

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

ESCUELA DE POSGRADO



UNIDAD DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE CIENCIAS
AGRARIAS
PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS

TESIS:

EFFECTO DE LAS PLANTACIONES FORESTALES SOBRE LA
DISPONIBILIDAD DEL RECURSO HÍDRICO EN LA CUENCA
HIDROGRÁFICA DEL RÍO REJO – CAJAMARCA

Para optar el Grado Académico de

MAESTRO EN CIENCIAS

MENCIÓN: GESTION AMBIENTAL

Presentado por:

RONALD WILLIAMS QUIROZ URRUNAGA

Asesor:

M. Sc. WALTER RICARDO RONCAL BRIONES

Cajamarca, Perú

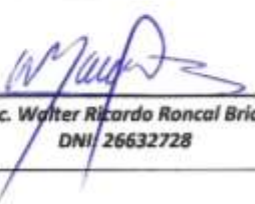
2025

CONSTANCIA DE INFORME DE ORIGINALIDAD

1. Investigador:
Ronald Williams Quiroz Urrunaga
DNI: 46383819
Escuela Profesional/Unidad de Posgrado de la Facultad de Ciencias Agrarias. Programa de Maestría en Ciencias, Mención: Gestión Ambiental.
2. Asesora: M. Sc. Walter Ricardo Roncal Briones
3. Grado académico o título profesional
☐ Bachiller ☐ Título profesional ☐ Segunda especialidad
☒ Maestro ☐ Doctor
4. Tipo de Investigación:
☒ Tesis ☐ Trabajo de investigación ☐ Trabajo de suficiencia profesional
☐ Trabajo académico
5. Título de Trabajo de Investigación:
Efecto de las plantaciones forestales sobre la disponibilidad del recurso hídrico en la cuenca hidrográfica del río rojo – Cajamarca.
6. Fecha de evaluación: **12/01/2026**
7. Software antiplagio: ☒ TURNITIN ☐ URKUND (ORIGINAL) (*)
8. Porcentaje de Informe de Similitud: **6%**
9. Código Documento: **3117:545385330**
10. Resultado de la Evaluación de Similitud:
☒ **APROBADO** ☐ PARA LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES O DESAPROBADO

Fecha Emisión: **14/01/2026**

*Firma y/o Sello
Emisor Constancia*



M. Sc. Walter Ricardo Roncal Briones
DNI 26632728

* En caso se realizó la evaluación hasta setiembre de 2023

COPYRIGHT 2025 © by
RONALD WILLIAMS QUIROZ URRUNAGA
Todos los derechos reservados



Universidad Nacional de Cajamarca
LICENCIADA CON RESOLUCIÓN DE CONSEJO DIRECTIVO N° 080-2018-SUNEDU/CD
Escuela de Posgrado
CAJAMARCA – PERU



PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS


ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Siendo las 16..... horas, del día 21 de agosto del dos mil veinticinco, reunidos en el Auditorio de la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional de Cajamarca, el Jurado Evaluador presidido por el, **Dr. MARCIAL HIDELSO MENDO VELÁSQUEZ, Dr. WILFREDO POMA ROJAS, M.Cs. LUIS DÁVILA ESTELA**, y en calidad de Asesor el **M.Sc. WALTER RICARDO RONCAL BRIONES**, actuando de conformidad con el Reglamento Interno y el Reglamento de Tesis de Maestría de la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional de Cajamarca, se dio inicio a la Sustentación de la Tesis titulada **“EFECTO DE LAS PLANTACIONES FORESTALES SOBRE LA DISPONIBILIDAD DEL RECURSO HÍDRICO EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RIO REJO-CAJAMARCA”**. presentada por el **Bachiller en Ingeniería Forestal RONALD WILLIAMS QUIROZ URRUNAGA**.

Realizada la exposición de la Tesis y absueltas las preguntas formuladas por el Jurado Evaluador, y luego de la deliberación, se acordó aprobar..... con la calificación de diecisiete (17)..... la mencionada Tesis; en tal virtud, el **Bachiller en Ingeniería Forestal, RONALD WILLIAMS QUIROZ URRUNAGA**. está apto para recibir en ceremonia especial el Diploma que lo acredita como **MAESTRO EN CIENCIAS** Mención en **GESTIÓN AMBIENTAL**, de la Unidad de Posgrado de la Facultad de Ciencias Agrarias.

Siendo las 17:40.. horas del mismo día, se dio por concluido el acto.


.....
M.Sc. Walter Ricardo Roncal Briones
Asesor


.....
Dr. Marcial Hidelso Mendo Velásquez
Jurado Evaluador


.....
Dr. Wilfredo Poma Rojas
Jurado Evaluador


.....
M.Cs. Luis Dávila Estela
Jurado Evaluador

DEDICATORIA

A mi Madre.

Dora, a ti más que a nadie...

Por tu amor, paciencia y confianza,

Por tu apoyo incondicional, hasta el día de hoy

Por darme la oportunidad de seguir avanzando en mi carrera profesional

Mil gracias

A mi Padre.

William, por tu protección absoluta...

Por los grandes pasos que has recorrido

Por mostrarme la satisfacción de ser profesional

Por hacerme entender lo importante de la vida académica

Muchas gracias

A Gabriela y Marisabel, mis hermanas.

Por su apoyo silencioso en los momentos difíciles

Por su cariño y admiración hacia mi persona.

Por hacerme entender que siempre estarán allí cuando más las necesite

A mis abuelos Flor de María, María Luz y Julio Cesar

cuyas manos trabajadoras y espíritu incansable

me han enseñado el valor de la dedicación y el trabajo duro.

Sus vidas, llenas de sacrificios y logros, son un testimonio de que no hay meta inalcanzable

ni sueño demasiado grande. Esta tesis es el resultado de ese legado.

¡¡¡A todos ustedes mi infinita gratitud!!!

AGRADECIMIENTO

*A mi asesor de tesis Ing. Walter Ricardo Roncal Briones
Gracias por su guía invaluable, paciencia y apoyo constante
durante este viaje académico. Su sabiduría y dedicación han
sido fundamentales en cada paso de este proceso.
Este logro no habría sido posible sin usted.*

“Si te sirve de algo, nunca es demasiado tarde o, en mi caso, demasiado pronto para ser quien quieres ser. Espero que vivas una vida de la que te sientas orgulloso. Y si ves que no es así, espero que tengas la fortaleza para empezar de nuevo”

CONTENIDO

	Pág.
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
RESUMEN	xviii
ABSTRACT.....	xix
CAPÍTULO I	1
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO II	4
REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
2.1. Antecedentes de la Investigación	4
2.1.1. <i>Antecedentes Internacionales</i>	4
2.1.2. <i>Antecedentes Nacionales</i>	6
2.2. Bases Teóricas.....	8
2.2.1. <i>Relación Plantaciones Forestales - Recurso Hídrico</i>	8
2.2.2. <i>Plantaciones Forestales</i>	15
2.2.3. <i>Recursos Hídricos</i>	17
2.2.3.1. Balance Hídrico.	18
2.2.3.2. Importancia del Balance Hídrico.	21
2.2.3.3. Ciclo Hidrológico.....	21
2.2.3.4. Componentes del Ciclo Hidrológico.....	23
2.2.3.5. Cuenca Hidrográfica.	35
2.3.4. Modelamiento Hidrológico.	50
CAPÍTULO III.....	53
MATERIALES Y MÉTODOS	53
3.1. Ubicación y Características del Área de Estudio.....	53
3.1.1. <i>Ubicación</i>	53
3.1.2. <i>Características del Área de Estudio</i>	53
3.1.2.1. <i>Clima</i>	53

3.1.2.2. Ecología y Geología.....	55
3.2. Equipos y Materiales	56
3.3. Metodología	57
3.3.1. <i>Recolección de datos</i>	57
3.3.2. Procesamiento de datos.....	68
CAPÍTULO IV.....	71
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	71
4.1. Efecto de las plantaciones forestales de coníferas en la disponibilidad hídrica de la cuenca del Río Rejo.	71
4.2. Cuantificación de la estimación de los parámetros que controlan la respuesta hidrológica en la cuenca del Río Rejo	90
CAPÍTULO V	109
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	109
CAPÍTULO VI.....	111
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	111
ANEXOS	
Anexo 1. Panel fotográfico del trabajo	130

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Clasificación de áreas	37
Tabla 2. Clasificación del Coeficiente de Compacidad o Gravelius	39
Tabla 3. Relación Forma de Horton.....	40
Tabla 4. Clasificación del Índice de Alargamiento.....	41
Tabla 5. Clases de pendiente del cauce (%)	42
Tabla 6. Clasificación del relieve de una cuenca de acuerdo a su pendiente	43
Tabla 7. Clasificación de valores de masividad.....	46
Tabla 8. Factores de densidad de drenaje de cuencas según Strahler / Horton	47
Tabla 9. Tipo de orden de corriente	48
Tabla 10. Clases de tiempo de concentracion.....	50
Tabla 11. Descripción de las características físicas y químicas de los tipos de suelo requeridos por el modelo SWAT.	60
Tabla 12. Características del tipo de uso de suelo requeridos por el modelo SWAT.....	63
Tabla 13. Ubicación geográfica de la estación meteorológica de Granja Porcón – Cajamarca	65
Tabla 14. Tipo de datos meteorológicos de la estación Granja Porcón – Cajamarca.....	65
Tabla 15. Subcuencas delimitadas mediante el modelo hidrológico SWAT.	71
Tabla 16. Numero de HRUs por cada subcuenca dentro de la cuenca hidrográfica del Río Rejo.	75
Tabla 17. Rango de pendiente dentro de la cuenca hidrográfica del Río Rejo.....	77
Tabla 18. Valores de ajuste de parámetros para calibración de la cuenca hidrográfica del Río Rejo - primera iteración.....	82

Tabla 19. Valores de ajuste de parámetros para calibración de la cuenca hidrográfica del Río Rejo - segunda iteración.	84
Tabla 20. Valores de ajuste de parámetros para calibración de la cuenca hidrográfica del Río Rejo - tercera iteración.	86
Tabla 21. Esquema de valoración para evaluar el desempeño de la calibración a través de coeficientes estadísticos.	89
Tabla 22. Resultados de parámetros estadísticos para la calibración y validación del modelo hidrológico SWAT.	89
Tabla 23. Tipo de Uso de suelo dentro de la cuenca hidrográfica del Río Rejo.	91
Tabla 24. Parámetros del balance hídrico obtenidos del proceso de modelamiento hidrológico con SWAT de la cuenca hidrográfica del Río Rejo.	92

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Tipo de curva hipsométrica	44
Figura 2. Histograma de frecuencias altimétricas.....	45
Figura 3. Mapa de ubicación de la Cuenca Hidrográfica del río Rejo.....	54
Figura 4. Mapa altitudinal de la cuenca hidrográfica del Río Rejo.	59
Figura 5. Mapa de tipo de suelos de la cuenca hidrográfica del Río Rejo.	61
Figura 6. Mapa del tipo de uso de suelos de la cuenca hidrográfica del Río Rejo.	64
Figura 7. Climograma de la estación Granja Porcón – Período Anual (1979-2020).....	66
Figura 8. Climograma de la estación Granja Porcón – Período Mensual (1979-2020).....	67
Figura 9. Diagrama del proceso de modelamiento hidrológico con la herramienta QSWAT+.	70
Figura 10. Mapa de subcuencas delimitadas mediante el modelo hidrológico SWAT dentro de la cuenca hidrográfica del Río Rejo.	73
Figura 11. Mapa de HRUs delimitadas mediante el modelo hidrológico SWAT dentro de la cuenca hidrográfica del Río Rejo.....	76
Figura 12. Mapa de pendiente dentro de la cuenca hidrográfica del río Rejo.....	78
Figura 13. Componentes del balance hídrico, pertenecientes a la cuenca del Río Rejo en base a la primera simulación de QSWAT.....	80
Figura 14. Flujo simulado y observado en el punto de aforo correspondiente a la primera simulación en la salida de la cuenca del río Rejo.	81
Figura 15. Diagrama de calibración de datos observados y simulados (primera iteración)....	83
Figura 16. Diagrama de calibración de datos observados y simulados (segunda iteración)...	85
Figura 17. Diagrama de calibración de datos observados y simulados (tercera iteración).	88

Figura 18. Escorrentía superficial estimada - Cuenca Forestada y Cuenca no Forestada (Período Anual 1982 - 2020).	94
Figura 19. Escorrentía superficial estimada - Cuenca Forestada y Cuenca no Forestada (Período Mensual 1982 - 2020).	95
Figura 20. Flujo Lateral estimado – Cuenca Forestada y Cuenca no Forestada (Período Anual 1982 - 2020).....	98
Figura 21. Flujo Lateral estimado – Cuenca Forestada y Cuenca no Forestada (Período Mensual 1982 - 2020).....	99
Figura 22. Flujo Subterráneo estimado – Cuenca Forestada y Cuenca no Forestada (Período Anual 1982-2020).	101
Figura 23. Flujo Subterráneo estimado – Cuenca Forestada y Cuenca no Forestada (Período Mensual 1982 - 2020).	101
Figura 24. Percolación estimada – Cuenca Forestada y Cuenca no Forestada (Período Anual 1982-2020).....	104
Figura 25. Percolación estimada – Cuenca Forestada y Cuenca no Forestada (Período Mensual 1982 - 2020).....	105
Figura 26. Evapotranspiración estimada – Cuenca Forestada y Cuenca no Forestada (Período Anual 1982 - 2020)..	107
Figura 27. Evapotranspiración estimada – Cuenca Forestada y Cuenca no Forestada (Período Mensual 1982 - 2020).	107

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1. Panel fotográfico del trabajo.....	130

LISTA DE ABREVIATURAS

ALOS	= Sistema Avanzado de Observación Terrestre (del inglés Advanced Land Observing System).
DATUM	= Sistema de Referencia Geodésico.
DEM	= Modelo Digital de Elevación (del inglés Digital Elevation Model).
ENVI	= Entorno para la Visualización de Imágenes (del inglés Environment for Visualizing Images).
FAO	= Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (del inglés Food and Agriculture Organization of the United Nations).
HadGEM2 – ES	= Modelo Global del Medio Ambiente de Centro Hadley (del inglés Hadley Centre Global Environment Model versión 2).
HecGeoHms	= Sistema de Modelado Hidrológico – Sistema de Modelado Hidráulico Geoespacial (del inglés Hydrologic Modeling System – Geospatial Hydraulic Modeling System).
HRU	= Unidades de Respuesta hidrológica (del inglés Hydrologic Response Unit).
IDEAM	= Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
JAXA	= Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (del inglés Japan Aerospace Exploration Agency).
KGE	= Coeficiente de Eficiencia de Kling Gupta.
LS	= Modelo Empírico Lutz Scholtz.
LUCC	= Cambio de Uso y Cobertura del Suelo (del inglés Land Use Cover Change)

LSM	= Modelo Empírico Lutz Scholtz Modificado.
MCG	= Modelo Climático Global.
NumCum	= Numero de Curva.
NSE	= Coeficiente de Eficiencia de Nash – Sutcliffe.
PALSAR	= Radar de Apertura Sintética Banda L con Matriz en Fase (del inglés Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar).
QGIS	= Quantum GIS o Sistema de Información Geográfica Libre.
QSWAT+	= Interfase intuitiva de la Herramientas de Evaluación de Suelo y Agua (del inglés Soil Water Assessment Tools).
PRONAMACHS	= Programa Nacional de Manejo de Cuencas Hidrográficas y Conservación de Suelos.
RCP	= Trayectoria de concentración Representativa (del inglés Representative Concentration Pathways").
RH	= Recurso Hídrico
R ²	= Coeficiente de Determinación R cuadrado.
SENAMHI	= Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú.
SUFI – 2	= Algoritmo de Ajuste Secuencial de Incertidumbre versión 2 (del inglés Sequential Uncertainty Fitting versión 2 algorithm).
SRTM	= Misión Topográfica de Radar Transbordador (del inglés Shuttle Radar Topography Mission).

SWAT	= Herramientas de Evaluación de Suelo y Agua (del inglés Soil Water Assessment Tools)
SWATCUP	= Programa de Calibración e Incertidumbre de la Herramienta de Evaluación de Suelo y Agua (del inglés Calibration and Uncertainty Programs for SWAT).
UNESCO	= Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (del inglés United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization).
UTM	= Sistema de Coordenadas Universal Transversal de Mercator (del inglés Universal Transverse Mercator).
USDA	= Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (del inglés United States Department of Agriculture).
USGS	= Agencia del Servicio Geológico de Estados Unidos (del inglés United States Geological Survey).
WGS	= Sistema Geodésico Mundial (del inglés World Geodetic System).
WRM	= Movimiento Mundial por los Bosques Tropicales (del inglés World Rainforest Movement)
ZEE	= Zonificación Ecológica Económica.

RESUMEN

El presente estudio se desarrolló en la cuenca del río Rejo, ubicada a 3,462 msnm, en los distritos de Tumbadén y Cajamarca, pertenecientes a las provincias de San Pablo y Cajamarca, en el departamento de Cajamarca. El objetivo principal fue evaluar el impacto del establecimiento de plantaciones forestales sobre la disponibilidad del recurso hídrico en la cuenca. Para ello, se empleó el modelo hidrológico SWAT, considerando variables como topografía, tipo y uso del suelo, y condiciones climáticas (precipitación y temperatura). La simulación del balance hídrico fue calibrada y validada estadísticamente mediante el software SWAT-CUP, obteniendo indicadores de desempeño satisfactorios: coeficiente de determinación (R^2) de 0.82, eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) de 0.81, eficiencia de Kling-Gupta (KGE) de 0.88 y porcentaje de sesgo (PBIAS) de -4.9 %, todos dentro de rangos considerados buenos. El análisis comparativo entre los escenarios con y sin cobertura forestal evidenció variaciones significativas en los componentes del ciclo hidrológico. En el escenario con plantaciones forestales, la escorrentía superficial se redujo en aproximadamente 66 %, el flujo lateral disminuyó en 20 %, mientras que el flujo subterráneo y la percolación aumentaron en 31 % y 29 %, respectivamente. Asimismo, la evapotranspiración se incrementó en 41 %. Estos resultados reflejan el efecto regulador de la cobertura forestal sobre la dinámica hídrica de la cuenca, favoreciendo la infiltración, la recarga subterránea y la pérdida de agua por evapotranspiración, al tiempo que se reduce significativamente el escurrimiento superficial.

Palabras clave: Plantaciones Forestales, Balance Hídrico, Modelo Hidrológico, Recurso hídrico, Cuenca El Rejo.

ABSTRACT

This study was conducted in the Rejo River watershed, located at 3,462 meters above sea level, within the districts of Tumbadén and Cajamarca, in the provinces of San Pablo and Cajamarca, department of Cajamarca, Peru. The main objective was to evaluate the impact of forest plantations on water resource availability. The SWAT hydrological model was applied, incorporating variables such as topography, land use and soil type, and climatic conditions (precipitation and temperature). Model calibration and validation were performed using the SWAT-CUP software, yielding satisfactory statistical indicators: coefficient of determination (R^2) of 0.82, Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) of 0.81, Kling-Gupta efficiency (KGE) of 0.88, and percent bias (PBIAS) of -4.9 %, all within acceptable performance ranges. The comparative analysis between forested and non-forested scenarios revealed significant differences in hydrological components. In the forested scenario, surface runoff decreased by approximately 66 %, lateral flow by 20 %, while groundwater flow and percolation increased by 31 % and 29 %, respectively. Evapotranspiration also increased by 41 %. These results highlight the regulatory role of forest cover in watershed hydrology, promoting infiltration, groundwater recharge, and evapotranspiration, while significantly reducing surface runoff

Keywords: Forest Plantations, Water Balance, Hydrological Model, Water Resource, Rejo Basin.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

Las coberturas del suelo están íntimamente relacionadas con la cuantía y distribución de los recursos hídricos debido a que determinan el flujo de agua entre el suelo y la atmósfera a través de los procesos de intercepción, evapotranspiración, escorrentía superficial y flujos subsuperficiales (Calder 1992, Putuhena y Cordery., 2000 y Iroumé y Huber, 2000, como se citó en Martínez 2021, p.7). Así mismo Sahin y Hall (1996) en Martínez (2021) referencian que los cambios en la cobertura vegetal, a través de diversas prácticas de uso de suelo, pueden alterar significativamente el balance de agua superficial y la partición de las precipitaciones dentro de los procesos de evaporación, escorrentía, y flujo de agua subterránea afectando con ello la cantidad, calidad y distribución espacio temporal del agua en el sistema fluvial.

Llerena et al. (2007) mencionan que el agua es un insumo crítico para las plantaciones forestales e influye considerablemente en sus rendimientos, el aumento de la demanda hídrica en la cuenca hidrográfica por los árboles plantados en zonas de paramo y en tiempos de escasez del recurso puede generar conflictos entre usuarios que se deben prevenir. Para este fin hace falta más información hidrometeorológica en las cuencas que permita contar con balances hídricos confiables, anticipar la demanda de las especies plantadas y medir su consumo de agua; es necesario asimismo contar con datos de calidad del agua, información cartográfica, de ordenamiento territorial y catastral, que faciliten gestionar la cuenca.

En tal sentido Fohrer et al. (2001) determinan que la gestión eficiente de los recursos hídricos se encuentra fuertemente vinculada a un adecuado entendimiento de los procesos de precipitación – escorrentía y sus efectos de mediano y largo plazo en el balance hídrico. Además, You et al. (2017) hacen referencia que, a pesar de los avances científicos en esta materia, todavía existe una comprensión limitada de como las alteraciones del uso de la tierra

impactan sobre los flujos hídricos. Así mismo, López y Delgado (2009) señalan que estudios recientes demuestran el potencial de los enfoques de modelación integrada para evaluar los efectos del cambio de uso de suelo sobre la provisión y regulación de los recursos hídricos. Finalmente, Yang et al. (2005) indican que la modelación es una poderosa herramienta de bajo costo, orientada a evaluar el efecto de las actividades humanas sobre los procesos hidrológicos en una cuenca. Lo anterior es de gran importancia sobre todo en países en vías de desarrollo donde los recursos disponibles son escasos. La demanda de modelos hidrológicos para facilitar la toma de decisiones se ha incrementado sobre todo cuando es necesario predecir las condiciones hidrológicas futuras resultantes de cambios de uso de suelo y clima.

En tal sentido, el propósito principal de esta investigación es comprender el efecto del cambio de uso de suelo sobre la disponibilidad del recurso hídrico, en la cuenca hidrográfica del Río Rejo. Determinar estos cambios y evaluar sus efectos es importante para comprender el comportamiento que ejerce la sustitución de ecosistemas de páramo por la instalación en masa de plantaciones forestales. Por ello los resultados obtenidos de este trabajo permitirán tener una mejor perspectiva y entendimiento de las complejas interacciones entre clima, uso de suelo y regulación hídrica.

En este contexto desde el punto de vista hidrológico – forestal, se formula las siguientes preguntas y objetivos de investigación:

Pregunta general: ¿Cuál es el efecto de las plantaciones forestales de coníferas sobre la disponibilidad del recurso hídrico en la cuenca hidrográfica del río Rejo?

Pregunta específica: ¿Cuánto es la estimación de los procesos que controlan a la respuesta hidrológica en la cuenca del río Rejo, mediante la modelación espacial y temporalmente distribuida?

Objetivo general: Determinar el efecto de las plantaciones forestales de confieras sobre la disponibilidad del recurso hídrico en la cuenca hidrográfica del Río Rejo.

Objetivo específico: Cuantificar la estimación de los parámetros que controlan la respuesta hidrológica en la cuenca del Río Rejo, mediante la modelación espacial y temporalmente distribuida.

