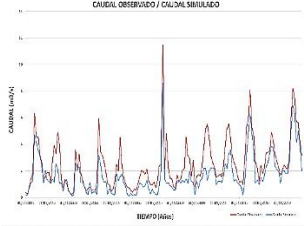
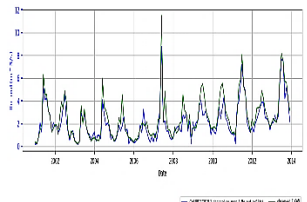
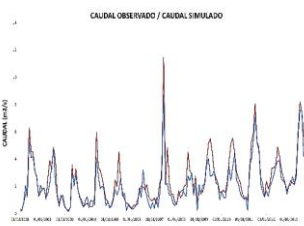
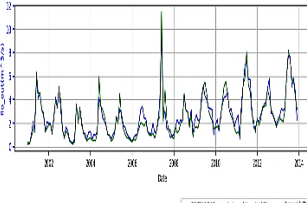
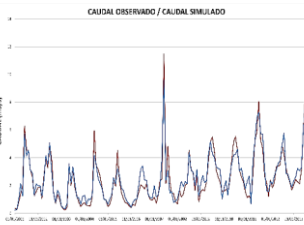


Figura 18 Grafico estadístico - calibración 2

5.7 Resumen de resultados

Tabla 13 Resumen de resultados

	SIMULACION SWAT+	MODELO ESTADISTICO	RESULTADOS ESTADISTICOS
Simulación			$R^2 = 0,82$ $R=0,9$ $NSE=0,59$ $PBIAS=33,48\%$
Calibracion 1			$R^2 = 0,87$ $R=0,93$ $NSE=0,82$ $PBIAS=15,2\%$
Calibracion 2			$R^2 = 0,91$ $R=0,95$ $NSE=0,9$ $PBIAS=-4,96\%$

Para un análisis más detallado se compararon los valores de los picos más altos de caudal obtenidos en distintas etapas de calibración, puesto que en la simulación inicial no se realizó ningún ajuste de parámetros pero se obtuvo que el pico más alto alcanzó los 8,6 m³/s en el mes de junio de 2017. Luego de aplicar la primera calibración este valor aumentó ligeramente a 8,73 m³/s gracias a esto se logró mantener en el mismo mes representando el periodo de lluvia intensa. Finalmente, tras la segunda calibración del modelo se logró alcanzar un valor máximo de 9,6 m³/s debido a que se ajustó mejor al comportamiento observado y así se cumplió con los criterios del modelo estadístico propuesto por Moriasi[57].

De igual manera, se analizaron los picos más bajos de caudal puesto que en la simulación base el valor mínimo fue de 0,21 m³/s registrado en febrero de 2001. Después de la primera calibración este valor descendió a 0,23 m³/s y en la calibración final alcanzó 0,28 m³/s logrando una representación más precisa del comportamiento en periodos secos, los resultados fueron

evaluados como muy buenos de acuerdo con los rangos establecidos por el estudio de Moriasi, lo que confirma la calidad del ajuste alcanzado en el modelo.

La selección de la calibración 2 como resultado final se basó en el comportamiento más equilibrado y representativo del modelo respecto a los datos observados. Esta etapa mostró una mejora significativa en la eficiencia estadística y una reducción del sesgo en la simulación de caudales. Además, los parámetros ajustados en esta calibración reflejaron condiciones más coherentes con las características físicas de la subcuenca.

Se elaboró un gráfico utilizando escala logarítmica en el eje vertical gracias a esto esta representación permitió visualizar de forma más clara la relación entre los caudales simulados y observados, especialmente en valores bajos que suelen quedar poco diferenciados en escalas lineales. La elección de la escala logarítmica facilitó la identificación de posibles sesgos y mejoras en la precisión del modelo.

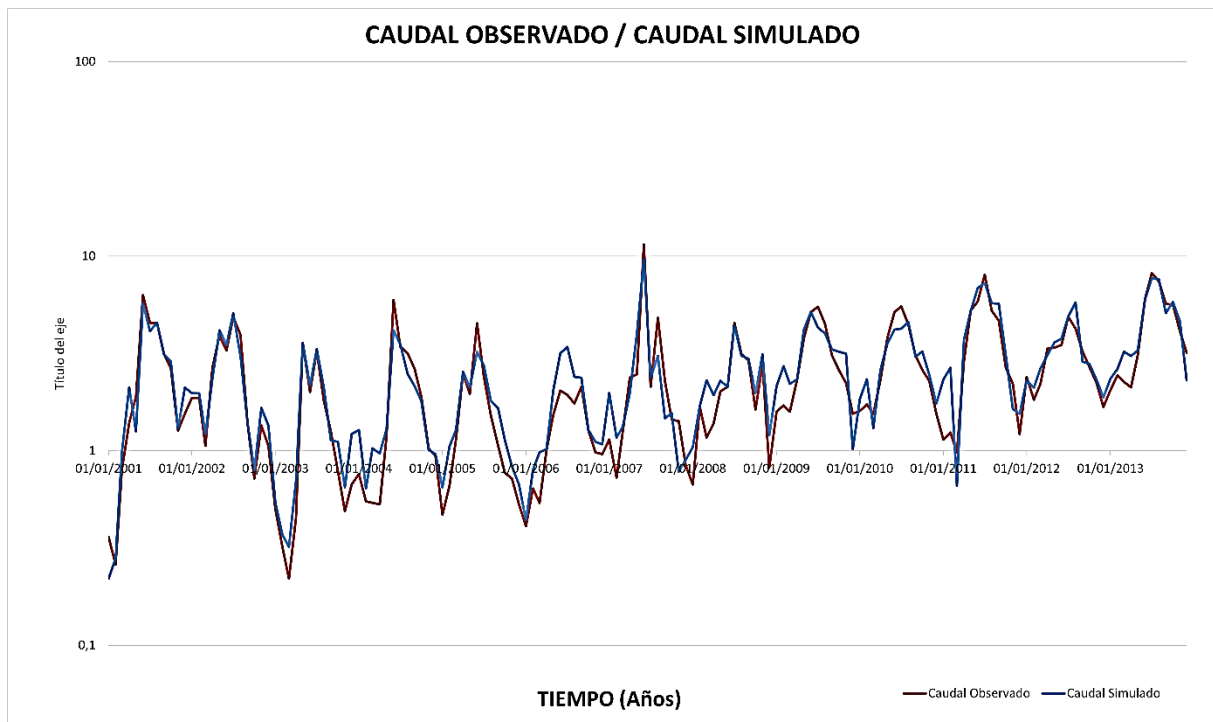


Figura 19 Caudal escala logarítmica

En esta investigación se intentó aplicar el principio de equifinalidad, el cual reconoce que diferentes combinaciones de parámetros pueden generar resultados similares en modelos hidrológicos. No obstante, debido al tiempo elevado que requieren las simulaciones en SWAT+, no fue posible realizar un análisis exhaustivo de este principio. Por esta razón, se seleccionaron únicamente los parámetros más representativos que fueron aquellos que ofrecieron un ajuste

estadístico adecuado y coherencia con las condiciones físicas de la subcuenca, esto permitió lograr una calibración confiable, considerando las limitaciones técnicas existentes.

En el caso del estudio realizado en la microcuenca del Río Cebadas, se utilizó el Modelo Témez conjunto con variables como la precipitación efectiva, la capacidad de retención del suelo y la evapotranspiración. Este modelo conceptual ampliamente empleado en análisis de balance hídrico se destaca por su sencillez y buenos resultados en regiones con datos limitados. Los parámetros que se calibran en el modelo incluyen el coeficiente de escorrentía (CN), parámetros de infiltración, coeficientes de retención, constantes de degradación y aquellos relacionados con el almacenamiento y el flujo subterráneo. A diferencia de SWAT+, Témez está más orientado a la simulación de cuencas pequeñas o medianas lo que lo hace más práctico en ciertos contextos.

Por otro lado la calibración del modelo VIC se enfoca en ajustar parámetros clave como la capacidad máxima de infiltración por lo tanto hay que tener en cuenta que el parámetro regula la variabilidad espacial de esta infiltración gracias a los almacenamientos del suelo en sus diferentes capas puesto que los coeficientes vinculados son la evapotranspiración y el flujo subsuperficial. Cabe recalcar que estos elementos son esenciales para que el modelo reproduzca con precisión la escorrentía, la humedad del suelo y el movimiento del agua en la cuenca, puesto que la calibración se realiza con datos observados de caudales y humedad del suelo dado que se apoyan en métodos automáticos de optimización que incrementan la precisión del modelo y su utilidad en la planificación y gestión de los recursos hídricos.

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

- La recopilación y análisis de datos meteorológicos e hidrológicos históricos permitió caracterizar adecuadamente el comportamiento climático e hidrológico de la subcuenca del Río Pindilig, Para ello se utilizaron registros de la estación meteorológica Cañar (código M0031) y de la estación hidrológica Dudas de Pindilig (código H0902), evidenciando una fuerte relación entre la precipitación y los caudales generados. Esta caracterización constituye una base técnica fundamental para comprender la dinámica hídrica local y sirve de soporte para futuras evaluaciones ambientales y de planificación territorial.
- La implementación del modelo hidrológico SWAT+ permitió representar de forma detallada los principales procesos del ciclo hidrológico, en especial la relación precipitación–escorrentía. En la calibración final, se utilizaron ajustes clave en los parámetros sensibles del modelo: CN2 con un incremento de +10%, AWC con una disminución de –10%, y ESCO ajustado a 0.9. representando adecuadamente la variabilidad espacial de la subcuenca. Se observaron picos altos de caudal durante las temporadas lluviosas y caudales bajos en época seca, lo cual refleja el buen desempeño del modelo frente a variaciones climáticas.
- Se validó el modelo hidrológico utilizando indicadores estadísticos que demostraron un desempeño muy bueno. En la calibración 2, el modelo alcanzó un coeficiente de determinación (R^2) de 0.91 y un coeficiente de correlación (R) de 0.95, lo que refleja una excelente correspondencia entre los caudales simulados y observados. Asimismo, el índice de eficiencia de Nash–Sutcliffe (NSE) fue de 0.90, indicando una alta precisión en la simulación del comportamiento hidrológico. El sesgo porcentual (PBIAS) fue de –4.96%, lo cual demuestra que el modelo no presenta una tendencia significativa a sobrestimar o subestimar los valores de caudal. Estos resultados confirman que el modelo SWAT+ calibrado puede ser empleado con alto grado de confiabilidad para representar con exactitud la dinámica hidrológica de la subcuenca del río Pindilig y como herramienta de soporte en la planificación y gestión de los recursos hídricos..