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Antecedentes de la Investigación

2.1.1. *Antecedentes Internacionales*

Martínez (2021), en Chile evidenció que, en los últimos 50 años, la expansión de las plantaciones forestales ha transformado significativamente el uso del suelo en la zona centro-sur al sustituir suelos desnudos, praderas, pastizales y bosques nativos, lo que resulta crucial en un contexto de cambio climático para identificar y cuantificar los impactos antropogénicos en el ciclo hidrológico. Utilizando imágenes Landsat (1986–2021) y algoritmos de clasificación supervisada, se analizó la evolución espacial y temporal de estas plantaciones en las cuencas de Huenchullami, Purapel y Perquilauquén; y, mediante el modelo hidrológico VIC, se simuló escenarios históricos, de aumento y reducción de plantaciones, además de proyecciones futuras (2030 – 2060). Los resultados indican que un incremento en la superficie de plantaciones forestales reduce la escorrentía y aumenta la evapotranspiración, mientras que una disminución produce efectos contrarios, siendo estos cambios más pronunciados en condiciones de aridez y estrés hídrico.

Gonzales et al. (2021), en México determinaron el impacto del cambio climático y cambio de uso/cobertura de la tierra en la respuesta hidrológica y erosión hídrica de la subcuenca Quiscab, su área aproximada es 149.7 km², mediante el uso del modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool). Se consideró una línea base (1994 – 2015) un escenario de cambio climático RCP 8.5, modelo HadGEM2 – Es a los 2050 y dos escenarios hipotéticos de cambio de uso/cobertura (-80 bosque, y +50% bosque). Con el programa SWATCUP, se realizó la calibración en dos puntos. Estos puntos de calibración presentaron un comportamiento hidrológico distinto entre caudales simulados y observados. El punto con

menor intervención del ajuste hidrológico fue muy bueno ($NS = 0.77$; $KGE = 0.87$). El punto en el sector de mayor intervención el ajuste hidrológico no fue satisfactorio ($NSE = -5$; $KGE = -0.8$). Bajo los escenarios evaluados se previó que el mayor impacto en la respuesta hidrológica y erosión hídrica fue ocasionado por el cambio climático. La producción de agua y erosión hídrica prevé reducirse hasta un 40% y 20%, respectivamente. Si bien los datos observados son limitados, temporal y espacialmente, se logró simular el ciclo hidrológico y estimar la erosión hídrica.

Jaramillo (2021), en Colombia especificó los resultados obtenidos de la modelación del impacto por cambio de uso del suelo sobre el comportamiento hidrológico de la subcuenca del Río Quindío. Para comenzar, se realizó la clasificación de coberturas de la zona de estudio para los años 2000 y 2020, mediante herramientas de teledetección; posteriormente, se utilizó el modelo CA – Márkov para generar un mapa de predicción de coberturas del año 2040, a partir de las dos imágenes clasificadas y de parámetros complementarios definidos en compañía de actores institucionales. A partir de esto, se identificó las tendencias en los cambios de coberturas en la subcuenca, y se prosiguió a realizar una modelación hidrológica para los distintos escenarios de uso del suelo, mediante la herramienta SWAT. La simulación indicó que para el año 2040, la subcuenca del Río Quindío presentará una mayor variabilidad en sus caudales mínimos y máximos a lo largo del año; revelando una mayor susceptibilidad ante fenómenos climáticos extremos.

Gimeno (2019), en Chile cuantificó las respuestas hidrológicas ante escenarios de cambio de cobertura del suelo para la cuenca del Río Lumaco, Región de la Araucanía Chile, para el año 2015, combinando un modelo de cambio de cobertura/uso del suelo (Dynamic Conversion of Land Use and its Effects, Dyna CLUE) y un modelo hidrológico (Soil and Water Assesment Tool, SWAT). Se estableció dos escenarios, un escenario base utilizando un landcover del año 2015 y un escenario de protección y recuperación del bosque nativo (EPRB).

El EPRB fue generado mediante Dyna CLUE, bajo el supuesto de la implementación, a principio de la década de 1990, de la Ley de Recuperación del Bosque Nativo y Fomento Forestal basado en el primer proyecto presentado por el ejecutivo en abril de 1992 mediante el boletín N° 669. A su vez, se calibró y validó el modelo hidrológico SWAT para la cuenca del Río Lumaco utilizando un método de calibración global basado en una versión de Particle Swarm Optimization (hydroPSO). Los resultados arrojaron una representación confiable del caudal de salida a escala mensual, con un coeficiente de eficiencia de Nash – Sutcliffe de 0,91 y 0,89 para el periodo de calibración y validación respectivamente. Mientras que la simulación del EPRB bajo el modelo Dyna CLUE para el año 2015 obtuvo un coeficiente Kappa de 0,7 y un Kappa simulado difuso de 0,27. La simulación del EPRB significó un aumento de 6 400 hectáreas de bosque caducifolio y 574 hectáreas de bosque siempreverde para el año 2015 respecto del landcover para dicho año. Al comparar el caudal simulado para ambos escenarios, no se encontraron diferencias sustantivas, con una diferencia relativa de 0,13% para todo el periodo simulado.

2.1.2. Antecedentes Nacionales

Peña y Lavado (2024), en la cuenca Puyango Tumbes – Perú, definieron que el cambio de uso del suelo es uno de los principales factores impulsores del cambio hidrológico de las cuencas hidrográficas. De esta manera, las respuestas hidrológicas a los cambios en el uso del suelo requieren evaluaciones detalladas para garantizar una gestión sostenible tanto de los recursos hídricos como de los ecosistemas naturales. El objetivo de este estudio fue simular el impacto de diferentes escenarios de cambio LULC: 1985, 1995, 2005 y 2015 en el balance hídrico, a través del modelo hidrológico Herramienta de Evaluación de Suelo y Agua (SWAT), en la cuenca del Río Puyango Tumbes perteneciente a Ecuador y Perú durante un período de 35 años (1981 – 2015). El análisis del cambio de LULC mostró que hubo un aumento del porcentaje de área de la cuenca cubierta por pastizales en un 18 % mientras que hubo una

disminución de las sabanas en 38 %. Además, las características del caudal cambiaron desde 1985 al 2015 considerando sus correspondientes ULC en las tres estaciones hidrométricas analizadas para el periodo 1981 - 2015. Al mismo tiempo se estimaron disminuciones en los caudales anuales en dicho periodo para la estación Pindo (Ecuador) en 4 m³/s y la estación El Tigre (Perú) con 16.48 m³/s, la estación Puyango (Ecuador) en 29 m³/s. La dinámica del ciclo hidrológico en toda la cuenca presentó una tendencia creciente en la evapotranspiración con 2.14 % y por el contrario una disminución del caudal superficial en 20.7 %, la percolación en 29.29 % y el flujo lateral en 0.93 %.

Del Águila (2021), en Perú, determinó que el modelamiento hidrológico de las cuencas es importante para la gestión del recurso hídrico; en ese sentido, las cuencas de la sierra central del Perú ubicadas en zonas de cabecera son relevantes. El objetivo general de su investigación fue modelar los procesos hidrológicos en las cuencas Anya y Mchique, pertenecientes a la cuenca del Río Mantaro, Junín. Se utilizó dos modelos para la generación de esorrentía; el modelo empírico mensual Lutz Scholtz (LS) y el modelo semidistribuido diario SWAT. El modelo Lutz Scholtz Modificado (LSM) permitió involucrar las características del suelo y cobertura vegetal en la generación de esorrentía a partir de precipitación y por ende mejorar el entendimiento físico del proceso. La bondad de ajuste de los modelos fue analizada mensualmente por métodos gráficos y estadísticos. En Anya, los indicadores de desempeño fueron buenos con los tres modelos probados, verificándose que los estadísticos mejoraron con los modelos SWAT y LSM; en Mchique se obtuvo un 66.7% de indicadores aprobatorios en todos los modelos probados. Así mismo se encontró que con la actualización del mapa de cobertura vegetal al 2019 se realizó el modelamiento espacial de las cuencas con el módulo Land Use Model del TerrSet, comprobándose, en Anya y Mchique respectivamente, un aumento de lo siguiente: área urbana (103 y 43 ha.), plantaciones forestales (336 y 60 ha.) y cultivos (89 y 206 ha.), con disminución en herbazales y matorrales (529 y 309 ha.).

Simultáneamente, se extrajo información de cinco modelos climáticos globales (MCG) en dos escenarios de emisiones (RCP 4.5 y 8.5) para simularlos en SWAT. Se logró comprobar que, en los dos escenarios probados, habrá un aumento en la precipitación y la temperatura en la zona, lo cual incidirá en el aumento de la escorrentía superficial. Por tanto, se concluye que habrá un aumento de los caudales en los dos escenarios de emisiones, en Anya del 29.4% (RCP 4.5) y 34.1% (RCP 8.5) y en Mchique del 5.4% (RCP 4.5) y 10.8% (RCP 8.5).

Condori (2019), en el departamento de Puno, determinó el efecto del cambio de uso del suelo por la actividad agropecuaria, sobre la producción de agua y sedimentos de la subcuenca del Río Llallimayo perteneciente a la localidad de Melgar departamento de Puno, mediante el modelo hidrológico SWAT. Los resultados obtenidos en la validación fueron; un coeficiente R^2 de 0.79 y un coeficiente NSE de 0.75 en caudales diarios, del mismo modo, los caudales con escenario de cambio simulados se incrementaron en épocas de máxima avenida en un promedio de 62 m³/s equivalente a un 8.5 % con respecto a caudal base y en épocas de estiaje disminuyó en un promedio de 5 m³/s equivalente a un 12.36% con respecto con el caudal base.

2.2. Bases Teóricas

2.2.1. *Relación Plantaciones Forestales - Recurso Hídrico*

Pizarro et al. (2017) precisan que los ecosistemas forestales desempeñan un papel crucial en el ciclo hidrológico, pues influyen en la cantidad y calidad de agua disponible además de regular los flujos de agua superficial y subterránea. Un desafío clave que enfrentan quienes manejan la tierra, los bosques, las plantaciones forestales y los recursos hídricos, es maximizar la amplia gama de beneficios de los ecosistemas forestales, sin menoscabo de los recursos hídricos y de sus funciones ecosistémicas. Este reto es particularmente relevante en el contexto de la adaptación al cambio climático, lo que refuerza cada vez más la importancia de la gestión sostenible del sector forestal. Así, existe una necesidad urgente de poseer una mejor

comprensión sobre las interacciones entre dichos sistemas forestales y los recursos hídricos, con el fin de incorporar los resultados de las investigaciones en las políticas públicas.

Pizarro et al. (2017) determinan que los árboles consumen agua mediante dos procesos distintos. En primer lugar, el agua es absorbida por las raíces del árbol en el suelo, evaporándose a través de los poros o estomas en la superficie de las hojas. Este proceso es conocido como transpiración y es un proceso fisiológico que actúa en respuesta a factores edáficos y atmosféricos. El segundo proceso es la intercepción de agua por las superficies de las hojas, ramas y troncos durante los eventos de lluvia, y su posterior evaporación. Las pérdidas por intercepción se ven reforzadas por la elevada turbulencia atmosférica creada por las copas de los árboles en la zona de borde superior del bosque, debido a su altura y su rugoso perfil aerodinámico. Tomados en conjunto, estos dos procesos son denominados; evapotranspiración. Ambos se ven fuertemente afectados por la cantidad de luz solar, la temperatura y la humedad atmosférica, así como también por la velocidad del viento. De este modo, los árboles tienen la capacidad de utilizar más agua que la mayoría de los otros tipos de vegetación, aunque la cuestión de si lo hacen o no, y en qué medida, depende de varios factores, los que se listan a continuación:

- **El tipo de especie**

Las coníferas siempreverdes tienden a tener una mayor intercepción del agua lluvia que las latifoliadas, debido a que la superficie foliar en las coníferas tiende a ser mayor que la superficie foliar de las latifoliadas. Además, mantienen las hojas durante todo el año y en particular durante el período de invierno, cuando las condiciones son por lo general más húmedas. Sin embargo, en general las tasas de transpiración varían muy poco entre ambos sistemas forestales. Por lo tanto, si los procesos de intercepción y transpiración se consideran

en conjunto, se podría decir que las coníferas utilizan algo más de agua en comparación a las latifoliadas, aunque siempre son proporciones bajas (Pizarro et al., 2017).

- **Clima y su influencia en la plantación**

Maier et al. (2017) hacen referencia que la cantidad de agua utilizada por las especies forestales está fuertemente influenciada por el clima en el que estas se encuentran. Las pérdidas anuales de intercepción son afectadas de manera importante por el clima y, en términos de volumen absoluto, alcanzan un máximo en condiciones húmedas y ventosas. En general, se ha aprendido que los efectos hidrológicos de las plantaciones forestales son mínimos cuando se establecen en zonas más secas ($<800\text{mm/año}$), pues la evidencia internacional indica que los árboles utilizan más agua cuando el recurso se encuentra disponible en mayores cantidades, Asimismo, determinan que la posición de las plantaciones dentro de la cuenca y el diseño de plantación puede influir fuertemente en la disponibilidad de agua para otros fines. Los estudios indican que los efectos se minimizan al plantar lejos de las quebradas y cursos de agua, es decir, en las zonas más altas de las cuencas, lejos de las napas. Adicionalmente, plantar en sentido de las curvas de nivel puede significar un mayor consumo de agua en comparación con plantaciones establecidas en bloque, las que afectan en menor grado la hidrología de una cuenca. De hecho, se ha demostrado que la práctica más acertada es un multiuso de la propiedad, en donde el dueño de la tierra destina solo una porción de su terreno al uso forestal y el resto a otras actividades.

- **Suelo, geología y geomorfología**

Pizarro et al. (2017) determinan que el tipo de suelo, la geología y geomorfología de la cuenca, pueden afectar fuertemente el consumo del agua de las especies forestales, pues dichas variables influyen en la cantidad de agua disponible en el suelo para mantener los procesos de transpiración antes mencionados, pero sobre todo determinan cuánta agua se destinará a la

recarga de las napas. Sin embargo, la mayoría de las especies arbóreas son relativamente insensibles al secado del suelo, a menos que los niveles de humedad edáfica hayan alcanzado su punto de marchitez permanente. Árboles establecidos en suelos arenosos o poco profundos, son los más propensos a experimentar estrés hídrico, dando lugar a una fuerte disminución de la transpiración a través del cierre de sus estomas, pérdida del follaje, muerte regresiva de ramas y, en casos extremos, la muerte del individuo.

Por otra parte, Pizarro et al. (2017) determinan que también es necesario considerar las interacciones existentes entre el complejo suelo vegetación y la hidrología. En este sentido, entre los efectos hidrológicos que ejerce una masa vegetacional, se tiene que la cubierta aérea y el fuste (intercepción) disminuyen la cantidad de precipitación que impacta directamente al suelo a través de la intercepción y también disminuyen la energía cinética de la precipitación. Así, se reduce la erosión por salpicadura y el fragmentado de los agregados del suelo. En cuanto a la efectividad del tipo de cobertura vegetal, Iroumé y Huber (2000) analizaron dos parcelas bajo diferentes tipos de dosel de bosque (Pino Oregón y Bosque nativo) y su efecto en los caudales en la región de La Araucanía en Chile, concluyendo que la precipitación directa y el escurrimiento fustal fueron de 66 mm y 8% para la parcela de bosque nativo y de 60 mm y 6% para Pino Oregón, respectivamente. Estos valores reflejan una menor capacidad de intercepción del dosel de bosque nativo, comparado con el Pino Oregón. Sin embargo, al comparar este tipo de cubiertas con una cubierta de tipo pradera o vegetación baja, se han detectado posibles reducciones en los caudales de crecida en la cuenca experimental (donde están situadas ambas parcelas), por la intercepción de las lluvias por parte de la cubierta de bosques. Estos resultados muestran la importancia de la cobertura boscosa en los procesos de intercepción, redistribución de lluvias y generación de escorrentía.

A lo anterior, se suma el efecto de la cubierta viva o muerta sobre el suelo, la que disminuye la energía cinética de la lluvia, aumentando la resistencia a la circulación superficial

del flujo y disminuyendo la línea de máxima pendiente de circulación; esto se traduce en el aumento de la retención del agua proveniente de las precipitaciones, favoreciendo la infiltración y la emisión de escorrentía subsuperficial., señalan que la tasa de infiltración en bosques con suelos no alterados normalmente excede a la intensidad de la lluvia y, por lo tanto, predominan los flujos subsuperficiales (Ward y Trimble, 2004).

Por último, se encuentran los sistemas radiculares, que favorecen la infiltración del agua hacia las napas subterráneas, aumentando también la calidad de esta. Germer et al. (2010), indican que en un sistema radical profundo y bien desarrollado de la vegetación arbórea, la materia orgánica, la actividad biológica del suelo, la alta porosidad y la baja densidad aparente, especialmente del horizonte A en el suelo, favorecen los flujos subsuperficiales.

- **Cambios de uso de suelo**

Mas y Sandoval (2011) conceptualizan que la humanidad ha mostrado a lo largo de su evolución la tendencia a modificar los ecosistemas terrestres, los cambios del uso del suelo (CUS) son considerados entre las principales fuerzas que inciden en los desequilibrios ambientales, por lo que el uso de herramientas de modelación del cambio de uso del suelo permite proyectar y explorar escenarios prospectivos, comprender los procesos clave y su descripción en términos cuantitativos. Por otra parte, Zuleta (2013) hace referencia que el cambio de uso de suelo consiste en la transición de una categoría a otra, como es el caso de la forestación y deforestación, la expansión agrícola o el cambio en la extensión urbana, y está en función de la presión sobre los recursos, oportunidades, políticas, vulnerabilidad, y la organización social; estas funciones tienen fuerte interacción que causan el cambio de uso de suelo. Además, Zuleta (2013) considera que los impactos del cambio de uso del suelo pueden evidenciarse mediante las variaciones en la hidrología de la cuenca hidrográfica, y su equilibrio está en función de la distribución de la vegetación y su interacción con el agua y el suelo,

donde, cualquiera alteración viene a modificar el ciclo hidrológico. De igual manera la conversión de los bosques para agricultura y viceversa, puede provocar problemas relacionados con escasez del agua en períodos de estiaje. Finalmente, Zuleta (2013) habla de que algunos estudios muestran que la disminución en la disponibilidad del recurso hídrico puede estar más afectada por la variabilidad climática que por el cambio de uso de suelo, sin embargo, la relación de la extensión de los cambios de uso de suelo pueden ser otro factor determinante.

- ***Beneficios de las plantaciones forestales en la disponibilidad del recurso hídrico***

La relación entre las plantaciones forestales y los recursos hídricos es compleja y a menudo ambivalente, presentando un balance crítico entre los servicios ecosistémicos de regulación y los costos en términos de rendimiento hídrico. Las investigaciones científicas evidencian que, sus beneficios más significativos se manifiestan en dos áreas clave: **la regulación del ciclo hidrológico y la mejora sustancial de la calidad del agua.**

La regulación hidrológica se materializa a través de la modificación de la partición del agua de lluvia. Al establecer una cobertura arbórea, se potencia la interceptación y se mejora la estructura del suelo, lo que incrementa las tasas de infiltración y reduce la escorrentía superficial. Esto se traduce directamente en la mitigación de caudales punta durante eventos de precipitación intensa, disminuyendo el riesgo de inundaciones y la erosión. A su vez, el fomento de la percolación favorece la recarga de acuíferos, lo cual es vital para sostener los caudales base de los ríos durante las épocas de estiaje, contribuyendo a la resiliencia hídrica de la cuenca.

Iroumé & Huber (2002) confirman que las plantaciones de *Pinus sp.*, ejercen un efecto regulador similar al encontrado en otras especies forestales. Su estudio demostró que las cuencas con mayor proporción de plantaciones de pino maduras presentan caudales punta y escorrentía superficial significativamente más bajos en comparación con cuencas dominadas

por praderas o terrenos despejados. Este beneficio se atribuye a la mayor capacidad de intercepción de lluvia y, sobre todo, a la mejora en la infiltración del agua en el suelo gracias a la capa de hojarasca y la estructura creada por las raíces, validando que la cobertura de pino es efectiva para mitigar la escorrentía.

El efecto de las plantaciones forestales en la recarga de acuíferos se manifiesta a través de su capacidad para mejorar la percolación profunda, especialmente cuando se establecen en suelos previamente degradados. Muñoz – Villers et al. (2012) determinaron que, en una cuenca con plantaciones de *Pinus* sp., en donde se midió el balance hídrico completo, se encontró que, a pesar del mayor consumo de agua por evapotranspiración, la estructura del suelo forestal facilitó una significativa recarga del acuífero, estimada en aproximadamente un 20% de la precipitación anual. Este hallazgo demuestra que la mejora en la infiltración y la reducción de la escorrentía superficial promovida por la cobertura arbórea son mecanismos efectivos que favorecen el movimiento del agua hacia las capas profundas del subsuelo, contribuyendo así al almacenamiento de agua subterránea y a la sostenibilidad del caudal base de los ríos.

Paralelamente a la regulación de los caudales, la mejora sustancial de la calidad del agua es uno de los beneficios más directos y menos ambiguos de las plantaciones forestales. Esta mejora es una consecuencia directa de la reducción de la escorrentía superficial y se manifiesta principalmente a través del control de la erosión y la filtración de nutrientes.

Bruijnzeel (2004) establece que las funciones hidrológicas de los bosques, el principal servicio ecosistémico que estos ofrecen no es "producir" más agua, sino proteger el suelo. La cobertura del dosel y, fundamentalmente, la capa de hojarasca en el suelo disipa la energía de las gotas de lluvia y mantienen una alta capacidad de infiltración. Al evitar la generación de escorrentía superficial el principal agente transportador de partículas, se previene la erosión hídrica. Esto se traduce directamente en ríos con menor turbidez y una drástica reducción en la

carga de sedimentos, lo cual es vital para la salud de los ecosistemas acuáticos y para alargar la vida útil de infraestructuras como embalses y sistemas de riego.

Oyarzún et al. (2007) quienes compararon la exportación de sedimentos y nutrientes (nitrógeno y fósforo) desde una cuenca con una plantación de *Pinus radiata* frente a una con bosque nativo. Sus resultados indicaron que, aunque el bosque nativo presentaba las menores pérdidas, la plantación de pino mostró una baja exportación de sedimentos y nutrientes, muy inferior a la reportada para usos agrícolas o de pastoreo en la misma región. Esto demuestra que las plantaciones forestales bien manejadas actúan como un filtro eficaz, previniendo que los contaminantes y el sedimento lleguen a los cursos de agua. En consecuencia, la forestación de tierras degradadas resulta en una mejora directa de la calidad del recurso hídrico para usos posteriores, incluyendo el consumo humano y la conservación de la biodiversidad acuática.

2.2.2. Plantaciones Forestales

Por un lado, Carnus et al. (2006) y PRONAMACHCS/FAO (1998a) describen las plantaciones como ecosistemas boscosos creados mediante la siembra de semillas o plantones, lo que implica una planificación cuidadosa en aspectos como la selección de especies, las condiciones del sitio, la calidad de las plantas y las técnicas de plantación. Este proceso comienza con la preparación de almácigos, sigue con la producción en vivero y culmina en la plantación definitiva, acompañada de medidas de protección y manejo silvicultural. Por otro lado, aunque la FAO (2006; 2007) se refiere a ellas simplemente como “bosques plantados”, autores como WRM (1999) y Mattoon (1998) critican esta definición, señalando que, sobre todo en los monocultivos de especies exóticas para pulpa y papel, estas plantaciones difieren notablemente de los bosques naturales en cuanto a composición, estructura, biodiversidad y en sus impactos ambientales, sociales y económicos.

2.2.2.1. Contexto Forestal y Forestación.

Bonnesoeur et al. (2019) mencionan que en respuesta a los compromisos internacionales (por ejemplo, la Iniciativa 20 x 20 y el Desafío de Bonn) o a las demandas locales y nacionales de protección de la madera y de las cuencas, varios países – andinos están restaurando la cobertura forestal, con la expectativa de mejorar los servicios ambientales. Los servicios ambientales relacionados con el agua, como el suministro de agua, la regulación hidrológica y el control de la erosión, son especialmente importantes para sostener la vida de más de 50 millones de pobladores andinos. En las últimas décadas, cambios rápidos e importantes en la cobertura forestal, a través de la deforestación y la forestación han modificado de manera considerable los servicios hidrológicos en los Andes.