6.2 Recomendaciones

- Se recomienda fortalecer el monitoreo hidrometeorológico en la subcuenca del Río Pindilig mediante la instalación de estaciones automáticas y la mejora en la calidad y continuidad de los datos recopilados, ya que esto permitirá reducir la incertidumbre en futuras simulaciones hidrológicas y mejorar la capacidad de respuesta ante eventos extremos como inundaciones o sequías. Además, es fundamental aplicar el modelo SWAT+ en otras subcuencas de la cuenca del Río Paute con características similares, lo que contribuirá a una gestión integral y sostenible del recurso hídrico a nivel regional. Asimismo, se sugiere que las entidades responsables de la planificación hídrica y ambiental integren el uso de modelos hidrológicos como herramienta de apoyo en la toma de decisiones técnicas, especialmente en la evaluación de impactos del cambio climático, diseño de infraestructura hidráulica, conservación de fuentes de agua y ordenamiento territorial, asegurando así una gestión eficiente y basada en evidencia científica del recurso hídrico.
- Se recomienda aplicar técnicas de análisis de incertidumbre, como el método Monte Carlo, en futuras investigaciones hidrológicas de la subcuenca o en estudios similares, con el fin de abordar el principio de equifinalidad, es decir, la posibilidad de obtener buenos resultados con diferentes combinaciones de parámetros. Esta metodología permite explorar múltiples escenarios mediante simulaciones repetidas, lo cual ayuda a identificar las configuraciones más estables y confiables del modelo. Incorporar este enfoque fortalecerá la toma de decisiones bajo condiciones de incertidumbre y aumentará la confianza en los resultados de simulación hidrológica.

7 REFERENCIAS

- [1] N. Patiño, «Vista de Modelación Hidrológica de la Microcuenca del Rio Cebadas, Aplicando el Modelo Témez». Accedido: 21 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.reincisol.com/ojs/index.php/reincisol/article/view/218/427>
- [2] F. Latinoamericana De Ciencias, S. Maestria En Poblalori, y D. L. Sustentable, «UNIVERSIDAD DE CUENCA».
- [3] Ministerio de Energia y Minas - Noticias, «Presas Mazar alcanza su cota máxima y el Gobierno del Nuevo Ecuador reafirma un servicio energético eficiente – Ministerio de Energia y Minas». Accedido: 23 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.rekursyenergia.gob.ec/presa-mazar-alcanza-su-cota-maxima-y-el-gobierno-del-nuevo-ecuador-reafirma-un-servicio-energetico-eficiente/>
- [4] Ministerio de Energia y Minas, «PROYECTO HIDROELÉCTRICO “MAZAR DUDAS” – Ministerio de Energia y Minas». Accedido: 23 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.rekursyenergia.gob.ec/proyecto-hidroelectrico-mazar-dudas/>
- [5] C. A. Rumsey, M. P. Miller, D. D. Susong, F. D. Tillman, y D. W. Anning, «Regional scale estimates of baseflow and factors influencing baseflow in the Upper Colorado River Basin», *J Hydrol Reg Stud*, vol. 4, n.o PB, pp. 91-107, sep. 2015, doi: 10.1016/J.EJRH.2015.04.008.
- [6] A. Singer, «Bases físicas Resumen para responsables de políticas», 2021.
- [7] Cadier, Eric, Gomez, Calvez, Roger, y Rossel, «Inundaciones y sequias en el Ecuador», 1994.
- [8] S. Aloui, A. Mazzoni, A. Elomri, J. Aouissi, A. Boufekane, y A. Zghibi, «A review of Soil and Water Assessment Tool (SWAT) studies of Mediterranean catchments: Applications, feasibility, and future directions», *J Environ Manage*, vol. 326, p. 116799, ene. 2023, doi: 10.1016/J.JENVMAN.2022.116799.
- [9] LEY ORGANICA DE RECURSOS HIDRICOS USOS Y APROVECHAMIENTO DEL AGUA, «LEY ORGANICA DE RECURSOS HIDRICOS USOS Y APROVECHAMIENTO DEL AGUA», 2014, Accedido: 23 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: www.lexis.com.ec

- [10] D. Ramiro, B. Bayas, A. Margarita, y M. Noriega, «Cooperativismo y desarrollo sostenible en el Ecuador», *Ciencia Digital*, vol. 3, n.o 3.2, pp. 150-171, jul. 2019, doi: 10.33262/cienciadigital.v3i3.2.725.
- [11] M. Mancheno, A. Álvarez, C. Prehn, C. Cevallos, C & O. Vásquez, «Cuencas Hidrográficas», vol. 1, 2019.
- [12] M. Falkenmark, L. Wang-Erlandsson, y J. Rockström, «Understanding of water resilience in the Anthropocene», *J Hydrol X*, vol. 2, ene. 2019, doi: 10.1016/J.HYDROA.2018.100009.
- [13] D. Francisco. Campos Aranda, «Procesos del ciclo hidrológico», p. 76, 1992.
- [14] F. Cuadrado, S Sanchez, *EVAPORACIÓN DE AGUA EN SUELOS DE DISTINTA TEXTURA*. 2000. Accedido: 24 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://digital.csic.es/bitstream/10261/37205/1/AnuarioCEBAS1980255.pdf>
- [15] S. Fernández López y J. J. Gómez, «Condensación: significados y aplicaciones al análisis de cuencas», *Estudios Geológicos*, vol. 47, n.o 3-4, pp. 169-181, ago. 1991, doi: 10.3989/EGEOL.91473-4417.
- [16] R. A. Parra Quezada, J. L. R. Ontiveros, y V. A. González Hernández, «TRANSPIRACION, POTENCIAL HIDRICO Y PROLINA EN ZARZAMORA BAJO DEFICIT HIDRICO Transpiration, Water Potential and Proline in Blackberry under Hydric Stress».
- [17] R. M. Mestas Valero, «Régimen hídrico del suelo y evapotranspiración en áreas agrícolas y forestales», 2011, Accedido: 24 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/2183/8487>
- [18] A. A. López-Lambraño *et al.*, «Pérdidas por intercepción de la vegetación y su efecto en la relación intensidad, duración y frecuencia (IDF) de la lluvia en una cuenca semiárida», *Tecnología y ciencias del agua*, vol. 8, n.o 4, pp. 37-56, jul. 2017, doi: 10.24850/J-TYCA-2017-04-03.
- [19] M. S. Morikawa-Sakura y ; Komatsu Yoshitaka, «El Vínculo de la conductividad hidráulica saturada con la Velocidad de infiltración subsuperficial del suelo del bosque: the link between saturated hydraulic conductivity and subsurface infiltration rates of Forest soils».

- [20] I. Carlos, D. Segerer, y I. E. Rubén, «HIDROLOGIA I UNIDAD 5: LAS PRECIPITACIONES», 2006.
- [21] Escenarios Hidricos 2030, «Cuencas hidrográficas para gestión de recursos hídricos | EH2030». Accedido: 23 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://escenarioshidricos.cl/noticia/cuenca-hidrografica-la-unidad-territorial-optima-para-gestionar-recursos-hidricos/>
- [22] S. Nuñez, «TIPOS de PRECIPITACIONES - Clasificación, nombres y características». Accedido: 24 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.ecologiaverde.com/tipos-de-precipitaciones-3086.html>
- [23] A. Paz-González, «Escorrentía y erosión», 2020. Accedido: 24 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Antonio-Paz-Gonzalez/publication/314658817_EROSION_Y_ESCORRENTIA/links/58c41cb6aca272e36dd6cd67/EROSION-Y-ESCORRENTIA.pdf
- [24] AQUA, «La escorrentía: ¿qué es y cuántos tipos hay? - Fundación Aquae». Accedido: 24 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.fundacionaquae.org/wiki/escorrentia/>
- [25] A. Valdivielso, «¿Qué es la escorrentía? | iAgua». Accedido: 11 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.iagua.es/respuestas/que-es-escorrentia>
- [26] Geología, «Runoff: Nature's Water Flow and Its Implications». Accedido: 18 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://geologia.com/runoff/>
- [27] R. Rivera, *Variación en la generación de caudales y de sedimentos en suspensión, con énfasis en eventos de tormenta para una microcuenca*. 2005. Accedido: 24 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2005/fifr621v/sources/fifr621v.pdf>
- [28] F. Sari, «ESTUDIO DE CASO CUENCA DEL RÍO PAUTE», 2022.
- [29] I. Camilloni, *VARIABILIDAD Y TENDENCIAS HIDROLOGICAS EN LA CUENCA DEL PLATA*. 2021. Accedido: 24 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.cima.fcen.uba.ar/~lcr/libros/Cambio_Climatico-Texto.pdf#page=25
- [30] A. Mancheno, *Cuencas Hidrográficas*. 2021.