Por otra parte, Bonnesoeur et al. (2019) hacen referencia que en Latinoamérica y en los Andes peruanos la forestación se define como el establecimiento de cobertura forestal en forma de plantaciones o mediante la regeneración natural en zonas que en el pasado tuvieron, o no, bosques. Los argumentos más comunes que han respaldado la forestación son para producir madera, detener y revertir la degradación del suelo, proteger la biodiversidad, y mejorar los servicios hidrológicos. Se incluye con frecuencia en portafolios de soluciones basadas en la naturaleza o iniciativas de infraestructura verde que recientemente están adquiriendo importancia en la gestión de cuencas y en la adaptación al cambio climático en América Latina.

Finalmente, Bonnesoeur et al. (2019) resaltan que la forestación se utiliza en suelos degradados (por ejemplo, erosionados, compactados, o aquellos en los que la materia orgánica se ha agotado) como un último recurso, cuando las zonas de cultivo o pastos ya no son productivas. Sin embargo, mejorar la productividad de la tierra se ha convertido en el enfoque principal de muchos proyectos de forestación, lo que ha dado lugar a una predilección por especies exóticas de crecimiento rápido (por ejemplo, eucaliptos o pinos). Los posibles

impactos negativos sobre los suelos y el agua se han ignorado en gran medida. Además, las especies exóticas de crecimiento rápido se han plantado también en herbazales naturales y adecuadamente conservados ubicados a gran altitud, frecuentemente creando conflictos debido a la reducción del suministro de agua.

2.2.3. Recursos Hídricos

Huerta (2020) define a los recursos hídricos como aquellos que proceden de las precipitaciones y que pueden estar circulando por los cauces en forma de recursos superficiales, infiltrados en el terreno formando acuíferos, y que constituyen los recursos subterráneos o almacenados en lagos, lagunas o embalses artificiales. El mismo concepto implica que proceden del régimen natural, es decir, que su valor y distribución temporal no han sido alterados por ningún tipo de explotación humana. De igual manera, el agua subterránea es un recurso hídrico natural, que corresponde a la parte de precipitación que se filtra a través del suelo hasta llegar al material rocoso que está saturado de agua. Dado que la distribución de la población, las condiciones climáticas e hidrológicas varían significativamente en el Perú, y por ende en todo el mundo, a menudo existe un desajuste entre la demanda y el suministro de agua. En este sentido, Xu y Wu (2017) mencionan que para cuantificar en qué medida el suministro de agua puede estar por debajo de las necesidades humanas y/o ambientales, se ha desarrollado un conjunto diverso de indicadores de disponibilidad de recursos hídricos en los recientes años. Las principales categorías de índices incluyen índices de hacinamiento de agua y diversas relaciones de demanda y oferta. Asimismo, menciona que en estudios más recientes se reconoció la necesidad de preservar el agua para los servicios del ecosistema.

Averyt et al. (2013) definen que la disponibilidad del recurso hídrico es la utilización del agua para un fin específico. Por ejemplo, para el riego, la generación de energía, abastecimiento de agua, entre otros. En tal sentido, la disponibilidad del recurso hídrico es una

función de la oferta y demanda relativa. Sin embargo, es sumamente complejo y difícil identificar un indicador genérico comúnmente aceptado de escasez o disponibilidad del recurso hídrico en la práctica. En este contexto, Xu y Wu (2017) definen que la “demanda” y “oferta” varían sustancialmente entre los estudios, lo que dificulta la comparación directa de los resultados entre estos. En forma práctica, la mayoría de los investigadores calcula la disponibilidad de los recursos hídricos usando el principio del balance hídrico. Por ejemplo, a través de modelos hidrológicos los cuales siguen un marco conceptual de captación, aunque dependiendo de la disponibilidad de datos, se puede asumir simplificaciones en las variables.

2.2.3.1. Balance Hídrico.

Arrueta (2009) define que el tema del ciclo del agua conduce a un planteamiento matemático: *el balance hídrico*. Si se considera la cuenca de un río como unidad hidrogeográfica y se examina también un periodo de tiempo, es factible estimar el agua que entra y sale en el ciclo a través de dicha superficie. El cálculo del balance hídrico es la estimación de entradas y salidas en un periodo de tiempo determinado. Las aportaciones de agua que se efectúan son las precipitaciones. Las pérdidas se deben esencialmente a la combinación de la evaporación y la transpiración de todos los organismos vivos, lo cual se designa bajo el termino de evapotranspiración. La infiltración se considera una puesta en reserva como agua subterránea. Además, se considera la demanda de agua que tienen los pobladores, para sus diferentes usos y las extracciones de agua potable para consumo. Las magnitudes de estas variables se evalúan en cantidad de agua por unidad de superficie (mm). Al ser estas magnitudes físicamente homogéneas, se pueden comparar calculando su diferencia. La ecuación general de balance hídrico es la siguiente:

$$\Delta A = P - ETR - Q - D$$

Donde:

ΔA : Cambio en almacenamiento (mm).

P : Precipitación incidente (mm).

ETR : Evapotranspiración real (mm).

Q : Escorrentía (mm).

D : Demanda de agua y extracciones.

Para poder estudiar y determinar en forma cuantitativa los procesos físicos que contribuyen a la formación y variación espacio – temporal del recurso hídrico en una determinada cuenca hidrográfica, se utiliza el balance hídrico, que es una formulación matemática de la interrelación y distribución espacial del agua en sus diferentes fases. El balance hídrico representa una de las herramientas de mayor uso en la práctica hidrológica para el estudio de la variación espacial y temporal de los elementos constitutivos del ciclo hidrológico; expresa la igualdad existente entre los aportes de agua que entran por un lado en una unidad hidrográfica determinada y la cantidad de agua evacuada por el otro, considerando además las variaciones internas en el almacenamiento de humedad ocurridas durante el período de tiempo determinado (IDEAM, 2014).

Así mismo, Jiménez et al. (2005) describen al balance hídrico como la cuantificación de los componentes del ciclo hidrológico en las cuencas hidrográficas o de cuerpos de agua subterráneos. Su propósito es determinar los principales flujos hídricos en las cuencas. El balance hídrico es la aplicación del principio de igualdad de masas con respecto al flujo de agua, en un determinado sistema, es decir en un espacio geográfico en el cual se examina el ciclo hidrológico, dado que el agua no puede ser creada ni destruida en dicho espacio; este balance puede ser expresado en los siguientes términos:

$$\text{Flujo de entrada} - \text{Flujo de salida} = \text{Relación de cambio de agua almacenada}$$

De acuerdo con Faustino (2012) la cuantificación del balance hídrico es normalmente complicada, pues la falta de medidas directas, la variación espacial de las variables (tales como precipitación, evapotranspiración, infiltración, etc.), las pérdidas profundas (a acuíferos) y las variaciones del agua almacenada son una limitación en este proceso, sin embargo, como respuesta a estas dificultades, de manera general se admiten dos premisas: la primera supone que las pérdidas profundas son despreciables (se considera que una cuenca es impermeable) y la segunda admite que las variaciones del agua almacenada en la cuenca hidrográfica son despreciables para un período normalmente largo.

De esta manera, una forma práctica de calcular el balance hídrico en una cuenca es considerar que el agua entra, se almacena y sale de la cuenca de acuerdo con la siguiente expresión matemática, la cual ha sido adaptada por el modelo hidrológico SWAT:

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

Donde:

SW_t : contenido final de agua en el suelo (mm)

SW_0 : contenido inicial de agua en el suelo diario (mm)

t : tiempo en días

R_{day} : precipitación diaria (mm)

Q_{surf} : escorrentía superficial diaria (mm)

E_a : evapotranspiración diaria (mm)

W_{seep} : cantidad de agua que se infiltra en el suelo diariamente (mm)

Q_{gw} : flujo de retorno diario (mm)

2.2.3.2. Importancia del Balance Hídrico.

Vargas et al. (2012) indican que la ecuación de los recursos hídricos de una cuenca requiere de una estimación correcta del balance hídrico, este indica los valores relativos de entrada y salida de flujo y la variación del volumen de agua almacenada en una determinada cuenca hidrográfica. Las entradas en la ecuación del balance hídrico comprenden la precipitación, en forma de lluvia o nieve, y las aguas superficiales y subterráneas. Las salidas incluyen la evaporación desde la superficie de la masa de agua, la evapotranspiración desde el suelo y la vegetación, y la de agua superficial y subterránea desde la cuenca. Cuando las entradas superan a las salidas el volumen de agua almacenada aumenta y cuando ocurre lo contrario disminuye.

Además, MAG y P (2011) indican que el balance hídrico es importante, llevando a realizar una cantidad importante de estos en todo el mundo sobre todo a nivel de latinoamericano, ya que permite conocer si las necesidades de la oferta y demanda de agua son satisfechas. Mediante el balance hídrico es posible saber la factibilidad de establecer un cultivo comparando sus requerimientos con la humedad disponible, examinar las relaciones entre las condiciones de humedad y el rendimiento de los cultivos, establecer las necesidades de riego para una región o una finca, comparar ambientes y usar el balance como base para clasificaciones climáticas, apoyar clasificaciones de suelo tomando en cuenta el régimen hídrico, estudiar las relaciones de precipitaciones y escorrentía y con ellos definir la implementación o no de las prácticas de conservación de suelo.

2.2.3.3. Ciclo Hidrológico.

Del Águila (2021) hace referencia que el ciclo hidrológico es el tema central de la hidrología, es un punto útil desde el cual comienza el estudio de la hidrología. El ciclo comprende una serie de procesos continuos e interdependientes de movimiento y transferencia

de agua en la tierra, océano, cuerpos de agua y atmosfera. El ciclo no tiene principio ni fin y se puede definir como el conjunto de trayectorias que describe el agua en la naturaleza, con independencia del estado en que se encuentre. De hecho, la hidrología abarca el estudio de cada uno de los componentes que constituyen el ciclo hidrológico de manera global y separada. El ciclo hidrológico permite definir entradas y salidas en la cuenca, de manera que puede determinarse un balance.

Así mismo, Del Águila (2021) enfatiza que el conocimiento pleno de todos los componentes del ciclo hidrológico es una tarea ardua que conlleva un estudio específico y cuasi experimental. Hoy en día no se conocen de forma precisa cuantitativamente todos los componentes del ciclo hidrológico a nivel mundial. Cerca del 96.5% del agua del planeta se encuentra en los océanos. Del resto, el 1.7% se encuentra en los hielos polares, el 1.7% en manantiales subterráneos y únicamente el 0.1 % en forma de agua superficial y atmosférica. A pesar de que el contenido de agua en los sistemas superficiales y atmosféricos es relativamente pequeño, inmensas cantidades de agua pasan a través de ellos anualmente.

Finalmente, Rui y Jiang (2010) hacen referencia que los fenómenos hidrológicos son el producto de interacciones entre procesos atmosféricos y las condiciones de la superficie terrestre. Las mismas distribuciones temporales y espaciales de la lluvia que cae sobre diferentes superficies de la cuenca generarán inundaciones, procesos y series temporales hidrológicas diferentes; distribuciones temporales y espaciales de lluvia caída sobre la misma superficie terrestre de la cuenca también generan diferentes procesos de avenidas y series cronológicas hidrológicas. Según el nivel actual de comprensión, las complejidades de los fenómenos hidrológicos tienen las siguientes características:

- **Primero**

Lo temporal y lo espacial: las variaciones de los fenómenos hidrológicos tienen características tanto determinísticas como no determinísticas, siendo esto último más obvio en muchos casos.

- **Segundo**

Las características determinísticas en el rendimiento de los fenómenos hidrológicos tienen rasgos periódicos y no periódicos. Este último consiste en causalidad y tendencia.

- **Tercero**

Los desempeños no determinísticos de los fenómenos hidrológicos pueden expresarse como aleatoriedad, características grises, borrosidad, mutabilidad, características del caos, etc. La aleatoriedad consiste en aleatoriedad pura, aleatoriedad estacionaria y aleatoriedad no estacionaria.

- **Cuarto**

Los fenómenos hidrológicos tienen amplios tramos espaciales y temporales. La variabilidad temporal y espacial es muy grande en muchos casos.

- **Quinto**

La no similitud de los fenómenos hidrológicos a diferentes escalas es muy grande.

- **Sexto**

En comparación con el fenómeno climático, los fenómenos hidrológicos son más sensibles a actividades humanas.

2.2.3.4. Componentes del Ciclo Hidrológico.

a. Precipitación

Para Villón (2004) la precipitación es la fuente primaria del agua de la superficie terrestres; sus mediciones y análisis forman el punto de partida de los estudios concernientes al uso y control del agua. Por otra parte, Tobón et al. (2009) describen que no toda el agua

precipitada llega a la superficie de forma directa, existe una parte de ella que es interceptada en su trayecto; esa intercepción la realizan las plantas, lo que se puede diferenciar dos términos, la precipitación incidente y la precipitación neta. A partir de este enunciado De Paula Lima (2008) conceptualiza que la precipitación incidente es la cantidad total de lluvia que es medida por encima de la copa de los árboles o un terreno abierto adyacentes al bosque o a las plantaciones. Mientras que la precipitación neta está compuesta por las gotas de agua que caen o drenan al suelo desde el follaje y las ramas o que se escurren a través de los troncos. La diferencia entre la precipitación neta con la precipitación incidente es conocida como intercepción de la precipitación.

- **Intercepción de la precipitación por la vegetación**

Como hacen referencia López et al. (2017) el estudio de las pérdidas de precipitación por intercepción tiene gran importancia en el balance hídrico de las cuencas, en especial cuando las precipitaciones son escasas e irregulares y cuando parte del porcentaje interceptado es evaporado. Por otra parte, Frasson y Krajewski (2013) argumentan que la cantidad y dinámica del proceso de interceptación depende de las características y estructura de la vegetación, y de algunas particularidades de la lluvia, entre ellas: intensidad, duración, forma, dirección, ángulo y distribución del tamaño de la gota; así como de otras variables meteorológicas: como son la temperatura y la velocidad del viento. Finalmente, López et al. (2017) concluyen que la interceptación de lluvia por la vegetación es el proceso por el cual un cierto porcentaje de agua de lluvia es retenido por una superficie de manera transitoria. Cuando la superficie es la vegetación, esta puede acumular temporalmente el agua en las hojas, ramas o tronco de unos individuos vegetales y parte de ella luego es evaporada a la atmosfera. La capacidad máxima que puede almacenar una hoja oscila entre 1 y 2 l/m². La interceptación coincide con la precipitación si las lluvias son pequeñas y constituye aproximadamente el 10% de este si son mucho mayores que esa cantidad.

Hernández (1980) señala que si la lluvia continua, cesa la interceptación y el agua inicia a caer con la misma velocidad e intensidad que fuera del bosque. El tiempo necesario para producir la saturación de la capacidad de almacenamiento se retrasa si existe una tasa de alta evaporación. El volumen máximo de agua que puede ser retenido por el follaje, ya sea de uno solo o varios estratos se conoce con el nombre de capacidad de almacenamiento por interceptación y generalmente se expresa en milímetros. Así mismo hace referencia que, la precipitación directa resulta de suma importancia para los ecosistemas forestales representando entre un 70 a 90% de la entrada de agua, tiene un impacto directo sobre la escorrentía. Además, ha demostrado tener un impacto sobre los procesos erosivos en los ecosistemas y tiene un papel importante en el aporte de nitrógeno nuevo a los ecosistemas. La escorrentía cortical por otra parte tiene un impacto directo sobre el proceso de infiltración mediante el uso de las raíces de las plantas como vías de flujo preferencial del agua y nutrientes de la superficie al subsuelo. Finalmente recalca que en zonas áridas y semiáridas se ha documentado el enriquecimiento del suelo (efecto de isla de fertilidad) debajo de arbustos debido a la escorrentía cortical. Respecto a la pérdida por interceptación, está directamente relacionada con el proceso de evaporación. Dentro del ciclo del agua, la evaporación es el principal proceso de retorno del agua de la superficie terrestre a la atmósfera. A mayor interceptación mayor evaporación, a mayor evaporación más vapor de agua en el ambiente y a mayor cantidad de vapor de agua en el ambiente, aumenta la probabilidad de lluvia. Además de los cambios de la estructura de la vegetación, asociados a la precipitación, esta estructura también se ve afectada por alteraciones humanas como el aclareo (eliminación de árboles o plantas en un terreno), cambio de uso del suelo o por distintos desastres naturales, siendo las alteraciones humanas las que presenta un impacto más negativo sobre la partición de la precipitación.

b. Esgurrimiento

Villón (2002) define al esgurrimiento como el agua proveniente de la precipitación, que circula sobre o bajo la superficie terrestre, y que llega a una corriente para finalmente ser drenada hasta la salida de la cuenca (estación de aforo). Analizando de forma esquemática a la superficie terrestre, Villón (2002) determinó que la precipitación cuando llega a la superficie se comporta de la siguiente manera:

- Una parte de la precipitación se infiltra
- Una parte de esta satisface la humedad del suelo, de las capas que se encuentran sobre el nivel freático del agua. Una vez que estas capas se han saturado, el agua subterránea es recargada por la parte restante que se infiltra.
- Otra parte de la precipitación tiende a escurrir sobre la superficie terrestre; a la precipitación que ocasiona este esgurrimiento, se llama altura de precipitación en exceso.
- Una pequeña proporción se pierde.

Como base a lo anterior, el esgurrimiento se clasifica en tres tipos:

- **Esgurrimiento superficial**

Es aquel que proviene de la precipitación no infiltrada y que escurre sobre la superficie del suelo. El efecto sobre el esgurrimiento total es inmediato, y existirá durante la tormenta e inmediatamente después de que esta termine. La parte de la precipitación total que da lugar a este esgurrimiento, se denomina precipitación en exceso (Villón, 2002).

- **Esgurrimiento subsuperficial**

Es aquel que proviene de una parte de la precipitación infiltrada. El efecto sobre el esgurrimiento total puede ser inmediato o retardado. Si es inmediato se le da el mismo

tratamiento que al escurrimiento superficial, en caso contrario, como escurrimiento subterráneo (Villón 2002).

- **Escorrentía directa**

Es la que llega a los cauces superficiales en un periodo de tiempo corto, tras la precipitación, y que normalmente engloba la escorrentía superficial y la escorrentía subsuperficial. Son imposibles de distinguir: una gran parte de lo que parece escorrentía superficial (por el aumento de los caudales que sigue a las precipitaciones) ha estado infiltrada subsuperficialmente (Sánchez, 2004).

- **Escorrentía básica**

Es aquella escorrentía que alimenta los cauces superficiales en los estiajes, durante los periodos sin precipitaciones (Sánchez, 2004).

- **El proceso de escorrentía en cuencas: coeficiente de escorrentía**

Monsalve (2008) establece que la escorrentía superficial provocada por una lluvia (E_s) puede ser comparada con la precipitación caída (P). Al cociente entre ambos valores se le denomina coeficiente de escorrentía (C).

$$C = \frac{E_s}{P}$$

El coeficiente de escorrentía depende de numerosos factores: tipo de precipitación (lluvia, nieve o granizo), de su cantidad, de su intensidad y distribución en el tiempo; de la humedad inicial del suelo; del tipo de terreno (granulometría, textura, estructura, materia orgánica, grado de compactación, pendiente, microrrelieve, rugosidad), del tipo de cobertura existente; de la intercepción, de la escala temporal (minutos, duración del aguacero, horas, días,

meses, año). El coeficiente de escorrentía puede tomar valores comprendidos entre cero y uno ($0 \leq C \leq 1$).

En el caso de la lluvia, su intensidad resulta fundamente en el proceso de producción de escorrentía superficial. En el caso del granizo y la nieve, el proceso es regulado por la velocidad de fusión. El tipo de suelo influye notablemente en C . Las propiedades físicas del suelo que explican mejor la formación de escorrentía superficial durante la lluvia son la capacidad de infiltración y la conductividad hidráulica.

Así mismo Monsalve (2008) citando a Martínez de Azagra y Navarro (1996) acerca del coeficiente de escorrentía instantáneo $C(t)$ expresan de la siguiente manera:

$$C(t) = \frac{i(t) - f(t)}{i(t)}$$

Donde:

$i(t)$ = es la intensidad de lluvia en el instante

t y $f(t)$ = es la tasa de infiltración en el instante t .

La humedad inicial del suelo y su evolución a lo largo de la lluvia influyen grandemente, lo cual se visualiza en la tendencia decreciente de la tasa de infiltración hasta alcanzar un valor asintótico que se relaciona con la conductividad hidráulica del suelo.

En los primeros minutos de un evento de lluvia, la interceptación altera la intensidad, por tanto, si se desea hacer intervenir en la definición del coeficiente de escorrentía instantáneo, se tendrá:

$$C(t) = \frac{i(t) - i_t(t) - f(t)}{i(t)}$$

Donde:

$i_t(t)$ = es la interceptación instantánea.

La interceptación instantánea decrece hasta hacerse muy reducida en lluvias muy largas e intensas. El coeficiente de escorrentía es nulo desde el comienzo de la lluvia hasta que se alcanza el tiempo de encharcamiento. Sus máximos instantáneos se corresponden con los momentos de máxima intensidad de lluvia y con las partes finales de la lluvia (en las que el suelo muestra la menor tasa de infiltración al estar muy húmedo).

$$C_m(t) = \int_0^t C(t) \cdot dt = \int_0^t \frac{i(t) - i_t(t) - f(t)}{i(t)} \cdot dt$$

Representa el coeficiente de escorrentía medio desde el comienzo de la tormenta ($t = 0$) hasta un instante dado t . Para una tormenta de intensidad constante va en aumento según transcurre el tiempo, tomando el valor máximo al final del episodio de lluvia. El comportamiento del coeficiente de escorrentía medio para lluvias intensas (en los que $i(t) \neq \text{cte.}$) suele ser similar. A su vez, dicho coeficiente toma valores tanto mayores cuanto mayor sea la tormenta (es decir, cuanto mayor sea su período de retorno).

c. Evapotranspiración

Hansen et al. (1980) consideran que «la evapotranspiración se define como la cantidad de agua que regresa a la atmósfera por evaporación directa del agua en el suelo, lagos, lagunas, canales, reservorios o aguas estancadas y por la transpiración de las plantas. Allen et al. (1998) a su vez, determinan que la evapotranspiración está en función de la temperatura, radiación solar, radiación atmosférica, humedad del aire y velocidad del viento.

Mora y Valverde (2005) definen a la evapotranspiración como el resultado del proceso en donde el agua cambia de estado líquido a gaseoso directamente (evaporación) y a través de la actividad metabólica de las plantas y animales (transpiración). Esta humedad es transferida de regreso a la atmosfera en forma de vapor. Es pues la suma de la evaporación y de la transpiración y es mayor cuanto más densa sea la cobertura de vegetación por unidad de área.

- **Evaporación**

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], (1996) indica que es el proceso por el cual el agua líquida se convierte en vapor de agua (vaporización) y se retira de la superficie evaporante (remoción de vapor). El agua se evapora de una variedad de superficies, tales como lagos, ríos, caminos, suelos y la vegetación mojada. Para el cambio de estado de las moléculas del agua de líquido a vapor se requiere energía. La radiación solar directa y la temperatura ambiente del aire proporcionan dicha energía. La fuerza impulsora para retirar el vapor de agua de una superficie evaporante es la diferencia entre la presión del vapor de agua en la superficie evaporante y la presión de vapor de agua de la atmósfera circundante. A medida que ocurre la evaporación, el aire circundante se satura gradualmente y el proceso se vuelve cada vez más lento hasta detenerse completamente si el aire mojado circundante no se transfiere a la atmósfera. El reemplazo del aire saturado por un aire más seco depende mucho de la velocidad del viento. Por lo tanto, la radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y la velocidad del viento son parámetros climatológicos para considerar al evaluar el proceso de la evaporación.

- **Transpiración**

Así mismo, la FAO (1996), señala que consiste en la vaporización del agua líquida contenida en los tejidos de la planta y su posterior remoción hacia la atmósfera. Los cultivos pierden agua predominantemente a través de las estomas que son pequeñas aberturas en la hoja

de la planta a través de las cuales atraviesan los gases y el vapor de agua de la planta hacia la atmósfera. La vaporización ocurre dentro de la hoja, en los espacios intercelulares, y el intercambio del vapor con la atmósfera es controlado por la abertura estomática. Casi toda el agua absorbida del suelo se pierde por transpiración y solamente una pequeña fracción se convierte en parte de los tejidos vegetales. La transpiración, depende del aporte de energía, del gradiente de presión del vapor y de la velocidad del viento. Por lo tanto, la radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y el viento también deben ser considerados en su determinación. El contenido de agua del suelo y la capacidad del suelo de conducir el agua a las raíces también determinan la tasa de transpiración, así como la salinidad del suelo y del agua de riego. La tasa de transpiración también es influenciada por las características del cultivo, el medio donde se produce y las prácticas de cultivo. Diversas clases de plantas pueden tener diversas tasas de transpiración. Por otra parte, no solamente el tipo de cultivo, sino también su estado de desarrollo, el medio donde se produce y su manejo, deben ser considerados al evaluar la transpiración.

d. Infiltración

Castañeda y Barros (1994) determinan que la infiltración es el flujo de agua que transita desde el suelo hacia las zonas no saturada y saturada. La capacidad de infiltración está en función al flujo de agua por unidad de tiempo y de área total. Los factores que afectan a la infiltración son el tipo de cubierta vegetal, características hidráulicas del suelo, estado de humedad del suelo, intensidad de la lluvia o cantidad de agua de riego y trabajos agrícolas en el suelo.

Según Campos (1998) la infiltración es la parte de la precipitación que penetra bajo la superficie del terreno y va rellorando los poros y fisuras de tal medio poroso a través de la interfase suelo – atmósfera.

Huamán (2016) señala que en el proceso de infiltración se pueden distinguir tres fases:

- **Intercambio**

Se presenta en la parte superior del suelo, donde el agua puede retornar a la atmósfera por medio de la evaporación debido al movimiento capilar o por medio de la transpiración de las plantas.

- **Transmisión**

Ocurre cuando la acción de la gravedad supera a la de la capilaridad y obliga al agua a deslizarse verticalmente hasta encontrar una capa impermeable.

- **Circulación**

Se presenta cuando el agua se acumula en el subsuelo debido a la presencia de una capa impermeable y empieza a circular por la acción de la gravedad, obedeciendo las leyes del escurrimiento subterráneo.

Xu et al. (2012) manifiestan que el conocimiento de las propiedades hidráulicas del suelo (conductividad hidráulica saturada y parámetros de retención) es esencial para resolver un conjunto de problemas, como predicción de escurrimientos de eventos de precipitación, transporte de sedimentos y control de inundaciones y para el modelado de procesos hidrológicos y su relación con el transporte de contaminantes. Entre las propiedades físicas que repercuten en la infiltración se encuentran la textura, estructura, densidad aparente, la porosidad y el contenido de humedad del suelo. Otros factores también influyen la tasa de infiltración potencial afectándola, como por ejemplo las características de la superficie, proporción de suelo cubierto por vegetación, propiedades hidrodinámicas del suelo, tales como la conductividad hidráulica saturada (K), la relación conductividad hidráulica – humedad del suelo, la curva de retención hídrica, y el contenido de agua del suelo al comienzo del evento de

precipitación. Así mismo las prácticas de manejo también afectan al proceso de infiltración. Un suelo que es continuamente labrado, pisoteado o sometidos a otras actividades antropogénicas desarrollan una pobre estructura conduciendo al sellado superficial de poros y encostramiento, restringiendo el movimiento del agua e incrementando el escurrimiento superficial.

e. Percolación

Para Ruiz y Martínez (2018) la percolación se refiere al paso lento de fluidos a través de los materiales porosos, es el movimiento del agua dentro del suelo. La percolación es la transferencia de agua hacia estratos más profundos desde los cuales la vegetación no puede extraer agua. La percolación profunda eventualmente llega al nivel freático aumentando el volumen del agua subterránea. En los balances hídricos diarios, la percolación profunda se considera como aquella cantidad de agua que está por encima de la capacidad de campo.

Siertem UEM (s.f) citado por Del Águila (2024) conceptualizan que la percolación es la entrada del agua dentro de la capa más baja de la superficie o de la capa del subsuelo. La velocidad a la cual puede moverse el agua hacia abajo, a través de la capa, se llama la capacidad de percolación del suelo. Esta capacidad se considera independiente de la infiltración y del almacenamiento del agua en el suelo, y su velocidad depende de la porosidad no capilar de la capa del subsuelo. La capacidad de percolación de un suelo queda limitada por la última capa permeable, con la que se pone en contacto el agua que se mueve hacia abajo, sin embargo, la materia orgánica, el desarrollo de la raíz y la perforación por las lombrices aumenta la capacidad de percolación.

f. Flujo lateral

Proaño et al. (2006) definen que el flujo lateral es el agua que se mueve por debajo de la superficie del suelo y sobre el nivel de los acuíferos, la cual fluye subsuperficialmente y

alimenta los canales de drenaje, ríos, lagos. El flujo subsuperficial lateral es calculado simultáneamente con la percolación para el perfil del suelo entre (0 – 2 m) mediante un modelo de almacenamiento cinético, que usa la ecuación de la masa con el perfil entero del suelo como el volumen de control. Por otra parte, Fernández (2017) explica también que el flujo lateral o inter flujo subterráneo lateral, es una contribución de la corriente de flujo que se origina debajo de la superficie, pero por encima de la zona donde el suelo está saturado con agua. El flujo subterráneo lateral en el perfil de suelo (0 – 2m) se calcula simultáneamente con redistribución. Un modelo cinemático del almacenamiento se utiliza para predecir el flujo lateral en cada capa de suelo.

g. Flujo subterráneo

Carrillo et al. (2007) hacen referencia que el agua que se infiltra en la superficie terrestre es almacenada en las rocas del subsuelo y transmitida a través de ellas por medio de porosidades, cavidades y estructuras, desde la zona de recarga hacia la de descarga, debido principalmente a la fuerza de gravedad, con velocidades desde centímetros a decenas de metros por año. Así mismo Tóth (2000) indica que los parámetros de un flujo de agua subterránea están controlados por tres elementos; (i) Topografía: influye sobre el movimiento del agua y su distribución espacial, y los contornos del sistema de flujo. (ii) Estratigrafía: determina zonas de circulación del agua, el volumen y la evolución geoquímica del agua. (iii) Clima: condiciona la cantidad y distribución de suministro de agua a cada zona que alimentan los flujos subterráneos.

Carrillo y Ouyse (2013) determinan que la teoría de los Sistemas de Flujo de agua subterránea proporciona evidencias hidrológicas que demuestran la interrelación del agua subterránea con el resto de los componentes del ambiente (ejemplo: rocas, suelo, vegetación,

etc.), presentando luego fundamentos químicos, isotópicos, de vegetación y suelo, para probar la conexión hidráulica subterránea entre cuencas superficiales adyacentes.

La teoría de los sistemas de flujo de agua subterránea considera la existencia de tres tipos de flujo de agua subterránea: local, intermedio y regional. Cada sistema de flujo tiene su propia zona de recarga, circulación y descarga; viajan a través de trayectos específicos, con distintas longitudes y profundidades de circulación, generalmente por diferentes unidades geológicas Carrillo y Cardona (2012). Por tanto, cada sistema presenta diferente composición química e isotópica, edad y propiedades fisicoquímicas, determinados por el tiempo y condiciones de interacción entre el agua y el medio geológico. Los sistemas de flujo local se caracterizan por una trayectoria corta y somera. Los flujos intermedios alcanzan una trayectoria y profundidad mayor, pero descargan dentro de la misma cuenca donde se originaron. En cambio, los flujos regionales se originan en la parte más alta de la cuenca o divisoria de aguas, y descargan en la parte más baja de la cuenca o incluso fuera de ella, recorriendo trayectos de mayor longitud y a mayor profundidad.

2.2.3.5. Cuenca Hidrográfica.

Guevara (2015) determina a la cuenca hidrográfica como un espacio definido por la naturaleza, con base en la divisora de las aguas y la escorrentía superficial. En la práctica, las zonas más altas y los cerros que circundan un río definen la cuenca hidrográfica; allí se ubican los recursos naturales, las ciudades, las actividades humanas, la infraestructura y servicios de las poblaciones. Además, Villón (2002) hace referencia que la cuenca de drenaje de una corriente es el área de terreno donde todas las aguas caídas por precipitación se unen para formar un solo curso de agua. Cada curso de agua tiene una cuenca bien definida para cada punto de su recorrido.

Por otra parte, Cotler (2010) hace referencia que la cuenca hidrográfica, es el área delimitada por la dirección de sus cursos de agua y su superficie se definen por el parteaguas a partir del cual la precipitación drena por esa sección, siendo las cuencas, espacios socio – geográficos donde las personas y sus organizaciones comparten el territorio, sus identidades, tradiciones y culturas, socializan y trabajan en función de la disponibilidad de los recursos naturales.

Finalmente, para el Programa de Manejo Forestal Sostenible en la Región Andina (2012) establece que la cuenca hidrográfica es vista como una unidad de planificación, negociación y extensión de acuerdos, porque el agua es uno de los recursos que actualmente provoca mayor preocupación en la sociedad. Se puede decir que la disponibilidad de agua es escasa debido a la contaminación y a la deforestación, esto significa que las cuencas pierden su capacidad de retención, que es el principio clave en el manejo de una cuenca hidrográfica.

- ***Características morfométricas de una cuenca hidrográfica***

Gaspari et al. (2013) hacen referencia que las características morfométricas de una cuenca hidrográfica proporcionan una descripción física – espacial que permite realizar comparaciones entre distintas cuencas hidrográficas. Al mismo tiempo, ofrecen conclusiones preliminares sobre las características ambientales del territorio a partir de la descripción precisa de la geometría de las formas superficiales. La morfometría particular de cada cuenca hidrográfica es proporcional con la posibilidad de cosecha hídrica, ante eventos climáticos, y con la generación de una respuesta a los mismos, como ser la escorrentía superficial, expresada en términos de caudales, la incidencia en el transporte de sedimentos y nutrientes, a lo largo de los ecosistemas que la integran. En la actualidad, herramientas metodológicas tales como los sistemas de Información Geográfica (SIG) y la interpretación de imágenes satelitales, permiten realizar la caracterización espacio temporal de las propiedades morfométricas de las cuencas

hídricas y de las redes de drenaje. De igual manera Gaspari et al. (2012) determinan que el análisis de las características morfométricas y funcionales de una cuenca hidrográfica a través de parámetros de forma, relieve, y red de drenaje, es básico en la modelación hidrológica para determinar el movimiento y captación del agua proveniente de precipitaciones.

a. Parámetros generales

– Área (A) en kilómetros cuadrados

El área de la cuenca es probablemente la característica morfométrica e hidrológica más importante. Está definida por la divisoria de aguas, que permite definir el tamaño, expresado en km² (Reyes et al., 2010).

Tabla 1

Clasificación de áreas

Área (km²)	Nombre
< 5	Unidad
5 - 20	Sector
20 - 100	Microcuenca
100 - 300	Subcuenca
> 300	Cuenca

Fuente: Reyes et al. (2010).

– Perímetro (P) en kilómetros

Es la longitud de la divisoria topográfica. Se mide a partir del punto de salida de la cuenca o punto de interés del cauce (Ricca y Robles, 2014).

– Longitud del cauce principal (L) en metros

Es la longitud del río desde el punto más distante de la cuenca hasta la desembocadura (Gaspari et al., 2012)

– **Longitud Axial (La) en kilómetros**

Es la distancia entre los extremos de una cuenca, desde la parte más alta hasta la parte más baja o desembocadura, medición en línea recta (Tacusi y Hacha, 2015)

– **Ancho de la Cuenca (W)**

El ancho se define como la relación entre el área (A) y la longitud axial de la cuenca (La) (Tacusi y Hacha, 2015), es calculada con la siguiente ecuación:

$$W = \frac{A}{L_a}$$

Donde:

A = superficie de la cuenca (km²).

L_a = longitud de la cuenca

– **Desnivel Altitudinal (DA)**

Es el valor de la diferencia entre la cota más alta y la más baja de la cuenca (Carvallo y Delgado, 2013).

$$DA = HM - Hm$$

Donde:

HM = cota máxima (msnm)

Hm = cota mínima (msnm)

b. Parámetros de forma

Chester et al. (2017) hacen referencia que la forma de la cuenca es determinante para entender su comportamiento hidrológico. Cuencas con la misma área, pero de diferentes formas presentan respuestas hidrológicas e hidrogramas diferentes. Los principales parámetros de forma tomados en cuenta son:

– Coeficiente de Compacidad o Gravelius (K_c)

Define la forma y la superficie que abarca la cuenca, teniendo influencia sobre la escorrentía directa y, por tanto, en la marcha y geometría del hidrograma resultante de una precipitación (Flores 2011 y Ortiz, 2016). Este parámetro es adimensional y relaciona el perímetro de la cuenca con el perímetro de un círculo teórico de área equivalente al de la cuenca (Camino et al., 2018).

Se calcula con la siguiente ecuación:

$$K_c = \frac{P}{\sqrt[2]{\pi A}}$$

Donde:

K_c = índice de Gravelius (adimensional).

P = perímetro de la cuenca en (km.).

A = área de la cuenca (km²).

Tabla 2

Clasificación del Coeficiente de Compacidad o Gravelius

Kc	Clasificación	Interpretación ambiental
1 a 1.25	Casi redonda a oval - redonda	Alta tendencia a inundaciones
1.25 a 1.5	Oval redonda a oval - alargada	Mediana tendencia a inundaciones
1.5 a 1.75	Oval alargada a alargada	Baja tendencia a inundación
> 1.75	Alargada	Cuenca propensa a la conservación

Fuente: Cerignoni y Rodríguez (2015).

Este coeficiente está relacionado con el tiempo de concentración, que es el tiempo que tarda una gota de lluvia en moverse desde la parte más lejana de la cuenca hasta el desagüe; en este momento ocurre la máxima concentración de agua en el cauce, puesto que está llegando gotas de lluvia de todos los puntos de la cuenca.

A medida que el coeficiente (K_c) tiende a 1,0, sea cuando la cuenca tiende a ser redonda, aumenta la peligrosidad de la cuenca a las crecidas, porque las distancias relativas de los puntos de la divisoria con respecto a uno central, no presentan diferencias, mayores y el tiempo de concentración se hace menor, por lo tanto, mayor será la posibilidad de que las ondas de crecida sean continuas (Vásquez 2000).

– Factor de Forma de Horton (R_f)

El factor de forma de Horton relaciona el área de la cuenca (A), y el cuadrado de la longitud máxima o longitud axial de la misma (La) (Ramírez et al., 2015).

$$R_f = \frac{A}{La^2}$$

Donde:

R_f = factor de forma de Horton (adimensional).

A = área de la cuenca (km^2).

La = longitud axial de la cuenca (km)

Tabla 3

Relación Forma de la Cuenca según Horton

Rango de valores	Forma de la cuenca
< 0.22	Muy Alargada
0.22 – 0.30	Alargada
0.30 – 0.37	Ligeramente alargada
0.37 – 0.45	Ni alargada ni ensanchada
0.45 – 0.60	Ligeramente ensanchada
0.60 – 0.80	Ensanchada
0.80 – 1.12	Muy Ensanchada
> 1.20	Rodeando el desagüe

Fuente: Chester et al. (2017).

– Índice de Alargamiento (I_a)

Este índice, propuesto por Horton, relaciona la longitud máxima de la cuenca con su ancho máximo medio que es perpendicular a la dimensión anterior (Baldeon, 2016; Cañibano et al., 2016).

$$I_a = \frac{L_a}{W}$$

Donde:

I_a = índice de alargamiento (adimensional).

W = ancho de la cuenca (km).

L_a = longitud axial de la cuenca (km).

Tabla 4

Clasificación del Índice de Alargamiento

Rangos de Índice de alargamiento	Clases de alargamiento
0 – 1.4	Poco alargada
1.5 – 2.8	Moderadamente alargada
> 2.9	Muy alargada

Fuente: Cañibano et al. (2016).

– Razón de Elongación (R_e)

Es la relación entre el diámetro (D) de un círculo que tenga la misma superficie de la cuenca y la longitud máxima (L_m) de la cuenca. La variable L_m se define como la más grande dimensión de la cuenca a lo largo de una línea recta trazada desde la desembocadura del cauce principal, hasta el límite extremo del parte aguas y de manera paralela al río principal (Schumm, 1956).

$$R_e = \frac{(1.128)(\sqrt{A})}{L_c}$$

Donde:

R_e = razón de elongación (adimensional).

L_c = longitud del cauce principal de la cuenca (km).

A = Área de la cuenca (km²).

c. Parámetros de relieve

Los parámetros de relieve son de gran importancia puesto que tienen más influencia que los parámetros de forma sobre la respuesta hidrológica; con carácter general podemos decir que a mayor relieve o pendiente la generación de escorrentía se produce en lapsos de tiempo menores (Ibáñez et al., 2010).

– Pendiente media del Cauce (j) en porcentaje

La pendiente media del cauce se obtiene a partir del desnivel topográfico que se presenta sobre el cauce principal y la longitud del mismo. Se expresa en porcentaje. Al aumentar la pendiente aumenta la velocidad del agua por la red hidrográfica, lo que hace que la cuenca sea más susceptible a procesos erosivos y al arrastre de materiales (Ramírez, 2015).

$$j = \frac{DA}{L}$$

Donde:

DA = desnivel altitudinal (km).

L = longitud del cauce (km).

Tabla 5

Clases de pendiente del cauce (%)

Rangos de pendiente	Clases
< 10	Poco alargada
1.5 – 2.8	Moderadamente alargada
> 2.9	Muy alargada

Fuente: Baldeón (2016).

– Pendiente media de la cuenca (J) en porcentaje

Es uno de los principales parámetros que caracteriza al relieve de una cuenca hidrográfica, tiene relación con la infiltración, el escurrimiento superficial, la humedad del suelo y la contribución del agua subterránea al flujo en los cauces (Tipán, 2018).

Salvatierra (2006) hace referencia que la pendiente media de la cuenca se puede determinar con el método de Alvord, que utiliza la siguiente ecuación:

$$J = 100 \frac{\sum Li * E}{A}$$

Donde:

J = pendiente media de la cuenca (%).

Li = longitud de cada una de las curvas de nivel, en km.

E = equidistancia de las curvas de nivel (km).

A = área de la cuenca (km²)

Tabla 6

Clasificación del relieve de una cuenca de acuerdo a su pendiente

Rangos de pendiente	Descripción
0 – 4	Nula o casi a Nivel
4 – 8	Ligeramente inclinada
8 – 15	Ligeramente inclinada a moderadamente empinada
15 – 25	Moderadamente empinada
25 – 50	Empinada
50 – 75	Muy empinada
> 75	Extremadamente empinada

Fuente: Alcántara (2008).

– Curva Hipsométrica

Representa gráficamente la variación de altitud que se presenta en una cuenca y se obtiene a partir de un plano topográfico, tomando los valores del área en porcentaje que están por debajo de una determinada altura (Zabala, 2016).

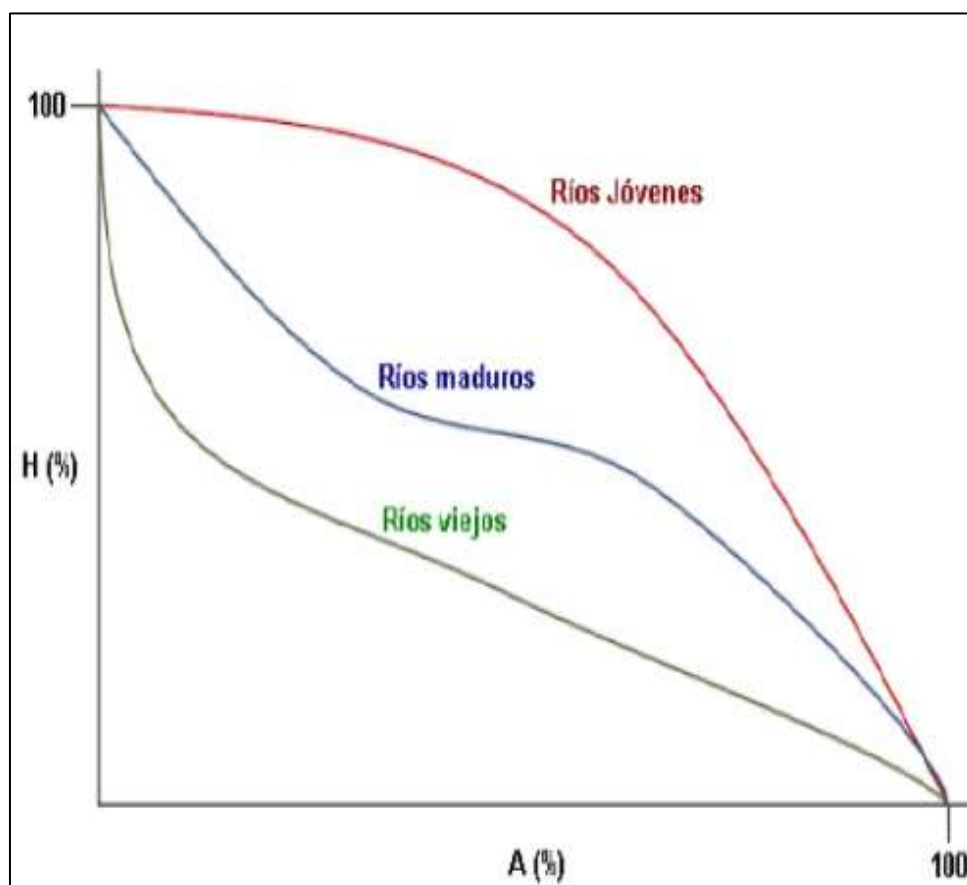
Cuencas con ríos jóvenes: presentan gran potencial erosivo.

Cuencas con ríos maduros: se encuentran en estado de equilibrio.

Cuencas con ríos viejos: son sedimentarias

Figura 1

Tipo de curva hipsométrica de una cuenca hidrográfica.



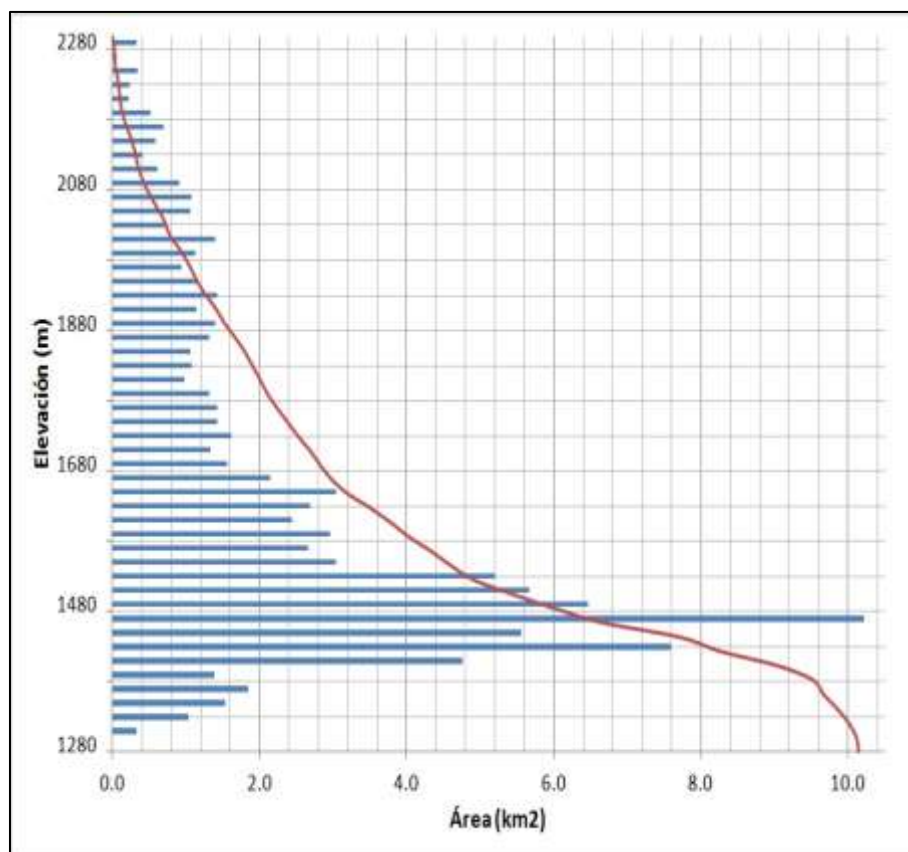
Nota. La figura muestra la clasificación de los ríos de acuerdo a la curva hipsométrica. Fuente: Aguilar y Naranjo (2018).