- [31] P. Ramírez-Granados *et al.*, «Morfometría de la subcuenca hidrográfica del río Páez, Cartago, Costa Rica», *Revista Geográfica de América Central*, vol. 2, n.o 67, pp. 121-143, mar. 2021, doi: 10.15359/RGAC.67-2.5.
- [32] S. Geográfica De Lima, «“Contribuyendo al desarrollo de una Cultura del Agua y la Gestión Integral del Recurso Hídrico” ¿QUÉ ES CUENCA HIDROLÓGICA? ¿QUÉ ES CUENCA HIDROLÓGICA?».
- [33] IDEAM, «Sede electrónica del Ideam en construcción | Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales». Accedido: 24 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.ideam.gov.co/web/siac/suelo>
- [34] J. Cabrera y C. Eng, «Calibración de Modelos Hidrológicos».
- [35] M. Angulo, «MODELACIÓN HIDROLÓGICA DE LA CUENCA MAYLANCO UTILIZANDO HEC-HMS. ». 2020. Accedido: 24 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: http://www.scielo.org.bo/scielo.php?pid=S2518-44312018000100005&script=sci_abstract&tlng=pt
- [36] Ciren, «¿Qué es un Modelo Hidrológico? - Ciren». Accedido: 24 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.ciren.cl/noticias/que-es-un-modelo-hidrologico/>
- [37] K. R. Douglas-Mankin, R. Srinivasan, J. G. Arnold, K. ; Raghavan Srinivasan, A. Member, y K. R. Douglas-Mankin, «Soil and Water Assessment Tool (SWAT) Model: Current Developments and Applications», *Trans ASABE*, vol. 53, n.o 5, pp. 1423-1431, sep. 2010, doi: 10.13031/2013.34915.
- [38] K. Beven, «A manifesto for the equifinality thesis», *J Hydrol (Amst)*, vol. 320, n.o 1-2, pp. 18-36, mar. 2006, doi: 10.1016/J.JHYDROL.2005.07.007.
- [39] R. M. Niemenen y A. P. J. Jansen, «Monte Carlo simulations of surface reactions», *Appl Catal A Gen*, vol. 160, n.o 1, pp. 99-123, oct. 1997, doi: 10.1016/S0926-860X(97)00130-0.
- [40] L. T. Ha, W. G. M. Bastiaanssen, A. Van Griensven, A. I. J. M. Van Dijk, G. B. Senay, y L. T. Ha, «SWAT-CUP for Calibration of Spatially Distributed Hydrological Processes and Ecosystem Services in a Vietnamese River Basin Using Remote Sensing», doi: 10.5194/hess-2017-251.

- [41] L. T. Ha, W. G. M. Bastiaanssen, A. van Griensven, A. I. J. M. van Dijk, y G. B. Senay, «SWAT-CUP for Calibration of Spatially Distributed Hydrological Processes and Ecosystem Services in a Vietnamese River Basin Using Remote Sensing», jun. 2017, doi: 10.5194/HESS-2017-251.
- [42] J. A. Carlos Mendoza, T. A. Chavez Alcazar, y S. A. Zuñiga Medina, «Calibration and Uncertainty Analysis for Modelling Runoff in the Tambo River Basin, Peru, Using Sequential Uncertainty Fitting Ver-2 (SUFI-2) Algorithm», *Air, Soil and Water Research*, vol. 14, 2021, doi: 10.1177/1178622120988707/SUPPL_FILE/SJ-XLSX-1-ASW-10.1177_1178622120988707.XLSX.
- [43] R.-S. ; Blasone, J. A. Vrugt, H. ; Madsen, D. ; Rosbjerg, B. A. Robinson, y G. A. Zyvoloski, «Generalized likelihood uncertainty estimation (GLUE) using adaptive ~~Markov~~Márkov chain Monte Carlo sampling», *Adv Water Resour*, vol. 31, n.o 4, p. 630, 2008, doi: 10.1016/j.advwatres.2007.12.003.
- [44] SWAT, «Datos globales | SWAT | Herramienta de evaluación de suelos y aguas». Accedido: 24 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://swat.tamu.edu/data/>
- [45] S. V. Archontoulis y F. E. Miguez, «Nonlinear Regression Models and Applications in Agricultural Research», *Agron J*, vol. 107, n.o 2, pp. 786-798, mar. 2015, doi: 10.2134/AGRONJ2012.0506
.
- [46] Agrumtsoft, «Calculadora del coeficiente de eficiencia del modelo Nash-Sutcliffe». Accedido: 26 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://agrimetsoft.com/calculators/Nash%20Sutcliffe%20model%20Efficiency%20coefficient?srsltid=AfmBOooo5IYgsPbSnLygg2M2-o-TbZdCnVA6-H2O4p7ZHTDfRtECfz_o#google_vignette
- [47] S. Turney, «Pearson Correlation Coefficient (r) | Guide & Examples». Accedido: 26 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.scribbr.com/statistics/pearson-correlation-coefficient/>
- [48] B. Jamil y N. Akhtar, «Comparative analysis of diffuse solar radiation models based on sky-clearness index and sunshine period for humid-subtropical climatic region of India: A case study», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 78, pp. 329-355, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.04.073.