– Histograma de frecuencias altimétricas

Es la representación de la superficie, en km^2 o en porcentaje, comprendida entre los niveles, siendo la marca de clase el promedio de las alturas. De esta forma, con diferentes niveles se puede formar el histograma. Este diagrama de barras contiene la misma información de la curva hipsométrica, pero con una representación diferente, obteniendo una idea de la variación altitudinal en una cuenca (Camones, 2018).

Figura 2

Histograma de frecuencias altimétrica de una cuenca hidrográfica.



Nota. La figura muestra de manera referencial la frecuencia altimétrica de una determinada cuenca. Fuente: Chester et al. (2017).

– Coeficiente de Masividad (Km)

Este coeficiente representa la relación entre la elevación media de la cuenca expresada en metros y su superficie, dada en kilómetros cuadrados (Clavijo y Pérez, 2016).

$$K_m = \frac{\text{Altura media de la cuenca (m)}}{\text{Area de la cuenca (km}^2\text{)}}$$

Tabla 7

Clasificación de valores de masividad

Rangos de pendiente	Descripción
0 – 35	Muy montañosa
35 – 70	Montañosa
70 – 105	Moderadamente montañosa

Fuente: Clavijo y Pérez (2016).

d. Caracterización de la red de drenaje

Estos parámetros representan el sistema de jerarquía de los cauces, que va desde los pequeños surcos hasta los ríos, que al confluir unos con otros se forma un colector principal de toda la cuenca (Demetrio, 2016).

– Densidad de Drenaje

Según Ricce y Robles (2014) la densidad de drenaje permite tener un mejor conocimiento de la complejidad y desarrollo del sistema hidrográfico. En general, un valor mayor de la densidad de drenaje refleja una mayor estructuración de la red fluvial, o bien que existe mayor potencial de erosión. Consiste en relacionar la suma de las longitudes de todos los cursos de agua que drenan en la cuenca con respecto al área total de la misma (Cruz et al., 2015).

$$D_d = \frac{L}{A}$$

Donde:

$L = \sum$ Longitud de las corrientes efímeras, intermitentes y perennes de la cuenca en km.

A = área de la cuenca (km²).

Tabla 8

Factores de densidad de drenaje de cuencas según Strahler / Horton.

Densidad de drenaje (km/km ²)	Categoría	Interpretación ambiental
< 1	Baja	Baja la escorrentía y aumenta la infiltración
1 – 2	Moderada	Tendencia media de escorrentía
2 – 3	Alta	Alta tendencia a fluir y a las inundaciones
> 3	Muy Alta	Alta tendencia a la escorrentía, y a la erosión

Fuente: Cerignoni y Rodríguez (2015).

– Perfil longitudinal del Río

El perfil longitudinal de un río está conformado por la línea obtenida a partir de diferentes alturas desde su nacimiento hasta su punto de salida. Los ríos en equilibrio tienen una forma cóncava de modo que las pendientes del lecho disminuyen conforme aumenta la distancia medida a partir de la divisoria (Báez, 2018).

– Orden de la red hídrica

Este índice refleja el grado de ramificación o bifurcación de la cuenca, en el cual se maneja el orden de las corrientes (Ramírez et al., 2015). Donde mayor sea el número de orden,

será mayor el potencial erosivo, mayor el transporte de sedimentos y por tanto mayor también la escorrentía directa que otra cuenca de igual área, también se puede determinar que cuanto más alto es el orden de la cuenca mayor es su grado de desarrollo fluvial (Demetrio, 2016).

Tabla 9

Tipo de orden de corriente

Rangos de ordenes	Tipo
1 – 2	Bajo
2.1 – 4	Medio
4.1 – 6	Alto

Fuente: Rizo et al. (2011).

La metodología de Strahler (1952) consiste en dividir la red hídrica en segmentos de cauces de diverso orden, en función al número del orden que presenten. Se entiende que un segmento de cauce es de primer orden cuando es uno de los extremos de la red que no recibe tributarios, es decir, discurren desde una fuente o naciente hasta la confluencia con otro. Los de segundo orden se forman cuando confluyen dos de primer orden, los de tercero por la confluencia de dos de segundo, y así sucesivamente. Si confluyen dos ríos de órdenes distintos, el orden del cauce resultante será el valor del río de mayor orden (Raya et al., 2016).

– **Tiempo de concentración (Tc)**

El Tiempo de concentración, se define como el tiempo mínimo necesario para que todo el sistema (todos los puntos de la cuenca) esté aportando agua de escorrentía (agua que cae y se transporta por el lecho del río) de forma simultánea al punto de salida, punto de desagüe o punto de cierre (Ospina y Mancipe, 2016). Está determinado por el tiempo que tarda una gota de agua que cae en el punto hidrológicamente más lejano de la cuenca hasta que llegue al punto de salida de la misma (Botero y Vélez, 2010).

Existen varias ecuaciones que permiten determinar el tiempo de concentración (T_c) de una cuenca, las fórmulas utilizadas para el cálculo son las siguientes:

Kiripich

$$T_c = 0.06628 \left(\frac{L}{S^{0.5}} \right)^{0.77}$$

Donde:

T_c = tiempo de concentración (min).

L = longitud del cauce principal (km).

S = pendiente entre las elevaciones máximas y mínimas (pendiente total) del cauce principal de la cuenca en m/m.

Témez

$$T_c = 0.30 \left(\frac{L}{S^{0.25}} \right)^{0.76}$$

Donde:

T_c = tiempo de concentración (h).

L = longitud del cauce principal (km).

S = pendiente total del cauce principal en porcentaje (%).

Giandotti

$$T_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5 L}{0.8\sqrt{H}}$$

Donde:

T_c = tiempo de concentración (h).

A = área de la cuenca (km²).

L = longitud del cauce principal (km).

H = elevación media de la cuenca o diferencia de nivel principal (m).

Tabla 10*Clases de tiempo de concentración (min)*

Rangos de T_c	Clases
0 – 35	Muy montañosa
35 – 70	Montañosa
70 – 105	Moderadamente montañosa

Fuente: Baldeón (2016).

2.3.4. Modelamiento Hidrológico.

López y Delgado (2009) conceptualizan al modelamiento hidrológico como una representación simplificada de un sistema real complejo, bajo formas físicas o matemáticas. En un modelo hidrológico, el sistema físico real que generalmente representamos es la “Cuenca Hidrográfica” y cada uno de los componentes del ciclo hidrológico. De esta manera un modelo matemático nos ayudara a tomar decisiones en materia de hidrología, por lo que es necesario tener conocimiento de entradas y salidas del sistema para verificar si el modelo es representativo. Los modelos hidrológicos son entonces representaciones simplificadas de los sistemas hidrológicos reales, en otras palabras, el modelamiento hidrológico es una simplificación de la realidad, a partir del cual podemos estudiar la relación causa efecto de una cuenca a través de los datos de entrada y salida, con los cuales se logra un mejor entendimiento de los procesos físicos hidrológicos que tienen lugar dentro de la cuenca.

Martínez (2021), hace referencia que, en relación con los cambios de uso del suelo, la manera más racional de evaluar sus impactos sobre la producción hídrica de una cuenca hidrográfica debería ser la implementación de modelos hidrológicos espacial y temporalmente distribuidos. El uso de modelos hidrológicos semidistribuidos permite describir la variabilidad temporal y espacial de los componentes del balance hídrico. Además, Martínez (2021) precisa que los

mecanismos de generación de escorrentía pueden ser distinguidos en el modelo y que la influencia de las condiciones superficiales del suelo sobre estos mecanismos es reflejada en la estructura del modelo y en sus parámetros. El modelo SWAT ha demostrado ser una herramienta poderosa para evaluar los impactos del cambio climático y el cambio de uso/coertura del suelo sobre los recursos hídricos regionales, tal como ha sido reportado en investigaciones en múltiples cuencas hidrográficas de todo el mundo.

- **Modelo Hidrológico SWAT**

Neitsch et al. (2005a) conceptualizan que SWAT corresponde al acrónimo de “Soil and Water Assessment Tool”, manifestando que es un programa de modelización hidrológica desarrollado por el Servicio de Investigación del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, desde que el modelo SWAT fue creado a principio de los 90, ha estado en continua revisión y expansión de sus capacidades; la versión a usar en este trabajo será la 0.9. Además, se han desarrollado extensiones para su uso dentro de los Sistemas de Información Geográfica. Para el desarrollo de esta tesis se utilizó la extensión creada para QGIS 2.18 (LAS PALMAS), QSWAT + (PLUS).

Aguayo et al. (2016) describen a SWAT como un modelo semi – distribuido que fue desarrollado para predecir el impacto de distintas prácticas de uso de suelo sobre el balance hídrico y la exportación de sedimentos y agroquímicos en cuencas complejas de meso y macro escala. La necesidad de información espacial para SWAT incluye un modelo digital de elevación y mapas de tipos y usos de suelo. En este estudio se utilizó el modelo digital de elevación SRTM (Shunte Radar Topography Mission). Toda la información cartográfica debe ser procesada en formato ráster con una resolución de 12 m. Para la discretización o subdivisión espacial de la cuenca es necesario delimitarla en subcuencas, las cuales a su vez necesitan ser subdivididas en unidades de respuesta hidrológica (HRU). Las HRUs son unidades dentro de las

cuales existen condiciones relativamente homogéneas de uso y tipo de suelo, por lo que se espera que estas unidades presenten un comportamiento hidrológico igualmente homogéneo.

Los procesos hidrológicos simulados incluyen escorrentía superficial, infiltración, flujo lateral subsuperficial, flujo de agua subterránea y evaporación potencial. Debido a que SWAT requiere información de valores locales para los parámetros que describen las características hidrológicas de los diferentes usos del suelo presentes en el área de estudio, es necesario identificar y asociar este tipo de características a la base de datos disponible en el modelo. En el caso particular de las plantaciones forestales, las cuales son el objetivo principal del presente estudio, estas serán consideradas como plantaciones con especies exóticas de *Pinus*, plenamente establecidas (Stehr et al. 2010).

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Ubicación y Características del Área de Estudio

3.1.1. Ubicación

La cuenca del río Rejo abarca una superficie total de 22,807.94 hectáreas y se encuentra ubicada políticamente entre las provincias de Cajamarca y San Pablo, en el departamento de Cajamarca. Desde el punto de vista hidrográfico, forma parte de la cuenca del río Jequetepeque, y se extiende en un rango altitudinal comprendido entre los 2,632 y 4,224 metros sobre el nivel del mar.

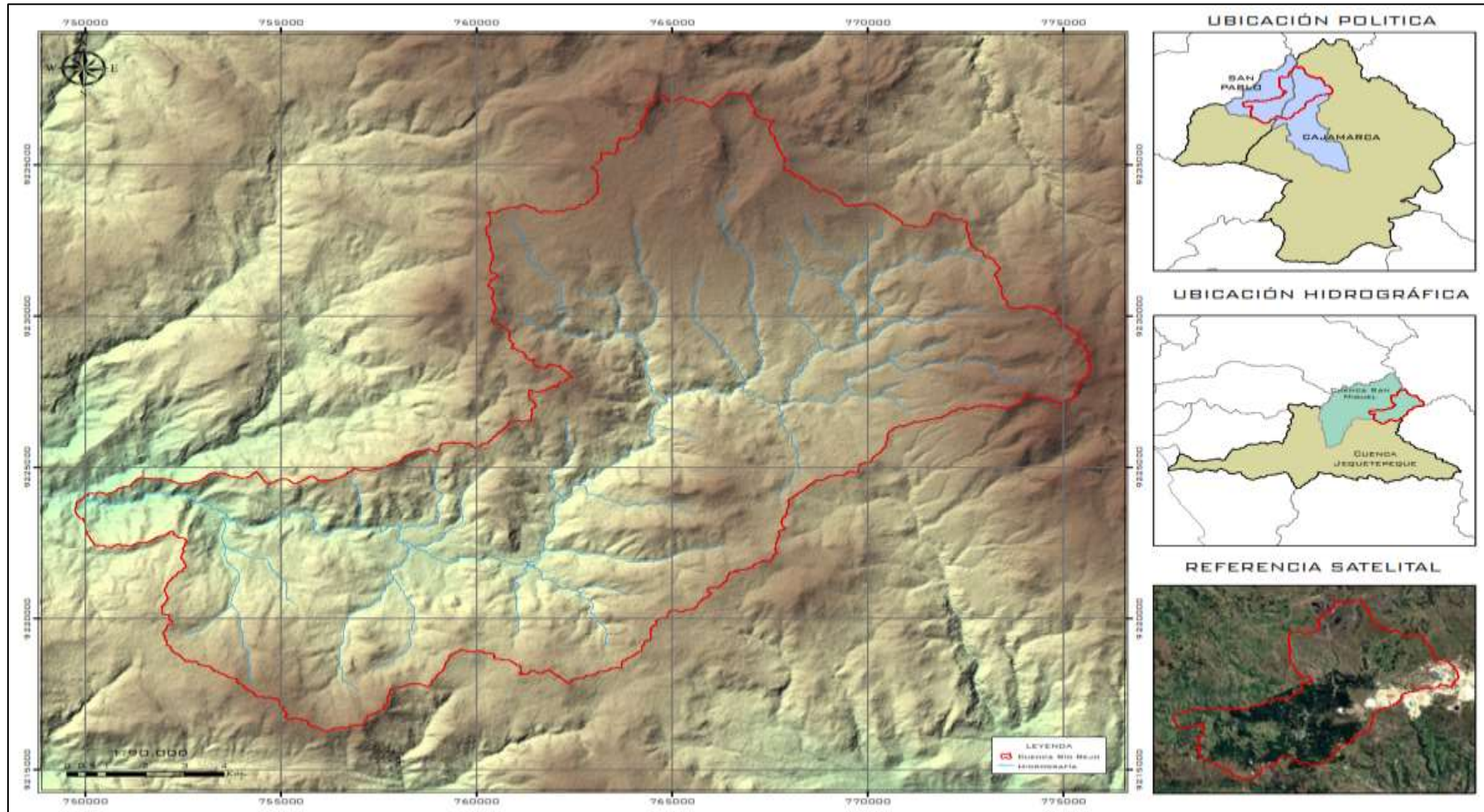
3.1.2. Características del Área de Estudio

3.1.2.1. Clima.

La cuenca hidrográfica del Río Rejo reporta una temperatura promedio anual 10.64°C, humedad relativa media anual 83.26% y una precipitación media anual de 1015.80 mm (SENAMHI, 2020). En los meses donde las lluvias tienen mayor intensidad, también se presentan granizadas de forma esporádica, las cuales tienen poca duración, estas afectan a los diferentes cultivos que se encuentran dentro de la cuenca.

Figura 3

Mapa de ubicación de la Cuenca Hidrográfica del río Rejo.



Nota. Área de estudio. Fuente: Elaboración propia según datos generados mediante el modelo hidrológico SWAT.

3.1.2.2. Ecología y Geología.

Según el Gobierno Regional de Cajamarca (2011) y de acuerdo con el sistema de clasificación de Holdridge la zona de vida dominante en la cuenca hidrográfica del río Rejo corresponde al bosque muy húmedo montano tropical (nmh – MT). Además, también se encuentra presente la zona de vida paramo pluvial subalpino tropical (pp – SAT). Y finalmente también se encuentra, pero en menor medida el bosque húmedo montano bajo tropical (bh – MBT).

Las formaciones geológicas que se encuentran dentro de la cuenca hidrográfica son bastante variadas; estando presentes los periodos: cuaternario, cretáceo, neógeno y paleógeno. Conformadas por depósitos aluviales y fluvioglaciares, formaciones; Chule, Farrat, Inca, Pariatambo y Yumagual. Volcánicas Huambos y San Pablo (Gobierno Regional de Cajamarca, 2011).

3.1.3. Edafología

El Gobierno Regional de Cajamarca (2011) determina que los suelos de la cuenca son derivados de rocas sedimentarias en un (80%), volcánicas en un (10%) y volcánica – sedimentaria en un (10%) también. Además, la materia orgánica es elevada debido a la gran cantidad de plantaciones forestales y el desprendimiento de hojarasca que esto ocasiona y la baja temperatura del entorno.

3.1.4. Vegetación Forestal

Mendo (2008) determinó que la vegetación forestal que se encuentra dentro de la cuenca hidrográfica del río Rejo se encuentra conformada por 6 especies forestales origen exótico, sumando un área total de 6625.08 hectáreas. Predominando la especie *Pinus patula* con 51.30% (3398.8 ha), seguido el *Pinus radiata* con 35.13% (2327.6 ha), *Pinus muricata* con 4.50%

(298.1 ha), *Pinus pseudostrobus* 4,30% (285.2 ha), *Pinus monstezumae* 4,16% (275.3 ha) y finalmente *Pinus greguii* con 0,61% (40.2 ha).

3.1.5. Actividades Económicas

Las actividades económicas que existen son principalmente; la actividad forestal, con la extracción de madera por parte de la Cooperativa Atahualpa Jerusalén, esta cooperativa se viene beneficiando con la extracción y comercialización de madera tanto de forma rolliza como cubicada y la elaboración de muebles para su venta. Además, las plantaciones les han proporcionado un valor paisajístico el cual aprovechan en forma de turismo vivencial, llegando al punto de haber introducido espacios recreacionales con la presencia de animales salvajes. Por último, la introducción de ganado y su consecuente producción, les ha servido para constituir microempresas que están destinadas a la venta de leche, yogurt, mantequilla, manjar blanco entre otros derivados. Finalmente, la otra actividad que impacta de forma significativa dentro de la cuenca es la minería, la cual ocupa un tercio del total de espacio de la cuenca, esta actividad está liderada por la empresa Minera Yanacocha y sus yacimientos acuíferos los cuales al ser explotados brindan diferentes oportunidades de trabajo tanto a los pobladores de la zona como a otras personas (Mendo, 2008).

3.2. Equipos y Materiales

En el presente trabajo de investigación se manipularon materiales y equipos que facilitaron la georreferenciación del área, así como la toma de datos del tipo de cobertura de suelo que se tiene actualmente, además se tomó muestras de suelo y elaboración de probetas para los análisis respectivos en los laboratorios especializados.

3.2.1. Equipos

Computadora personal (Laptop TOSHIBA QOSMIO), Cámara fotográfica digital (marca Nikon), calculadora marca (Casio), camioneta rural (marca Toyota), binoculares (marca opticon), GPS (marca Trimble Geo 7x), Correntómetro (marca GlobalWater).

3.2.2. Materiales

Libreta de campo, cinta métrica, wincha de 50 m., pintura en spray de color amarillo, registros meteorológicos, barretas, zapapicos, mapa de ubicación de la cuenca hidrográfica, tablero de campo, regla graduada, poncho impermeable, jarras de diferentes medidas, entre otros.

3.3. Metodología

La metodología consistió principalmente en la recolección y generación de la información necesaria (mapa de pendientes, mapa de uso de suelo, mapa de tipo de suelo, información climática; precipitación, temperatura y humedad relativa) para la aplicación del modelo hidrológico SWAT en la cuenca hidrográfica del Río Rejo, a continuación, se procedió a la correspondiente calibración y validación estadística a través de información tomada en campo de aforos puntuales en diferentes puntos de la cuenca. Así mismo, se consideraron dos escenarios, uno donde predominan la instalación de plantaciones forestales con especies exóticas (*Pinus sp.*) y el otro donde predominan los cultivos genéricos de la zona.

3.3.1. Recolección de datos

Modelo hidrológico SWAT

Se considera a SWAT como un modelo hidrológico de base física y distribuida, desarrollado para predecir los efectos de los cambios en una determinada cuenca hidrográfica,

basadas en las prácticas de gestión en materia de agua, sedimentos y los rendimientos químicos agrícolas (Arnold y Fohrer, 2005).

SWAT ejecuta el respectivo modelamiento en un tiempo de intervalo diario para simulaciones a largo plazo en cuencas hidrográficas. SWAT representa heterogeneidades espaciales dividiendo una cuenca varias subcuencas, luego divide aún más las subcuencas en múltiples unidades de respuesta hidrológica (HRUs). Cada HRU es una combinación de suelo, cubierta vegetal y pendientes. La cantidad de agua simulada de cada subcuenca se enruta y distribuyen al caudal de salida de la cuenca (Neitsch et al., 2005b).

La gran virtud del modelo consiste en utilizar gran cantidad de información para realizar una mejor simulación, requiere datos de entrada relativamente fáciles de disponer y permite estudiar los impactos a largo plazo, sin embargo, en países poco desarrollados, no existe toda la información para utilizar el modelo correctamente (Mattos et al., 2010).

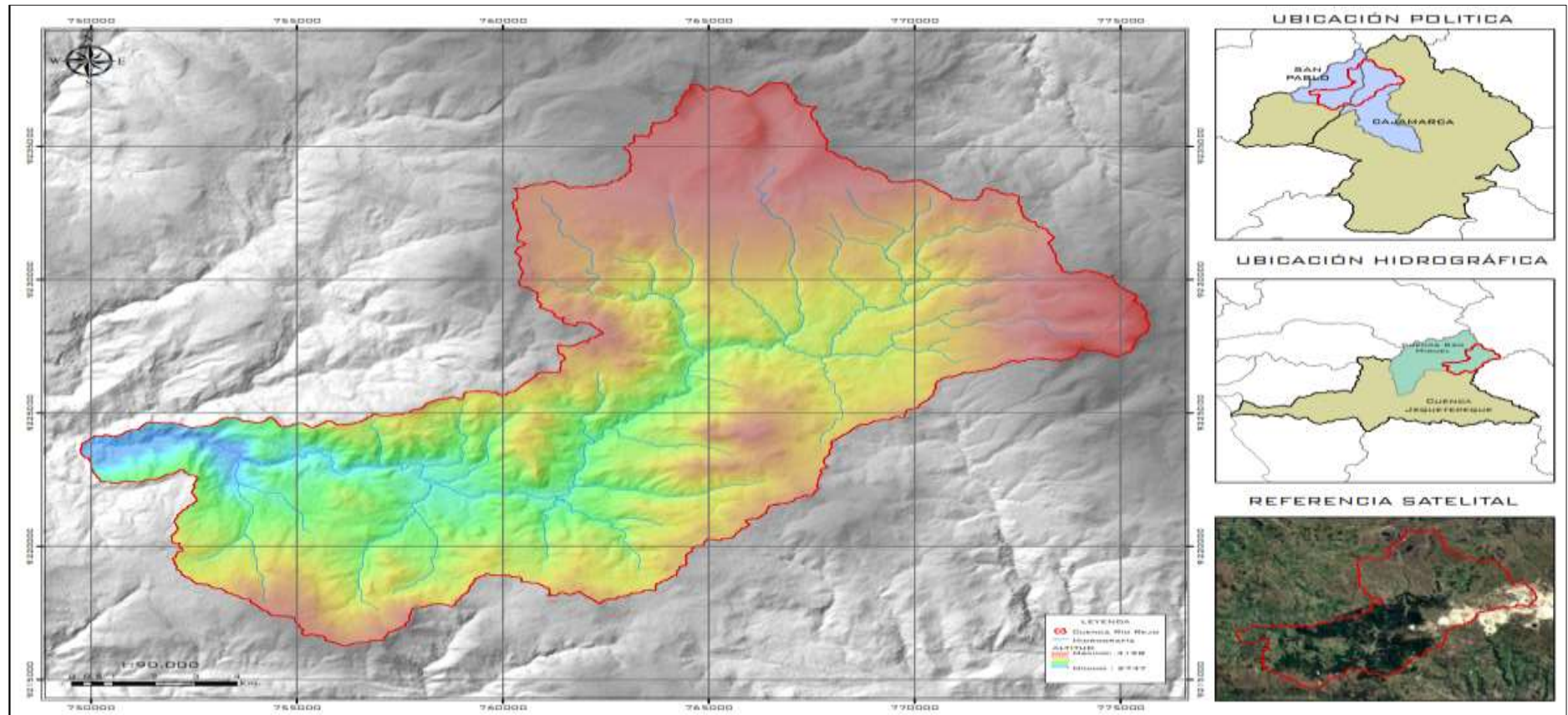
Datos de entrada del modelo SWAT

a. Modelo digital de elevación (DEM)

El modelo digital de elevación por sus siglas en inglés (DEM), es una de las principales entradas del modelo SWAT. El DEM es una matriz de muestreo de elevaciones consideradas a nivel topográfico como (Z), que están espaciados a intervalos regulares en las direcciones X y Y. El modelo digital de elevación utilizado en el presente estudio se obtuvo de las fuentes de datos espaciales correspondiente al ALOS PALSAR DEM, disponible dentro de los productos del satélite ALOS (Advanced Land Observation Satellite), de la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (JAXA), la imagen utilizada le corresponde una resolución de 12.5 m., por pixel.

Figura 4

Mapa altitudinal de la cuenca hidrográfica del Río Rejo.



Nota. Rango de altitudes existentes dentro de la cuenca hidrográfica del Río Rejo. Fuente: Elaboración propia según datos obtenidos del Satélite ALOS (Advanced Land Observation Satellite).

b. Mapa de tipo de suelos

En cuanto a la elaboración del mapa de tipo de suelos para la cuenca del río Rejo, este fue diseñado en base a la cartografía disponible de la ejecución del proyecto zonificación ecológica económica del gobierno regional de Cajamarca, el cual contempla diferentes unidades edáficas y sus respectivas características físicas. Además, los parámetros de los grupos hidrológicos de los tipos de suelos se generaron a través de la configuración de la textura del suelo utilizando el programa NumCum, con base en la clasificación USDA. La base de datos del programa SWAT, requiere de las características de propiedades texturales y fisicoquímicas del suelo, las cuales se indican en la Tabla 11.

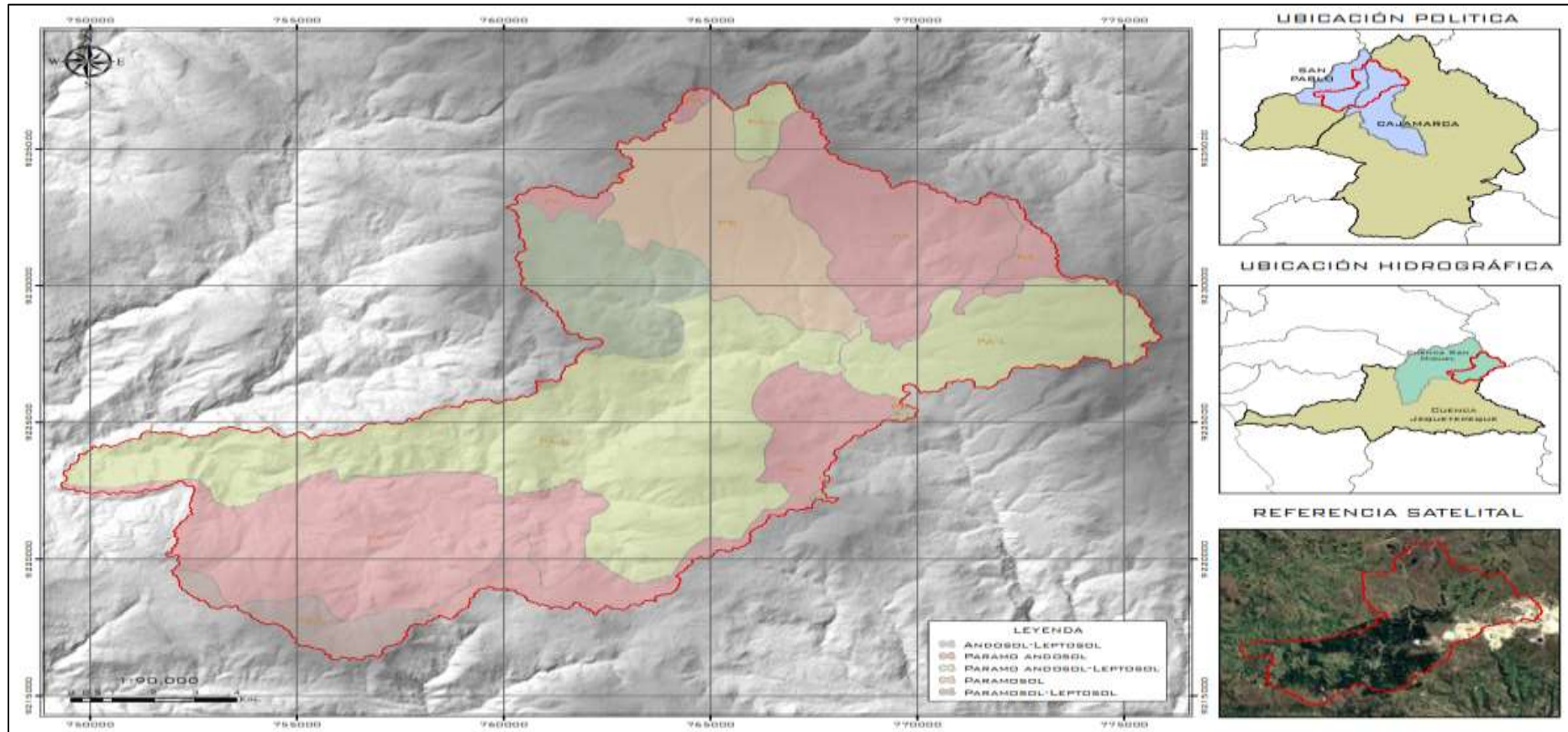
Tabla 11

Descripción de las características físicas y químicas de los tipos de suelo requeridos por el modelo SWAT.

Nº	Definición SWAT	Descripción
1	SOL_ZMX	Máxima profundidad del perfil del suelo con presencia de raíces (mm).
2	ANION_EXCL	Fracción de porosidad desde donde los aniones son excluidos
3	SOL_CRK	Fracción del volumen de rompimiento potencial o máximo del perfil del suelo
4	SOL_Z	Profundidad desde la superficie del suelo al fondo del horizonte (mm)
5	SOL_BD	Densidad real (Mg/m^3 o g/cm^3)
6	SOL_AWC	Capacidad de disponibilidad del agua del horizonte de suelo (mm $\text{H}_2\text{O/mm}$ Soil)
7	SOL_K	Conductividad hidráulica saturada (mm/hr)
8	SOL_CBN	Contenido de carbono orgánico (% del peso del suelo)
9	SOL_ALB	Albedo del suelo húmedo
10	SOL_EC	Conductividad eléctrica (dS/m)
11	USLE_K	Factor USLE de erodabilidad del suelo
12	CLAY	Contenido de arcilla (% del peso del suelo)
13	SILT	Contenido de limo (% del peso del suelo)
14	SAND	Contenido de arena (% del peso del suelo)
15	ROCK	Contenido de fragmentos de roca (% del peso del suelo)

Figura 5

Mapa de tipo de suelos de la cuenca hidrográfica del Río Rejo.



Nota. Tipos de suelo de la cuenca hidrográfica del Río Rejo. Fuente: Elaboración propia según datos obtenidos del estudio de suelos realizado por Poma (2011).

c. Mapa de uso de suelo

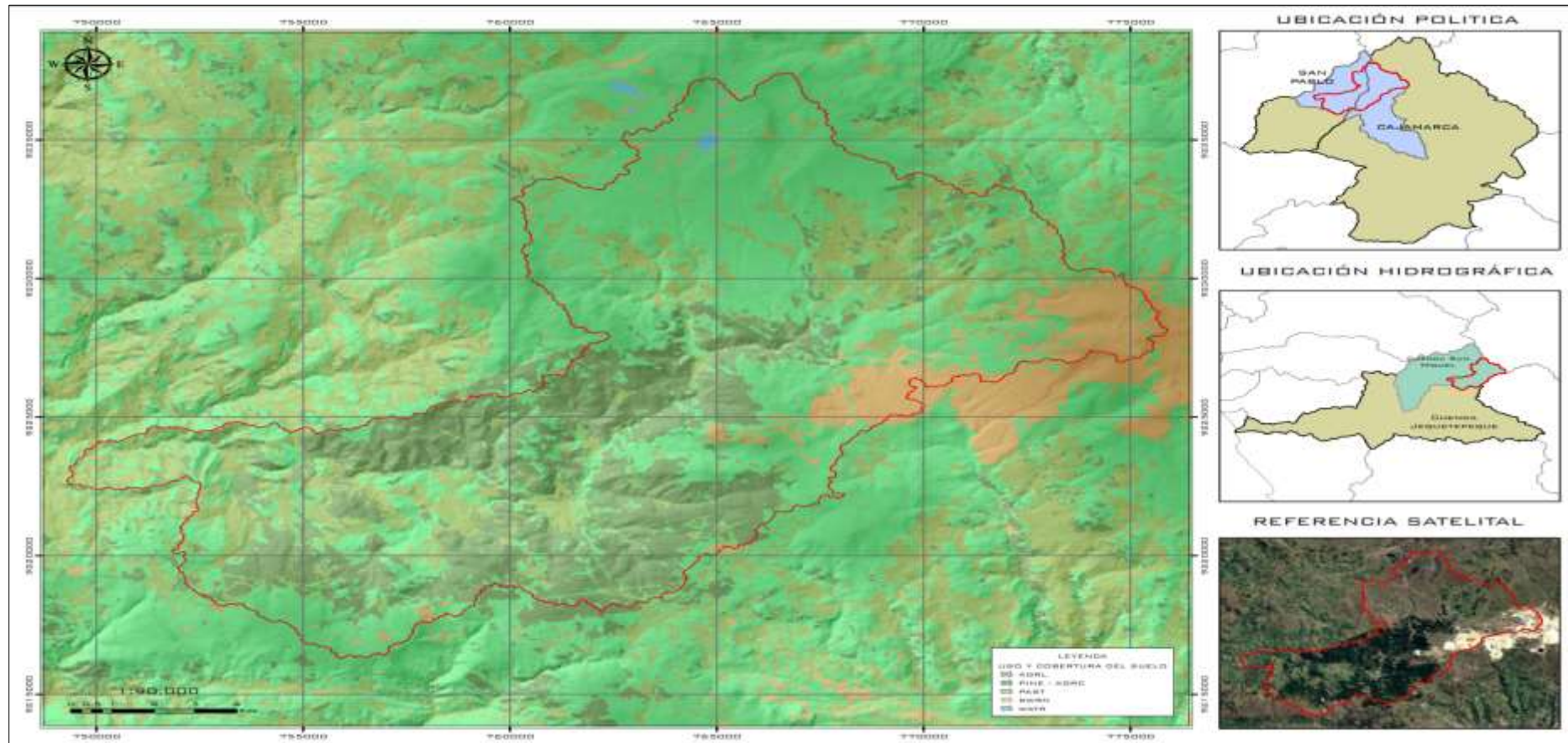
El mapa de uso de suelo es fundamental para la correcta ejecución del modelo SWAT, en base al objetivo principal que se ha trazado en la presente investigación, el cual cabe resaltar que es la evaluación del impacto que generan las plantaciones forestales con especies exóticas sobre la disponibilidad del recurso hídrico dentro de la cuenca hidrográfica del Río Rejo, se generaron dos tipos de mapa de uso de suelo, el primero en función a la instalación de las plantaciones de pino que fueron realizadas a partir del año 1978 y que acarrearán un largo proceso de crecimiento hasta la fecha, el segundo mapa de uso de suelo, dejará de considerar a las áreas de plantaciones forestales como tales y solamente se consideró como zona agrícola, cabe mencionar que la distribución de estas dos áreas son las mismas, y al momento de la aplicación del modelo, se cambiaron las características que los conforman. Los mapas se prepararon en a partir de la metodología de mosaico de imágenes satelitales Sentinel II, con una resolución espacial de 15 m., estas fueron descargadas del portal de la Agencia del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS). Para la elaboración de estos mapas se utilizó el software ENVI en su versión 5.4, como plataforma de digitalización de dichas imágenes, además se corroboró in situ los tipos de uso de suelo que cuenta actualmente la cuenca hidrográfica del Río Rejo. A continuación, se presenta la Tabla 12, donde indica el tipo de uso de suelo encontrado dentro de la cuenca del Río Rejo, código de identificación para el modelo SWAT y área correspondiente que ocupa.

Tabla 12*Características del tipo de uso de suelo requeridos por el modelo SWAT*

Uso	Descripción	Uso SWAT	Ha	%
Terrenos agrícolas de cultivo genérico	Áreas cultivadas de forma intermitente en base a la disponibilidad de lluvias en la cuenca, mayormente dedicada a la subsistencia familiar.	AGRL	3940.29	17.32
Plantaciones forestales	Áreas destinadas a plantaciones forestales, en su mayoría con la especie Pinus sp.	PINE	6625.08	29.13
Terrenos agrícolas de cultivo cercano	Áreas cultivadas de forma permanente en base a la disponibilidad de lluvias en la cuenca, mayormente dedicada a la subsistencia familiar.	AGRC	6625.08	29.13
Pastos naturales	Áreas con vegetación natural, mayormente destinada a la crianza de ganado vacuno.	PAST	10534.5	46.31
Minería	Áreas destinadas a la explotación minera, se considera como parte de las instalaciones de la empresa Yanacocha.	SWRN	1616.13	7.11
Cuerpos de agua	Áreas de reducida extensión que alternan de forma aleatoria dentro de la cuenca.	WATR	30.24	0.13
TOTAL			22 746.24	100

Figura 6

Mapa del tipo de uso de suelos de la cuenca hidrográfica del Río Rejo.



Nota. Tipo de uso de suelo dentro de la cuenca hidrográfica del Río Rejo. Fuente: Elaboración propia según datos obtenidos de la imagen Sentinel (USGS).

d. Datos climáticos

El modelo hidrológico SWAT, requiere de las variables climáticas; precipitación diaria, temperatura máxima y mínima del aire, radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa. Los valores para todos estos parámetros pueden ser leídos de los registros de datos observados o pueden ser generados. Para la presente investigación se utilizaron datos diarios de precipitación y temperatura máxima y mínima del aire de la estación Granja Porcón, la única estación que se encuentra ubicada dentro de la cuenca hidrográfica. Estos datos corresponden a un período de 41 años (1979 – 2020) datos proporcionados por el (SENAMHI) Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú.

Tabla 13

Ubicación geográfica de la estación meteorológica de Granja Porcón – Cajamarca

Estación	Ubicación Geográfica		
	Latitud	Longitud	Altitud
G. Porcón	07° 02' 15" SUR	78° 38' 00" OESTE	3149 msnm.
	Ubicación Política		
	Departamento	Provincia	Distrito
	Cajamarca	Cajamarca	Cajamarca

Fuente: SENAMHI (2020).

Tabla 14

Tipo de datos meteorológicos de la estación Granja Porcón – Cajamarca

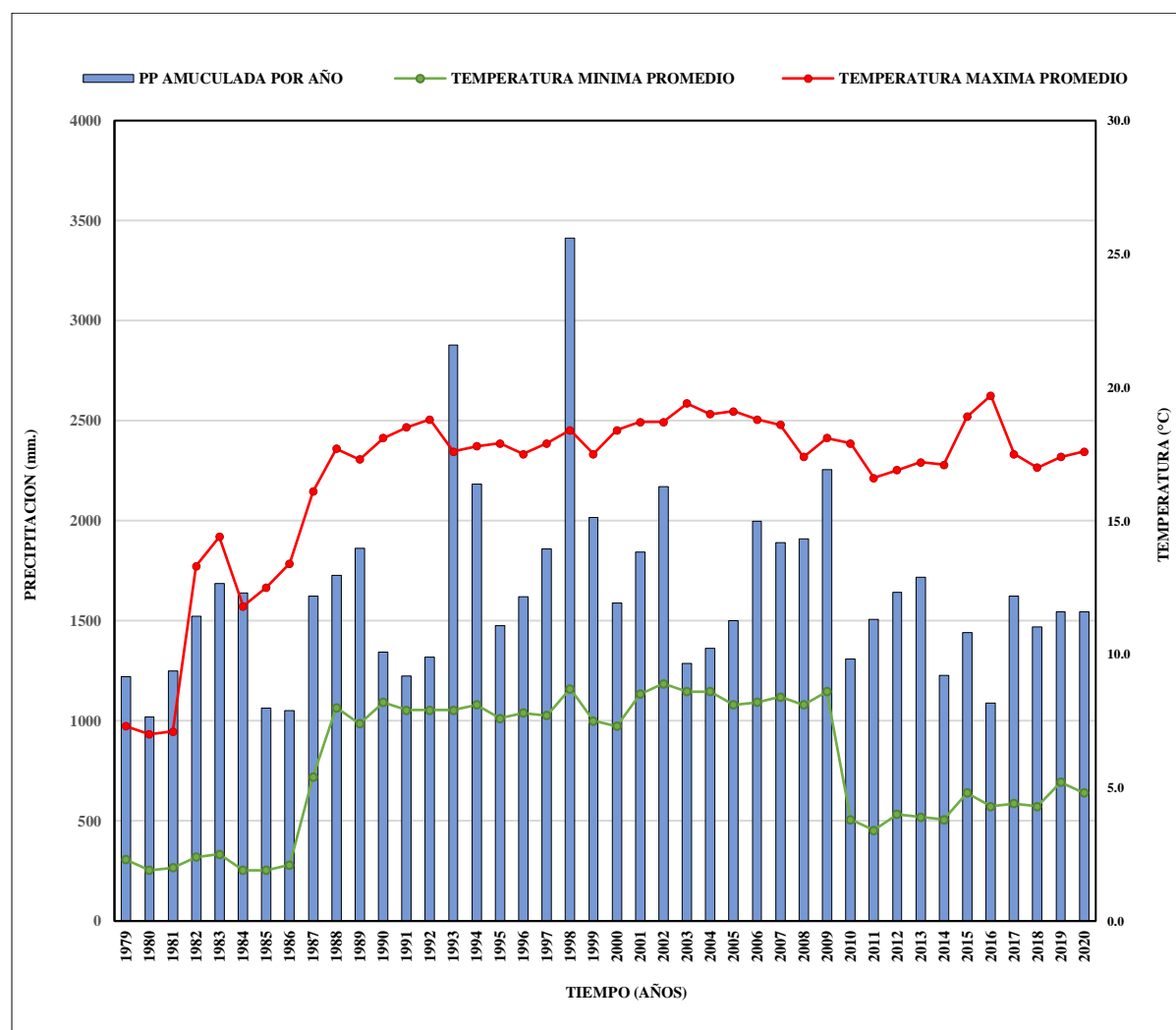
Estación	Datos	Años	Período	Frecuencia
G. Porcón	Precipitación	41	1979 - 2020	Diaria
	Temperatura máx. /min	41	1979 - 2020	Diaria

Fuente: SENAMHI (2020).

Se muestra en la Figura 7 el climograma de la cuenca del Río Rejo, para el período 1979 – 2020, compuesto por datos de precipitación (mm), temperatura máxima y mínima (°C), para la estación Granja Porcón, claramente se diferencia que la mayor cantidad de precipitación se registró en los años 1993 y 1998 con 2879.9 mm y 3412.7 mm correspondientemente. En cuanto a la temperatura máxima, el año con el mayor registro es 2016 con 19.7 °C, finalmente el año que registro la mayor temperatura mínima fue 2002 con 8.9 °C.

Figura 7

Climograma de la estación Granja Porcón – Período Anual (1979-2020)

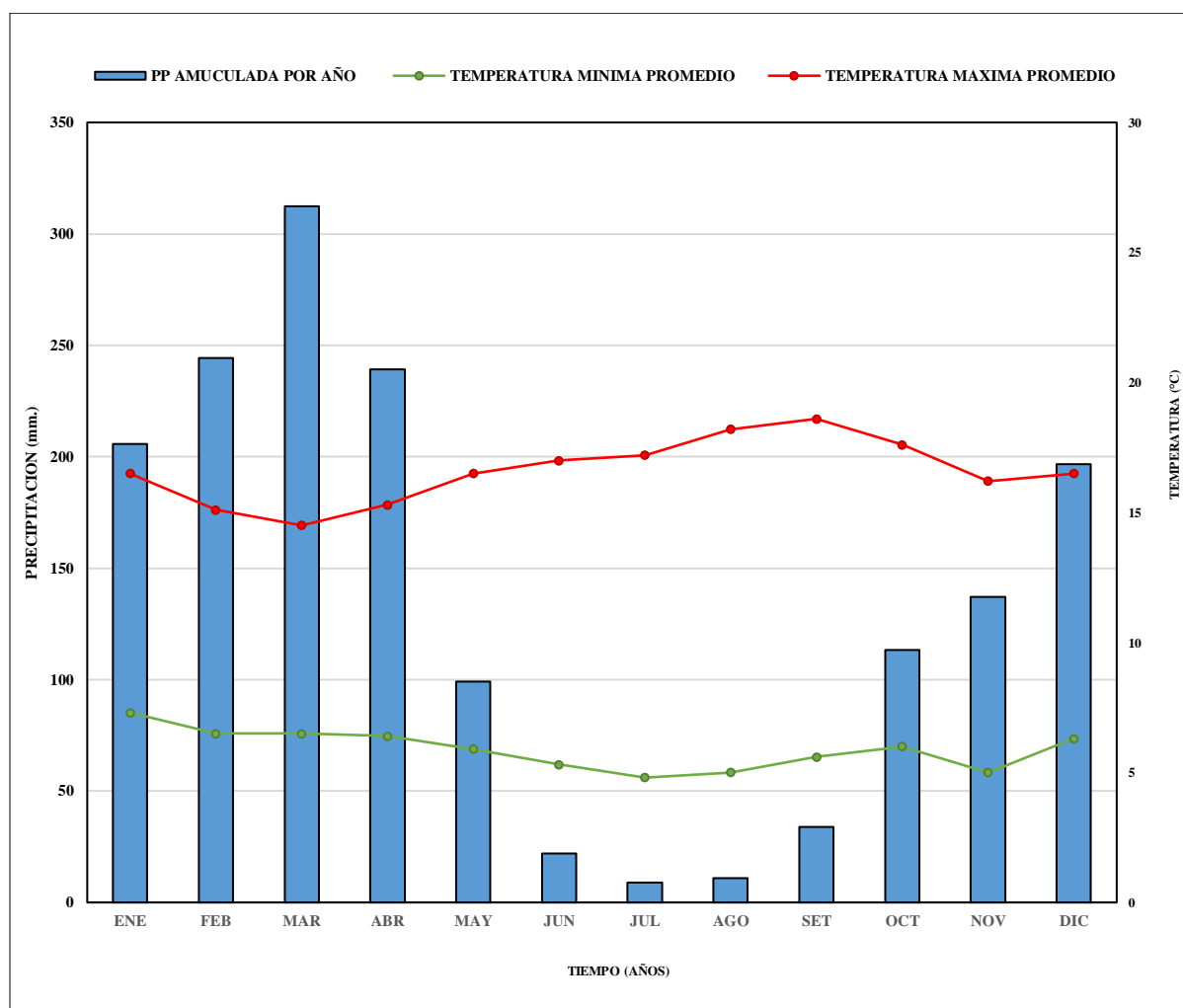


Nota. La figura muestra el comportamiento de la precipitación, temperatura máxima y mínima de la estación Granja Porcón durante los años 1979 a 2020. Fuente: SENAMHI (2020).

Del climograma que se representa en la Figura 8 se puede determinar que los meses con mayor cantidad de precipitación son desde octubre hasta abril, teniendo al mes de marzo como el mes más lluvioso, con un promedio de 321.3 mm y a julio como el mes con la cantidad de menor precipitación presentando solamente 9.0 mm; en cuanto a temperatura tanto máxima como mínima se observa que el mes de setiembre es el mes que tiene un mayor registro con 18.6 °C y el mes de julio con 4.8 °C con el menor registro, respectivamente.

Figura 8

Climograma de la estación Granja Porcón – Período Mensual (1979-2020).



Nota. La figura muestra el comportamiento de la precipitación, temperatura máxima y mínima de la estación Granja Porcón durante los años 1979 a 2020 de forma mensual. Fuente: SENAMHI (2020).