- [49] A. Graser, T. Sutton, y M. Bernasocchi, «The QGIS project: Spatial without compromise», *Patterns*, vol. 6, n.o 7, p. 101265, jul. 2025, doi: 10.1016/J.PATTER.2025.101265.
- [50] «MapSWAT | MapSWAT is a QGIS plugin for generating ready-to-use SWAT or SWAT+ input maps.» Accedido: 17 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://adrlballesteros.github.io/MapSWAT/>
- [51] J. N. Mirón Reyes, «Caracterización morfométrica de la microcuenca del río Chequëz», 2019.
- [52] Earth Resources Observation and Science (EROS) Center, «USGS EROS Archive - Land Cover Products - Global Land Cover Characterization (GLCC) | U.S. Geological Survey». Accedido: 6 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-land-cover-products-global-land-cover-characterization-glcc>
- [53] J. Felden *et al.*, «PANGAEA - Data Publisher for Earth & Environmental Science», *Sci Data*, vol. 10, n.o 1, dic. 2023, doi: 10.1038/S41597-023-02269-X.
- [54] J. Chenoweth, S. Hamilton, W. Merkel Robert, H. Richardson, y W. Styner, «Urban Hydrology for Small Watersheds», 1986.
- [55] K. C. Abbaspour, E. Rouholahnejad, S. Vaghefi, R. Srinivasan, H. Yang, y B. Kløve, «A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model», *J Hydrol (Amst)*, vol. 524, pp. 733-752, may 2015, doi: 10.1016/j.jhydrol.2015.03.027.
- [56] X. Zhang, R. Srinivasan, y M. Van Liew, «On the use of multi-algorithm, genetically adaptive multi-objective method for multi-site calibration of the SWAT model», *HYDROLOGICAL PROCESSES Hydrol. Process*, 2009, doi: 10.1002/hyp.7528.
- [57] D. N. Moriasi *et al.*, «HYDROLOGIC AND WATER QUALITY MODELS: PERFORMANCE MEASURES AND EVALUATION CRITERIA», *Trans ASABE*, vol. 58, n.o 6, pp. 1763-1785, doi: 10.13031/trans.58.10715.
- [58] K. C. Abbaspour, E. Rouholahnejad, S. Vaghefi, R. Srinivasan, H. Yang, y B. Kløve, «A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and

- uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model», *J Hydrol (Amst)*, vol. 524, pp. 733-752, may 2015, doi: 10.1016/J.JHYDROL.2015.03.027.
- [59] M. Buchhorn, M. Lesiv, N. E. Tsendbazar, M. Herold, L. Bertels, y B. Smets, «Copernicus global land cover layers-collection 2», *Remote Sens (Basel)*, vol. 12, n.o 6, mar. 2020, doi: 10.3390/RS12061044.
- [60] A. López-Ballesteros, A. Nielsen, G. Castellanos-Osorio, D. Trolle, y J. Senent-Aparicio, «DSOLMap, a novel high-resolution global digital soil property map for the SWAT + model: Development and hydrological evaluation», *Catena (Amst)*, vol. 231, p. 107339, oct. 2023, doi: 10.1016/J.CATENA.2023.107339.
- [61] K. C. Abbaspour, E. Rouholahnejad, S. Vaghefi, R. Srinivasan, H. Yang, y B. Kløve, «A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model», *J Hydrol (Amst)*, vol. 524, pp. 733-752, may 2015, doi: 10.1016/J.JHYDROL.2015.03.027.
- [62] D. N. Moriasi, M. W. Gitau, N. Pai, y P. Daggupati, «Hydrologic and Water Quality Models: Performance Measures and Evaluation Criteria», *Trans ASABE*, vol. 58, n.o 6, pp. 1763-1785, 2015, doi: 10.13031/TRANS.58.10715.

8 ANEXOS

Anexo A Datos de entrada al modelo SWAT+ Fuente: INAMHI

Años/Mes	Precipitación (mm)	Caudales Medios m3/s	Temperatura (°C)		Humedad Relativa %
			Max	Min	
2000/1	41.9	1.58	15.6	6.2	0,83
2000/2	37.50	1.29			
2000/3	64.6	2.09	16.0	7.6	0,86
2000/4	82.7	2.22	16.6	8.1	0,8
2000/5	69.7	3.89	16.5	7.9	0,8
2000/6	32.1	7.37	17.0	7.9	0,74
2000/7	6.3	5.68	16.5	6.9	0,68
2000/8	17.5	3.88	16.3	7.5	0,68
2000/9	45.4	3.12	17.1	7.3	0,72
2000/10	8.7	2.38	17.7	7.1	0,69
2000/11	6.3	0.54	18.4	6.6	0,65
2000/12	47.4	0.63	17.7	7.3	0,75
2001/1	48.7	0.36	16.9	7.1	0,8
2001/2	21.9	0.26	16.6	7.9	0,76
2001/3	76.8	0.8	16.7	7.6	0,77
2001/4	33.2	1.39	17.4	8.0	0,71
2001/5	41.2	1.9	17.5	8.5	0,71
2001/6	37.7	6.3	15.8	7.9	0,68
2001/7	9.7	4.55	16.4	8.4	0,68
2001/8	22.7	4.54	14.7	7.4	0,71
2001/9	24.0	3.14	16.8	7.8	0,69
2001/10	3.3	2.66	18.1	8.3	0,66
2001/11	51.5	1.27	17.6	7.3	0,71
2001/12	77.3	1.55	17.2	8.3	0,76
2002/1	6.2	1.87	17.2	7.9	0,71
2002/2	32.3	1.87	16.9	7.8	0,77
2002/3	94.9	1.06	17.4	8.5	0,77
2002/4	34.80	2.68			
2002/5	39.4	3.89	16.9	8.4	0,72
2002/6	33.0	3.28	16.4	7.6	0,68
2002/7	11.1	4.87	16.4	7.9	0,7
2002/8	2.8	3.94	15.7	7.7	0,7

2002/9	7.9	1.38	17.8	8.2	0,65
2002/10	61.6	0.72	16.8	7.5	0,72
2002/11	59.0	1.35	17.4	8.4	0,72
2002/12	25.3	1.06	18.1	8.1	0,72
2003/1	14.6	0,50	17.9	7.8	0,67
2003/2	34.3	0,32	18.5	8.3	0,7
2003/3	44.4	0,22	17.6	7.4	0,7
2003/4	49.8	0,45	17.6	8.2	0,69
2003/5	36.9	3,58	17.3	9.0	0,71
2003/6	23.7	2,01	16.9	8.6	0,8
2003/7	7.2	3,26	16.1	7.5	0,81
2003/8	9.0	1,81	17.0	8.3	0,76
2003/9	6.5	1,26	17.3	8.1	0,77
2003/10	25.20	0,79			
2003/11	25.6	0,49	18.0	7.5	0,81
2003/12	49.0	0,67	17.4	8.0	0,81
2004/1	64.6	0,76	18.2	5.9	0,75
2004/2	27.9	0.55	17.5	7.8	0,86
2004/3	39.1	0,54	17.7	9.0	0,82
2004/4	64.3	0,53	17.7	8.2	0,82
2004/5	24.8	1,18	17.8	9.2	0,77
2004/6	23.1	5,95	16.1	8.2	0,78
2004/7	16.4	3,43	16.2	7.7	0,8
2004/8	5.1	3,17	16.0	6.9	0,77
2004/9	66.2	2,64	16.3	7.9	0,78
2004/10	29.2	1,89	17.0	7.9	0,83
2004/11	66.1	1,03	17.5	7.5	0,82
2004/12	28.1	0,94	17.7	6.7	0,82
2005/1	23.8	0,47	18.3	6.3	0,8
2005/2	34.20	0,66			
2005/3	172.6	1,15	17.2	7.7	0,91
2005/4	66.3	2,49	17.2	8.7	0,83
2005/5	110.5	1,96	17.3	7.4	0,78
2005/6	33.2	4,52	17.2	8.7	0,78
2005/7	44.0	2,41	16.9	7.3	0,72
2005/8	86.0	1,52	16.5	7.1	0,77
2005/9	15.9	1,06	17.0	7.6	0,75
2005/10	37.3	0,77	17.3	7.0	0,8
2005/11	48.8	0,72	17.4	6.8	0,73