3.3.2. Procesamiento de datos

En esta fase de la investigación se ejecutó el proceso de modelamiento hidrológico propiamente dicho, combinando las características que el modelo solicita para la correcta interacción de este (MDE, mapa de uso de suelo, mapa del tipo de suelo y datos hidroclimáticos). Además, se consideró los datos obtenidos de la fase de campo, los cuales son fundamentales para calibrar el modelo. Actualmente el software de sistemas de información geográfica de código libre QGIS, es considerado mucho más eficiente y flexible para procesos de compilación de datos masivos que su principal competidor a nivel de software de escritorio (ArcGIS). Por esta razón se decidió usar este software (QGIS en su versión 3.16.7 – Hannover), y el plugin por defecto que es QSWAT en su versión 1.5.2.

a. Aplicación del modelo SWAT

El proceso de modelamiento hidrológico comenzó con el análisis del Modelo Digital de Elevación (MDE); este representa la distribución espacial de la altitud del terreno sobre el nivel de referencia. Resaltando que la importancia de los MDE radica en su análisis, de donde se puede deducir un conjunto de importantes características de relieve, determinando la clasificación del terreno según las clases de pendientes, estudiando orientaciones, definiendo la circulación de flujos de escorrentía y calculando su longitud y obteniendo perfiles longitudinales del terreno. Se analizó un modelo digital de elevación el cual posee un tamaño de celda de 12.5, cabe mencionar esta característica ya que la calidad de los resultados se encuentra en función de las cualidades de los datos y formatos ingresados al modelo.

A continuación, la cuenca se subdividió en subcuencas, las cuales representan el primer nivel de división; estas se encuentran georreferenciadas y relacionadas espacialmente. SWAT es un modelo básicamente unidimensional de base empírica y cuyos procesos espaciales en

planta, están promediados según tramos homogéneos de tamaño no condicionado a priori, cada subcuenca tiene definido al final del tramo un punto en el cauce.

Teniendo la red de drenaje, el número de “outlets” y de subcuencas, se procedió a introducir la información referente a los usos del suelo. En este proceso, y mediante una herramienta de reclasificación de QSWAT, se relacionaron los usos incluidos en la base de datos de QSWAT, con aquellos que se asemejan en sus características a los existentes en la cuenca.

Luego se configuró la información edafológica, creándose una base de datos con la información requerida por el programa: profundidad del perfil, textura, porcentaje de materia orgánica, conductividad hidráulica saturada, densidad aparente, grupo hidrológico de número de curva y capacidad de agua disponible. Finalmente, se definió el rango de pendiente, el modelo nos permitió tener un máximo de cinco pendientes configuradas de manera porcentual.

Posteriormente, las subcuencas se dividieron en Unidades de Respuesta Hidrológica (HRUs), acrónimo en inglés de (Hydrologic Response Units). Estas unidades son porciones de la subcuenca que poseen una combinación única de tipo de suelo, de cobertura y de pendiente, esto permitió cuantificar la heterogeneidad de la cuenca. No existe interacción entre las HRUs dentro de una subcuenca: la escorrentía superficial para cada unidad se calculó independientemente y luego se suman para obtener el total de la subcuenca. La ventaja de esta división es el aumento de la exactitud en la predicción de la escorrentía, ya que permitió reflejar las diferencias en la evapotranspiración y otras condiciones hidrológicas, para distintas coberturas, suelos y pendientes.

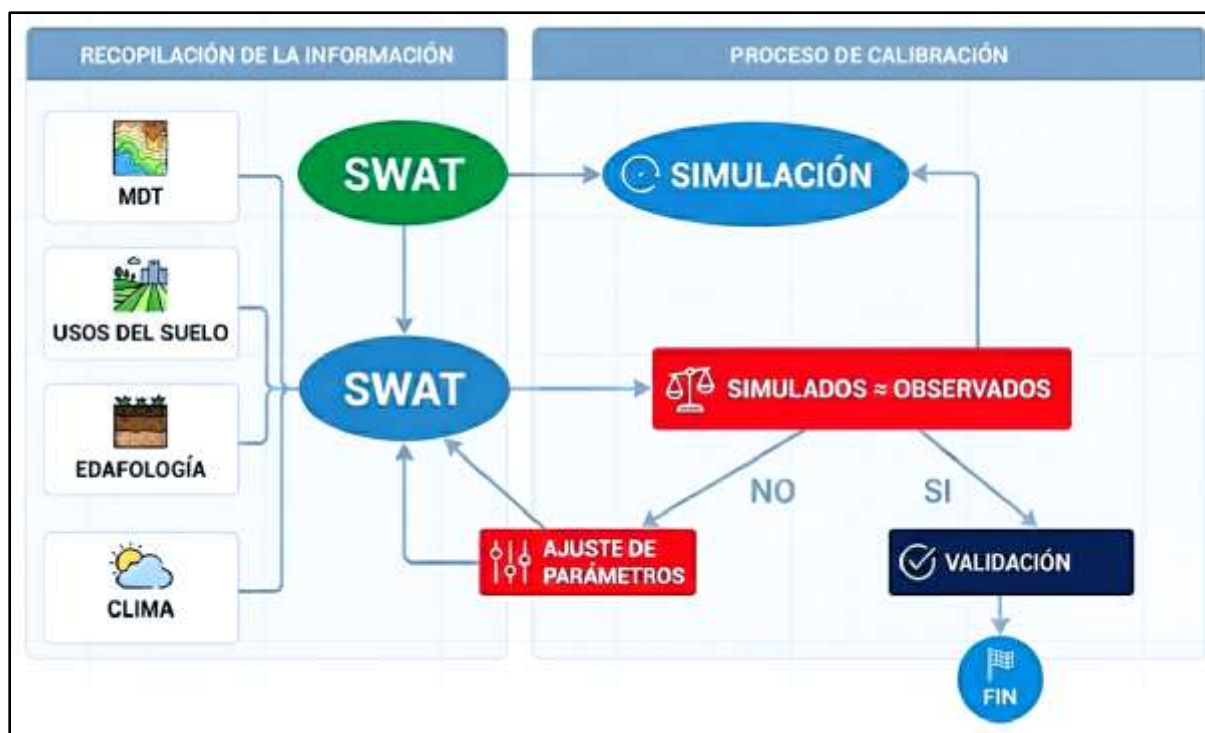
Por último, se introdujeron los datos climáticos. En este caso se disponen datos diarios de precipitación, temperatura del aire (máxima, mínima y media), humedad relativa y brillo solar, Este tipo de datos climáticos se encuentran disponibles en la estación meteorológica

Granja Porcón, la cual se encuentra ubicada dentro de la cuenca hidrográfica del Río Rejo. QSWAT, incluye un motor generador de clima el cual contiene más de ciento setenta mil estaciones de todo el mundo, es por ello por lo que para los datos de velocidad del viento se determinó usar estos datos disponibles por el programa ya que los datos diarios registrados en estas estaciones se asemejan a los datos promedio mensual registrados en la estación Granja Porcón.

Una vez que es ejecutada la simulación, se procedió a la calibración, mediante el software SWAT – CUP y el método SUFI – 2, esto nos permitió realizar el análisis de sensibilidad de los parámetros obtenidos mediante la simulación, estableciendo a que subcuenca se aplicará el método teniendo en cuenta la disponibilidad de datos de aforo.

Figura 9

Diagrama del proceso de modelamiento hidrológico con la herramienta QSWAT+.



Nota. Proceso de modelamiento hidrológico que ejecuta SWAT para estimar datos de los parámetros del balance hídrico. Fuente: Neitsch et al. (2005a)

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Efecto de las plantaciones forestales de coníferas en la disponibilidad hídrica de la cuenca del Río Rejo.

a. Delimitación de subcuencas

Los primeros resultados del proceso de modelamiento hidrológico en la cuenca del Río Rejo con la herramienta SWAT, arrojan datos de delimitación de la cuenca hidrográfica y la subdivisión de esta en subcuencas, en la Tabla 17, se describe el número de subcuencas delimitadas, además se designó a cada una de ellas con un nombre específico, basándonos en la descripción de la red hídrica con la que se contó previamente, cada una de las subcuencas posee una determinada área, centroide, con su respectivas coordenadas y una altura mínima y máxima.

Tabla 15

Subcuencas delimitadas mediante el modelo hidrológico SWAT

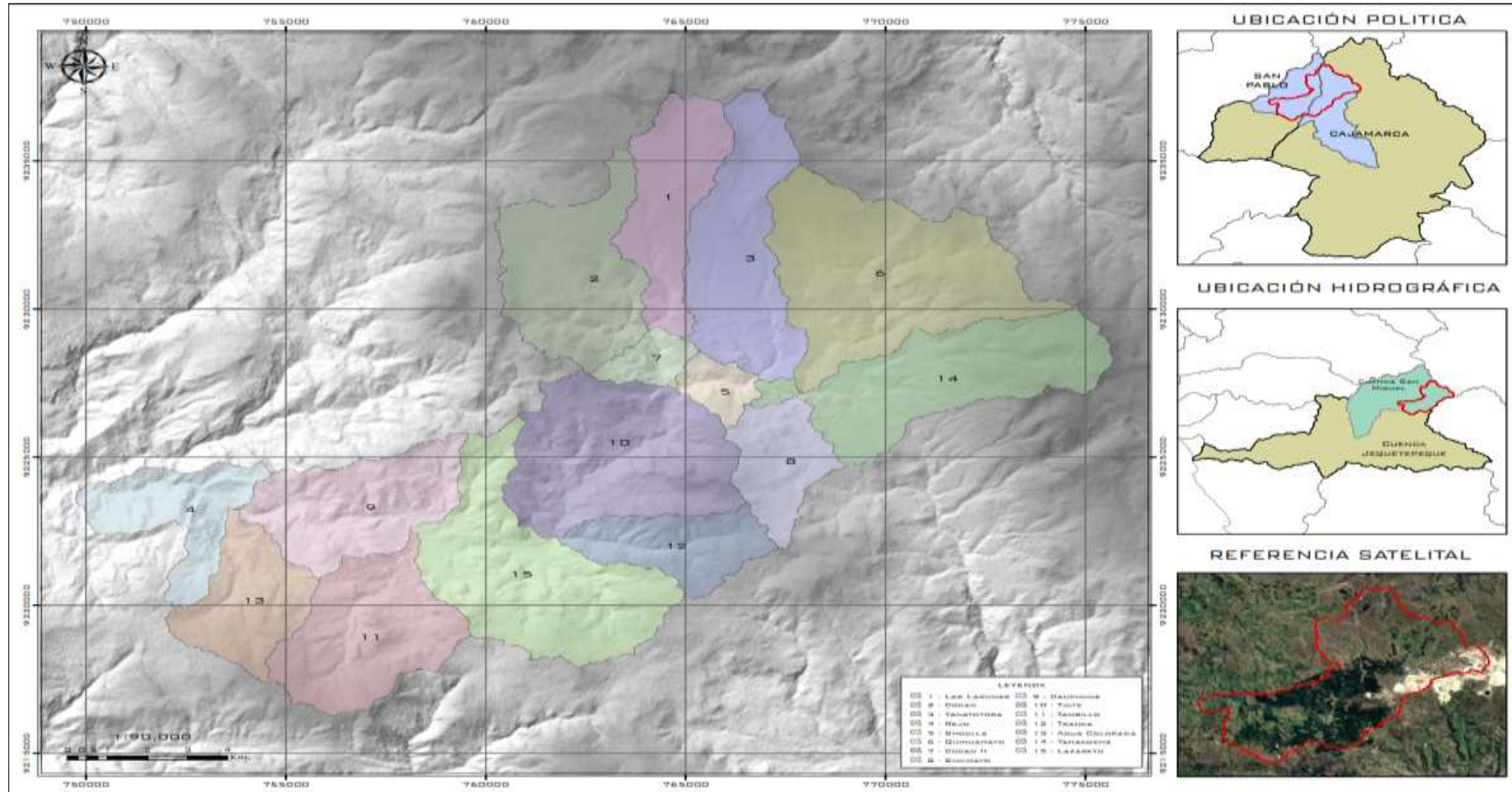
N°	Subcuencas	Área (Ha)	Coordenadas del centroide			Elevación	
			Este	Norte	Altura	Mínima	Máxima
1	Las lagunas	1316.00	764655.63	9233666.04	3857.45	3408.00	4164.00
2	Cocan	1793.00	762221.76	9231185.80	3726.89	3408.00	3951.00
3	Yanatatora	1889.00	766447.19	9231958.83	3741.10	3363.00	4119.00
4	Rejo	1050.00	769939.90	9231195.01	3085.87	2750.00	3570.00
5	Shoclla	310.00	764109.60	9228248.87	3456.18	3289.00	3621.00
6	Quinuamayo	2925.00	765825.53	9227355.86	3689.62	3430.00	4095.00
7	Cocan II	309.00	763325.88	9225021.25	3509.36	3289.00	3863.00
8	Shilmayo	835.00	767342.67	9224806.46	3616.13	3421.00	3855.00
9	Cauchuna	1548.00	756787.59	9223393.88	3254.37	2924.00	3640.00
10	Tinte	2401.00	764760.23	9222029.70	3465.30	3153.00	3876.00
11	Tambillo	1740.00	752242.79	9223047.99	3469.56	3080.00	3831.00

12	Tranca	933.00	754039.44	9220154.65	3520.29	3153.00	3770.00
13	Agua Colorada	1109.00	757017.61	9219034.65	3403.80	2924.00	3822.00
14	Yanacocha	2117.00	771543.99	9227680.51	3737.38	3363.00	4198.00
15	Lazareto	2533.00	761191.33	9221108.90	3384.58	3080.00	3735.00

La Figura 8 muestra la delimitación espacial de las subcuencas que conforman la cuenca del río Rejo, evidenciando su distribución hidrográfica en el territorio. En términos de superficie, las subcuencas Quinuamayo, Lazareto y Tinte destacan como las unidades de mayor extensión, lo que sugiere una mayor capacidad de captación hídrica y potencial de regulación ecosistémica. Por el contrario, las subcuencas Shoclla y Cocan II presentan las menores áreas, lo que podría implicar una menor contribución volumétrica al sistema fluvial principal, aunque no necesariamente una menor importancia funcional en términos de conectividad o conservación.

Figura 10

Mapa de subcuencas delimitadas mediante el modelo hidrológico SWAT dentro de la cuenca hidrográfica del Río Rejo.



Nota. La figura muestra las subcuencas generadas mediante el modelo hidrológico SWAT para la cuenca hidrográfica del Río Rejo.

b. Creación de unidades de respuesta hidrológica (HRUs)

Teniendo la delimitación de la cuenca y subcuencas, se generó la Unidades de Respuesta Hidrológica (HRUs) las cuales según Bocel (2016) las define como “áreas dentro de cada subcuenca que corresponden a todas las únicas combinaciones de cobertura del suelo, tipo de suelo y pendiente en toda la cuenca hidrográfica. Así mismo indica que la subdivisión de la cuenca permite al modelo reflejar diferencias en los principales componentes del ciclo hidrológico, al ser simulados por separado para cada HRU y ser canalizadas en función del modelo digital de elevación para obtener el total en cada subcuenca, esto aporta una mayor precisión en la descripción física del balance hídrico”.

El número de HRUs generadas mediante el proceso de modelamiento hidrológico con la herramienta SWAT dentro de la cuenca hidrográfica del Río Rejo, es un total de 624, distribuidas en las 15 subcuencas anteriormente subdivididas, la mayor cantidad de HRUs, se encuentran dentro de las subcuencas denominadas Las Lagunas con 59 HRUs, Quinuamayo con 54 y Yanatоторa con 52, respectivamente. Finalmente, la subcuenca que presenta la menor cantidad de HRUs, es Shoclla con 18 HRUs.

Tabla 16

Número de HRUs por cada subcuenca dentro de la cuenca hidrográfica del Río Rejo

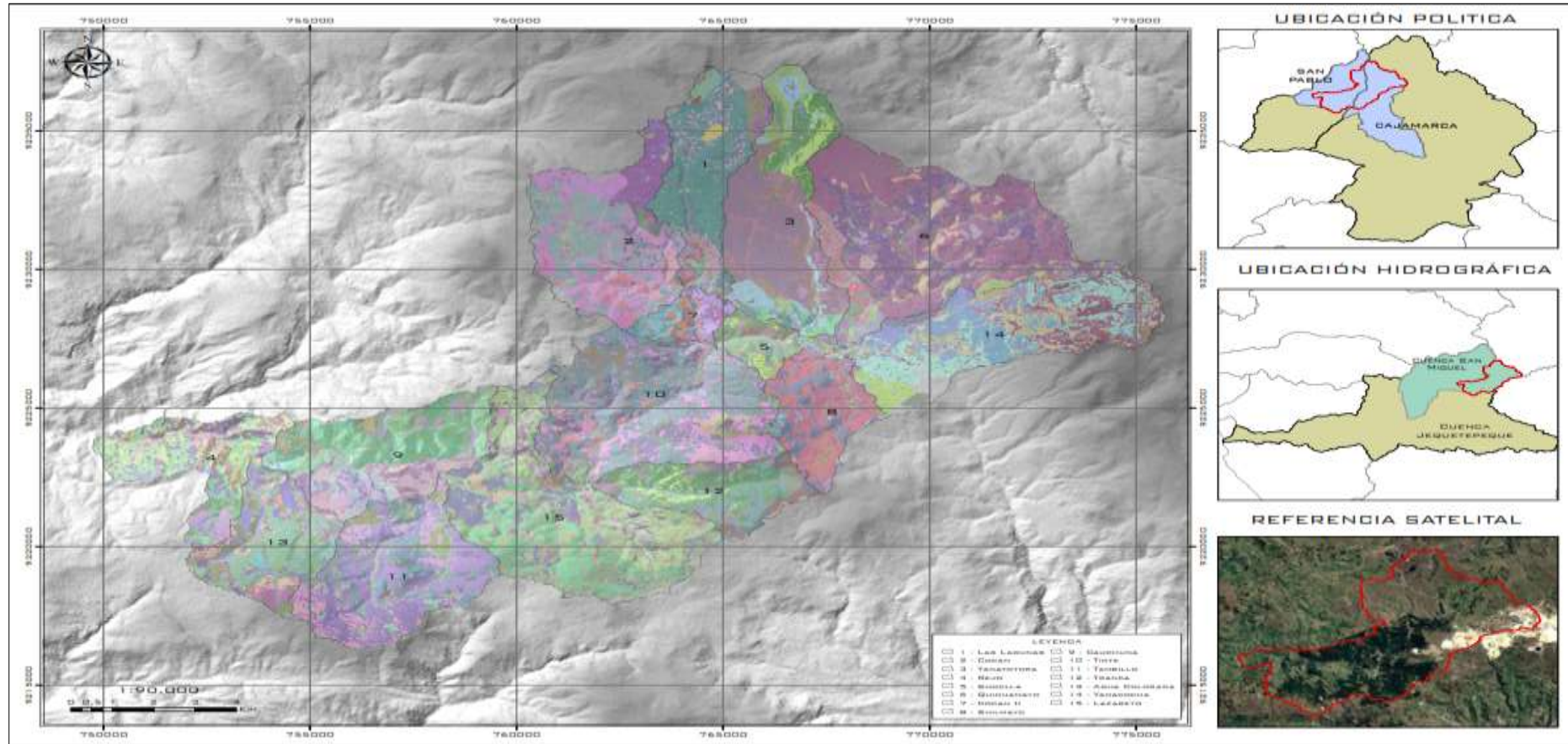
N°	Subcuencas	Área (Ha)	Área (%)	N° HRUs
1	Las lagunas	1316.00	5.77	59
2	Cocan	1793.00	7.86	47
3	Yanatotora	1889.00	8.28	52
4	Rejo	1050.00	4.6	35
5	Shoclla	310.00	1.36	18
6	Quinuamayo	2925.00	12.82	54
7	Cocan II	309.00	1.36	35
8	Shilmayo	835.00	3.66	43
9	Cauchuna	1548.00	6.79	33
10	Tinte	2401.00	10.53	48
11	Tambillo	1740.00	7.63	38
12	Tranca	933.00	4.09	33
13	Agua Colorada	1109.00	4.86	46
14	Yanacocha	2117.00	9.28	41
15	Lazareto	2533.00	11.11	42
Total		22 808.00	100.00	624

Nota. La tabla presenta el nombre de cada subcuenca, su superficie en hectáreas, el porcentaje que representa respecto al área total de la cuenca del río Rejo, y el número de Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU) asignadas a cada una, según la delimitación realizada mediante el modelo hidrológico SWAT.

Gráficamente la distribución de las HRUs, pueden apreciarse en la Figura 11, al ser considerado la totalidad de la cuenca hidrográfica en el proceso de análisis del balance hídrico, se puede observar las diferentes combinaciones generadas a través de la interacción tanto de tipo de suelo, uso de suelo y pendiente.

Figura 11

Mapa de HRUs delimitadas mediante el modelo hidrológico SWAT dentro de la cuenca hidrográfica del Río Rejo.



Nota. La figura muestra las Unidades de Respuesta Hidrológica por cada subcuenca generadas mediante el modelo hidrológico SWAT para la cuenca hidrográfica del Río Rejo.

c. Clasificación de pendientes

La herramienta SWAT nos permite determinar la clasificación de pendientes en base al modelo digital de elevación (DEM), asignando diferentes niveles, en la presente investigación se consideraron los siguientes intervalos de nivel, los cuales pueden apreciarse en la Tabla 17.

Tabla 17

Rango de pendiente dentro de la cuenca hidrográfica del Río Rejo

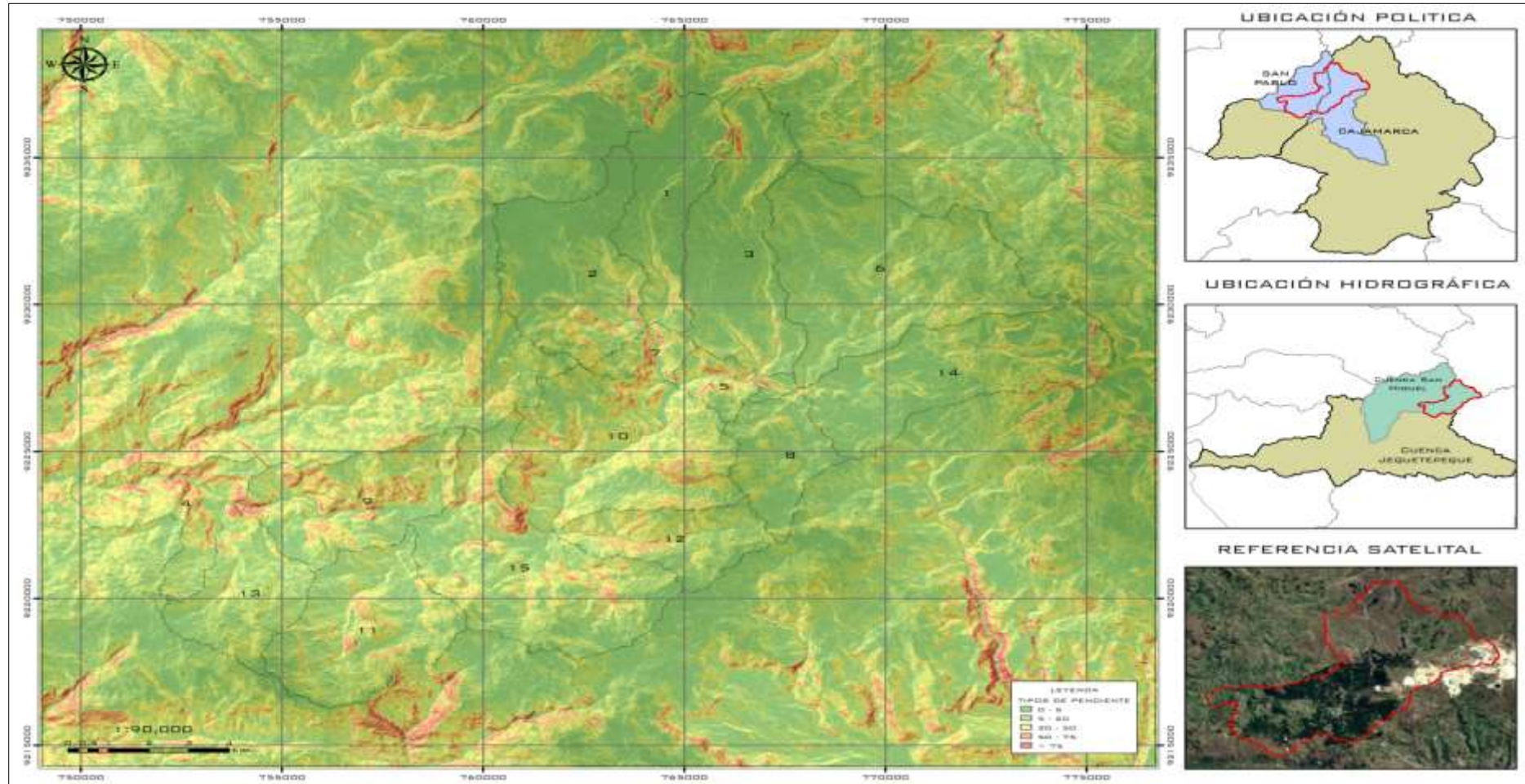
Símbolo	Rango de pendiente (%)	Área	Área (%)	Descripción
A	0 – 5	905.09	3.97	Plana casi a nivel
B	5 – 20	9847.23	43.17	Ligeramente inclinada
C	20 – 50	9757.72	42.78	Moderadamente empinada
D	50 – 75	1569.40	6.88	Muy empinada
E	>75	728.49	3.19	Extremadamente empinada
Total		22 808.00	100.00	

Nota. La tabla presenta el rango de pendientes, la superficie correspondiente en hectáreas, el porcentaje que representa respecto al área total de la cuenca del río Rejo, y una descripción de cada clase de pendiente, según la categorización generada por el modelo hidrológico SWAT.