2005/12	34.20	0,53			
2006/1	24.8	0,41	16.8	7.6	0,83
2006/2	44.3	0,64	16.9	7.9	0,87
2006/3	97.0	0,54	17.2	7.6	0,87
2006/4	89.1	1,01	17.1	7.7	0,84
2006/5	12.7	1,53	17.6	7.7	0,76
2006/6	20.7	2,04	16.6	7.6	0,79
2006/7	2.2	1,94	16.5	7.6	0,76
2006/8	12.0	1,75	16.1	8.3	0,77
2006/9	7.3	2,13	17.2	8.5	0,74
2006/10	20.6	1,27	18.3	7.1	0,73
2006/11	58.1	0,98	17.8	7.3	0,86
2006/12	34.20	0,96			
2007/1	36.0	1,14	18.6	9.0	0,77
2007/2	11.9	0,73	17.2	7.5	0,81
2007/3	89.7	1,26	17.6	7.7	0,86
2007/4	94.6	2,38	17.0	8.0	0,85
2007/5	60.3	2,47	17.2	8.0	0,84
2007/6	53.0	11,47	15.4	7.6	0,81
2007/7	9.2	2,14	17.5	6.7	0,71
2007/8	38.8	4,83	16.2	6.6	0,75
2007/9	18.4	2,28	15.5	6.7	0,74
2007/10	35.8	1,45	17.4	6.8	0,78
2007/11	55.4	1,42	17.0	6.4	0,83
2007/12	50.6	0,84	17.1	5.9	0,81
2008/1	48.3	0,67	16.7	6.9	0,87
2008/2	130.4	1,68	15.1	6.7	0,87
2008/3	95.3	1,17	16.6	6.0	0,87
2008/4	99.6	1,38	16.3	6.4	0,88
2008/5	116.9	2,02	16.0	7.0	0,83
2008/6	28.5	2,13	16.8	5.6	0,77
2008/7	37.6	4,54	15.6	6.4	0,8
2008/8	23.3	3,14	16.6	6.1	0,73
2008/9	22.5	2,92	17.4	6.4	0,75
2008/10	55.3	1,63	17.1	7.2	0,82
2008/11	59.7	2,76	17.0	6.2	0,82
2008/12	23.2	0,82	17.3	6.2	0,83
2009/1	80.9	1,59	16.8	7.2	0,88
2009/2	40.8	1,71	16.4	6.9	0,86

2009/3	60.7	1.59	18.0	7.1	0,84
2009/4	29.5	2.32	17.5	6.9	0,82
2009/5	21.3	3.78	18.2	6.6	0,77
2009/6	46.9	5.16	17.5	8.0	0,77
2009/7	17.9	5.49	17.1	8.0	0,74
2009/8	15.0	4.49	17.2	7.6	0,74
2009/9	3.8	3.09	17.5	8.4	0,67
2009/10	32.1	2.61	17.8	7.3	0,77
2009/11	20.7	2.23	18.3	7.3	0,74
2009/12	37.4	1.55	18.2	7.5	0,81
2010/1	12.2	1.60	18.3	8.1	0,75
2010/2	82.7	1.73	17.5	8.9	0,84
2010/3	47.3	1.55	18.3	7.8	0,79
2010/4	77.1	2.31	18.1	9.0	0,8
2010/5	54.5	3.81	17.7	8.5	0,77
2010/6	42.4	5.15	16.3	7.6	0,78
2010/7	60.6	5.53	16.9	6.9	0,74
2010/8	19.5	4.47	15.2	6.5	0,69
2010/9	13.8	3.09	17.1	6.1	0,64
2010/10	13.0	2.61	17.1	6.6	0,72
2010/11	30.0	2.28	16.2	5.5	0,77
2010/12	56.1	1.55	15.2	6.3	0,91
2011/1	43.4	1,14	16.0	6.5	0,88
2011/2	99.0	1,24	15.6	7.5	0,91
2011/3	37.4	0,98	16.0	5.7	0,81
2011/4	122.1	2,88	15.7	7.5	0,9
2011/5	47.6	5,26	16.3	7.5	0,8
2011/6	32.8	5,85	16.6	7.2	0,78
2011/7	50.9	8,05	15.1	7.3	0,79
2011/8	12.3	5,24	16.5	7.2	0,7
2011/9	44.6	4,67	15.8	7.5	0,74
2011/10	33.4	2,67	16.7	6.2	0,87
2011/11	62.1	2,21	16.8	6.3	0,89
2011/12	57.5	1,22	16.5	6.9	0,93
2012/1	100.9	2,39	15.3	6.6	0,97
2012/2	74.7	1,83	15.3	6.4	0,97
2012/3	44.3	2,21	16.5	7.5	0,93
2012/4	75.2	3,35	16.7	7.0	0,93
2012/5	19.6	3,39	16.6	7.6	0,92

2012/6	19.6	3,50	16.1	6.9	0,89
2012/7	19.2	4,88	15.7	7.3	0,91
2012/8	15.3	4,24	15.4	6.0	0,84
2012/9	14.5	3,24	15.8	7.4	0,88
2012/10	48.6	2,70	17.2	7.4	0,9
2012/11	105.4	2,24	16.8	6.7	0,95
2012/12	23.1	1,68	17.0	6.7	0,85
2013/1	23.0	2,05	17.5	8.8	0,87
2013/2	77.7	2,44	16.6	7.9	0,88
2013/3	51.0	2,26	17.6	9.0	0,86
2013/4	12.3	2,12	17.9	9.5	0,8
2013/5	95.1	3,10	17.4	8.0	0,85
2013/6	21.8	6,02	16.7	8.1	0,82
2013/7	29.8	8,18	15.1	7.7	0,82
2013/8	24.3	7,44	15.6	6.9	0,84
2013/9	10.8	5,69	16.4	8.0	0,8
2013/10	55.8	5,63	17.3	7.9	0,85
2013/11	24.7	4,12	17.7	6.6	0,77
2013/12	24.0	3,19	17.6	7.3	0,81