La distribución del rango de pendiente de forma gráfica dentro de la cuenca del Río Rejo se presenta en la Figura 12, en ella se puede apreciar que los rangos con mayor presencia o distribución dentro de la cuenca son del tipo ligeramente inclinada y moderadamente empinada con un porcentaje de 43.17 % y 42.78 % respectivamente, asimismo, la pendiente del tipo extremadamente empinada refleja la menor distribución, tan solo con un 3.19 % del total del área de la cuenca hidrográfica.

Figura 12

Mapa de pendiente dentro de la cuenca hidrográfica del río Rejo.



Nota. La figura muestra el tipo de pendiente generado mediante el modelo hidrológico SWAT para la cuenca hidrográfica del Río Rejo.

Al respecto, Poma (2011) hace referencia que la pendiente constituye el elemento esencial del factor topográfico, pues tiene estricta relación con la escorrentía superficial y la susceptibilidad del suelo a la erosión, la pendiente alude al grado de inclinación que tiene la superficie del suelo, con respecto a la horizontal y se expresa en porcentaje.

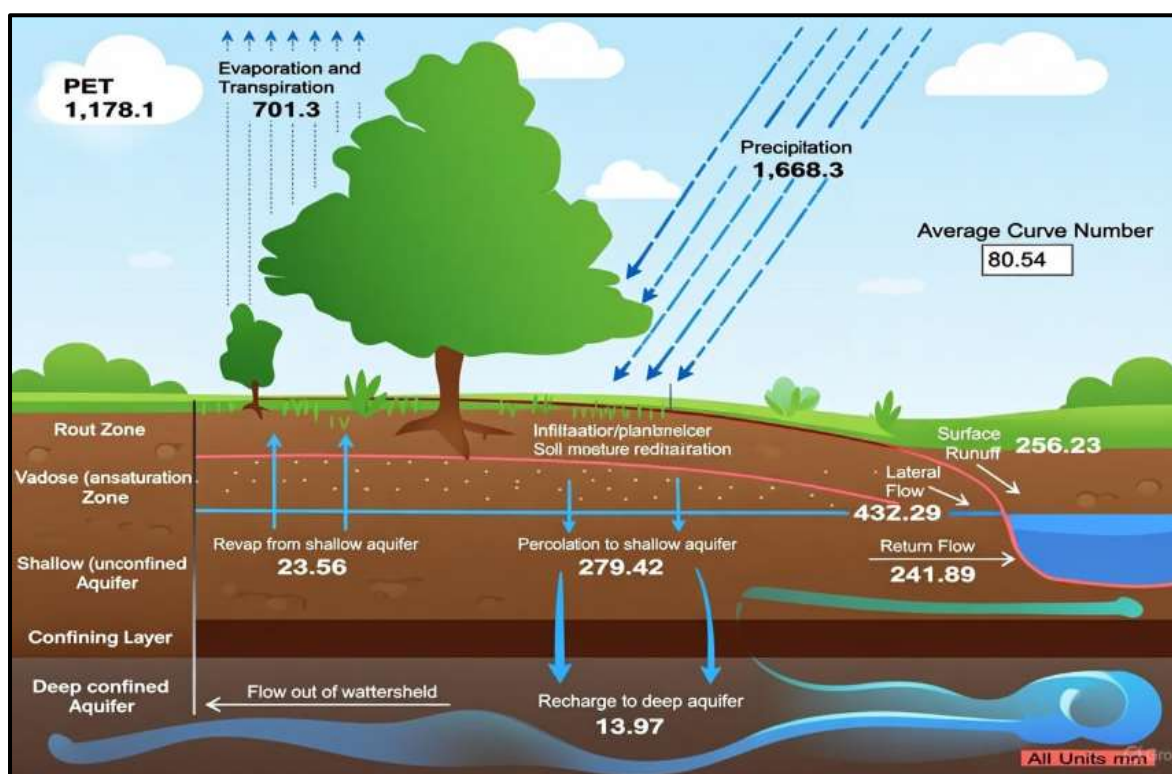
d. Simulación inicial

Los resultados de la ejecución propiamente dicha del modelo hidrológico SWAT, se muestran en la Figura 13, la cual nos indica los valores simplificados de los componentes del balance hídrico, de esta manera las estimaciones resultantes son las siguientes; la precipitación promedio para el período calculado (1979 – 2020), representa un valor de 1 668.3 mm, la evapotranspiración real es de 701.3 mm, la escorrentía superficial de 256.23 mm, y el flujo lateral presenta un valor de 432.25 mm.

Estos primeros resultados son considerados de forma referencial, ya que para que la simulación de la cuenca pueda ser considerado valida, debe ser sometida al proceso de calibración.

Figura 13

Componentes del balance hídrico, pertenecientes a la cuenca del Río Rejo en base a la primera simulación de QSWAT.

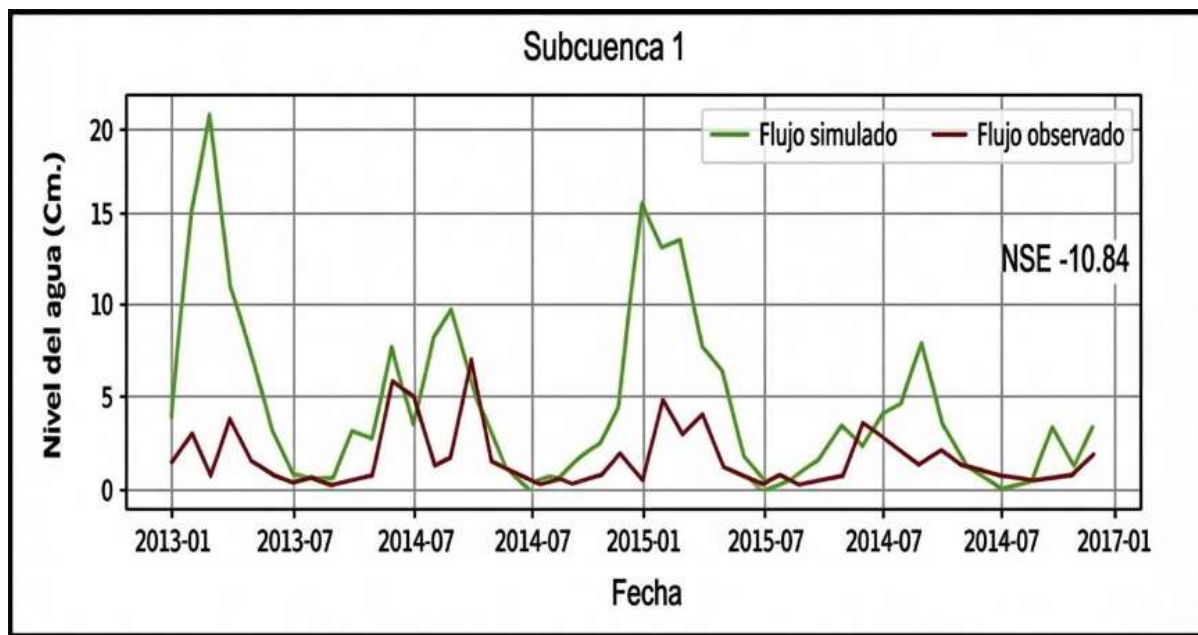


Nota. La figura refleja los valores iniciales estimados de escorrentía superficial, evapotranspiración, y flujo lateral. Fuente: modelo hidrológico SWAT.

La figura 14 muestra el comportamiento del flujo simulado y el flujo observado en base a lo determinado por el programa SWAT – CUP, donde se realizó la calibración del modelo hidrológico SWAT, el cual toma como referencia al coeficiente de eficiencia de Nash – Sutcliffe (NSE). Teniendo como base lo expuesto por Foglia et al. (2009), al determinar que los valores de este estadístico se encuentran en el rango $(-\infty \text{ y } 1)$, y para que la calibración sea válida, estos deben acercarse a la unidad. En el caso de la presente investigación se aprecia una sobreestimación del flujo simulado, esencialmente en los flujos pico. Naturalmente la cuenca muestra un ajuste inicial insuficiente, ya que el coeficiente de Nash – Sutcliffe (NSE) es negativo y aún se encuentra lejos del valor óptimo que es la unidad (1).

Figura 14

Flujo simulado y observado en el punto de aforo correspondiente a la primera simulación en la salida de la cuenca del río Rejo.



Nota. La figura refleja el comportamiento del flujo simulado y flujo observado en el periodo 2013 a 2017 generados por el modelo hidrológico SWAT.

e. Calibración del modelo SWAT

• Primera iteración

La calibración se logró en base a la disponibilidad de los datos de aforo en los períodos observados (2013 – 2016), los cuales se encuentran ubicados a la salida de la cuenca hidrográfica, estas mediciones tienen un lapso temporal del tipo mensual. Estos datos hacen referencia a la altura del agua en el flujo principal.

El proceso de calibración del modelo SWAT se ejecutó mediante la utilización del programa SWAT – CUP en la versión 5.1.6.2, y el algoritmo SUFI – 2 (Sequential Uncertainty Fitting), el cual ofrece la posibilidad de interactuar con diversos parámetros de manera simultánea. Por otra parte, según Abbaspour et al. (2004) hacen referencia que este algoritmo

cuantifica diversas incertidumbres tanto de los parámetros, datos de entrada o del modelo. SUFI – 2, representa las incertidumbres de entrada como una distribución uniforme; las incertidumbres de salida son cuantificadas como una banda de predicción del 95% de la incertidumbre.

Para dar paso al proceso de calibración se configuró el programa para la primera iteración con un total de 1 000 simulaciones, considerándose por defecto cuatro parámetros. Estos parámetros se encuentran descritos en la Tabla 20, los cuales están determinados inicialmente de forma predeterminada por el mismo programa, sin embargo, el ajuste de los coeficientes estadísticos que son definidos con cada iteración debe acercarse al valor óptimo, con el objetivo que el modelo tenga validez. Por esta razón en la presente investigación se consideró la realización de dos iteraciones más, con la finalidad de validar de forma correcta la simulación.

Tabla 18

Valores de ajuste de parámetros para calibración de la cuenca hidrográfica del Río Rejo - primera iteración

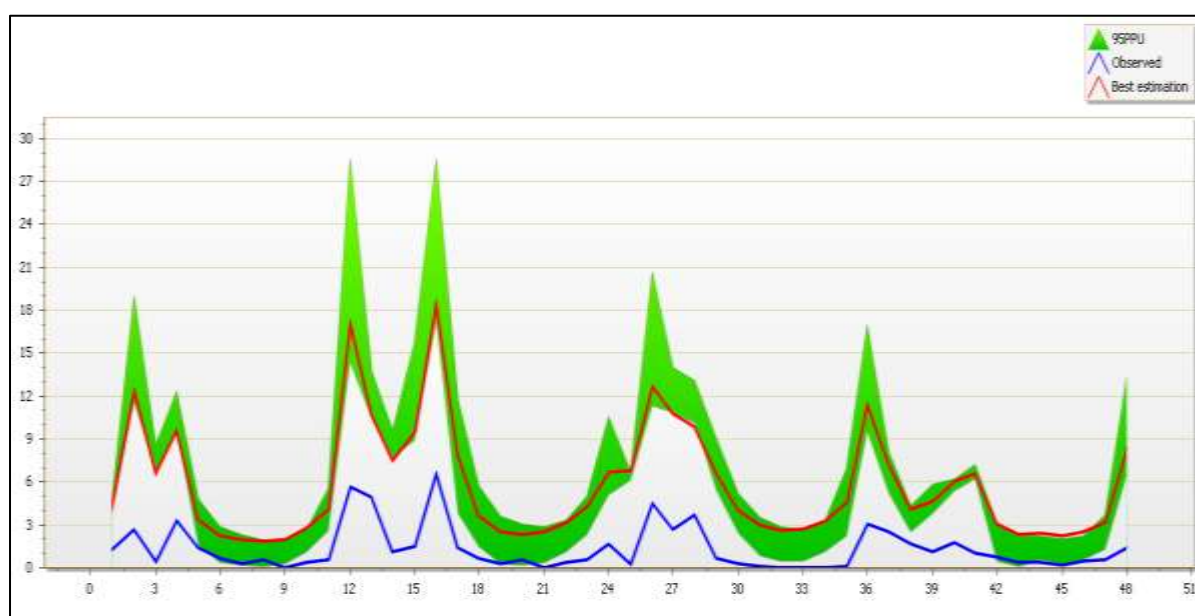
Nº	Nombre del parámetro	Símbolo	Tipo	Valor ajustado	Valor mínimo	Valor máximo
1	Curva número para condición de humedad II.	CN2	.mgt	-0.074600	-0.211933	0.062733
2	Factor alfa de la curva de recesión de agua subterránea del acuífero profundo.	ALPHA_BF	.gw	0.003500	-0.494785	0.501785
3	Tiempo de retardo para recarga del acuífero.	GW_DELAY	.gw	354.869995	192.420135	517.319885
4	Valor umbral de aporte a caudal base.	GWQMN	.gw	0.889000	0.333431	1.444569

Nota. La tabla muestra los valores de los parámetros generados mediante la primera calibración del modelo hidrológico SWAT para la cuenca hidrográfica del Río Rejo.

La Figura 15 permite observar una relación poco consistente entre el caudal observado y el caudal simulado, teniendo una subestimación por parte de este último, como se viene detallando anteriormente, la primera iteración, comúnmente nos da resultados de este tipo ya que aún no se han utilizado todos los parámetros recomendados para llegar a una correcta calibración del modelo hidrológico en condiciones de cambio de uso de suelo, donde predominan la instalación de plantaciones forestales en masa.

Figura 15

Diagrama de calibración de datos observados y simulados (primera iteración).



Nota. La figura refleja el comportamiento del flujo simulado y observado luego del ajuste de valores de los parámetros de calibración para el periodo 2013 a 2017.

- **Segunda iteración**

Carajal (2017) sugiere que los parámetros utilizados para una calibración basada en el caudal simulado y observado, en una determinada cuenca hidrográfica, son los que se muestran en la tabla 21, de esta manera, para la presente investigación, se agregó un total de 20 parámetros más, a los que se consideraron en la primera iteración, sumando un total de 24; al

igual que la primera iteración se ejecutaron 1 000 simulaciones. Para la segunda iteración es necesario configurar el programa SWAT – CUP, en base a la optimización del estadístico (Eficiencia de Nash – Sutcliffe “NSE”) ya que el ajuste que genera no solo impacta en la mejora de este, sino también en la totalidad de los parámetros estadísticos considerados para la validación del modelo.

Tabla 19

Valores de ajuste de parámetros para calibración de la cuenca hidrográfica del Río Rejo - segunda iteración

Nº	Nombre del parámetro	Símbolo	Tipo	Valor ajustado	Valor mínimo	Valor máximo
1	Factor alfa de la curva de recesión de agua subterránea del acuífero profundo.	V__ALPHA_BF	.gw	0.3342	0.0013	0.6671
2	Tiempo de demora de recarga de acuífero.	V__GW_DELAY	.gw	284.7543	142.3636	427.1451
3	Coefficiente de proceso de revapotranspiración.	V__GW_REVAP	.gw	0.107	0.0605	0.1535
4	Valor umbral de aporte de caudal base.	V__GWQMN	.gw	4902.5	2451.0774	7353.9229
5	Valor umbral de proceso de revapotranspiración.	V__REVAPMN	.gw	305.2539	152.6143	457.8935
6	Factor de compensación de demanda de ET en estratos superiores.	V__ESCO	.hru	0.2332	-0.1502	0.6167
7	Factor de compensación de la absorción de agua de la vegetación.	V__EPCO	.hru	0.357	0.0355	0.6785
8	Máximo almacenamiento de agua en el dosel de la vegetación.	V__CANMX	.hru	87.0513	43.5272	130.5754
9	Factor de retraso de la temperatura de la capa de nieve.	V__TIMP	.bsn	0.9332	0.4716	1.3948
10	Factor de fusión de la nieve el 21 de junio.	V__SMFMX	.bsn	6.5085	3.2589	9.7581
11	Factor de fusión de la nieve el 21 de diciembre	V__SMFMN	.bsn	7.957	3.9832	11.9309
12	Temperatura de la nevada	V__SFTMP	.bsn	3.2061	1.6079	4.8043
13	Temperatura base de deshielo	V__SMTMP	.bsn	4.9127	2.4612	7.3642
14	Tiempo de retraso de la escorrentía superficial	V__SURLAG	.bsn	18.9055	9.9519	27.8591
15	Conductividad hidráulica efectiva del canal	V__CH_K2	.rte	4.1348	-118.8066	127.0763
16	Valor "N" de Manning para el canal principal	V__CH_N2	.rte	0.0773	-0.0341	0.1886

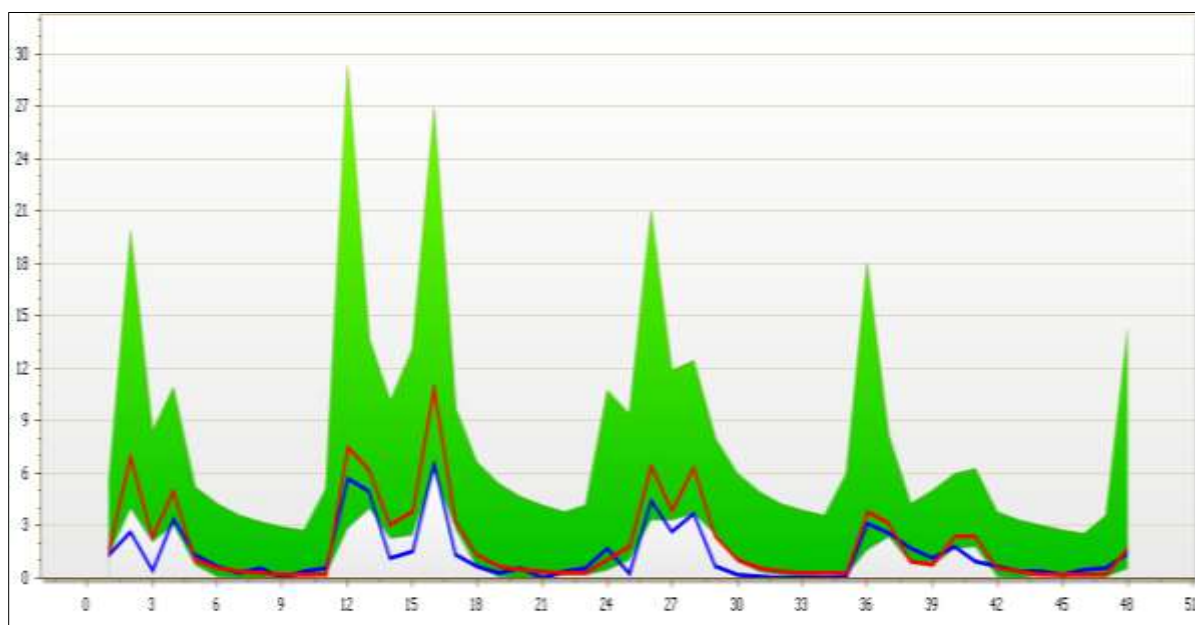
17	Número de la curva de escorrentía de SCS	R_CN2	.mgt	-0.0591	-0.2387	0.1205
18	Tasa de lapso de temperatura	V_TLAPS	.sub	-6.89	-15.3357	1.5557
19	Profundidad inicial del agua en el acuífero profundo	V_SHALLST	.gw	916.5008	458.2207	1374.7809
20	Profundidad inicial del agua en el acuífero poco profundo	V_DEEPST	.gw	842.5083	-1236.4131	2921.4297
21	Factor de percolación del acuífero profundo	V_RCHRG_DP	.gw	0.0986	-0.3521	0.5493
22	Altura inicial de las aguas subterráneas	V_GWHT	.gw	14.7666	7.3874	22.1458
23	Rendimiento específico del acuífero poco profundo	V_GW_SPYLD	.gw	0.2629	0.1364	0.3894
24	Eficiencia de mezcla biológica	V_BIOMIX	.mgt	0.9797	0.4948	1.4646

Nota. La tabla muestra los valores de los parámetros generados mediante la segunda calibración del modelo hidrológico SWAT para la cuenca hidrográfica del Río Rejo.

En el comportamiento de la Figura 16 se puede apreciar claramente la mejora entre la relación del flujo simulado y el flujo observado, a comparación con el diagrama perteneciente a la primera iteración, además gracias a esta segunda iteración los coeficientes estadísticos considerados por el programa SWAT – CUP, son modificados automáticamente, ajustándolos al mejor desempeño estadístico.

Figura 16

Diagrama de calibración de datos observados y simulados (segunda iteración).



Nota. La figura refleja el comportamiento del flujo simulado y observado luego del ajuste de valores de los parámetros de calibración para el periodo 2013 a 2017.

- **Tercera iteración**

Finalmente se realizó una tercera y última iteración donde se consideró 19 parámetros, excluyendo los que tienen menos relevancia, estos fueron nuevamente calibrados para lograr un proceso óptimo. Tomando como referencia a Carajal (2017) se decidió usar el estadístico (Eficiencia de Kling – Gupta – “KGE”) ya que permite una mejor estimación de picos formados en el hidrograma a comparación del estadístico (Eficiencia de Nash – Sutcliffe “NSE”).

Tabla 20

Valores de ajuste de parámetros para calibración de la cuenca hidrográfica del Río Rejo - tercera iteración

Nº	Nombre del parámetro	Símbolo	Tipo	Valor ajustado	Valor mínimo	Valor máximo
1	Factor alfa de la curva de recesión de agua subterránea del acuífero profundo.	V__ALPHA_BF	.gw	0.49105	0.236544	0.745556
2	Tiempo de demora de recarga de acuífero.	V__GW_DELAY	.gw	275.296844	208.61882	341.974854
3	Coefficiente de proceso de revapotranspiración.	V__GW_REVAP	.gw	0.061592	0.042682	0.080502
4	Valor umbral de aporte de caudal base.	V__GWQMN	.gw	3563.74292	2308.71704	4818.768555
5	Valor umbral de proceso de revapotranspiración.	V__REVAPMN	.gw	193.736023	137.678864	249.793182
6	Factor de compensación de demanda de ET en estratos superiores.	V__ESCO	.hru	0.310403	0.197912	0.422894
7	Factor de compensación de la absorción de agua de la vegetación.	V__EPCO	.hru	0.373379	0.186228	0.56053
8	Máximo almacenamiento de agua en el dosel de la vegetación.	V__CANMX	.hru	97.329742	79.722527	114.936958

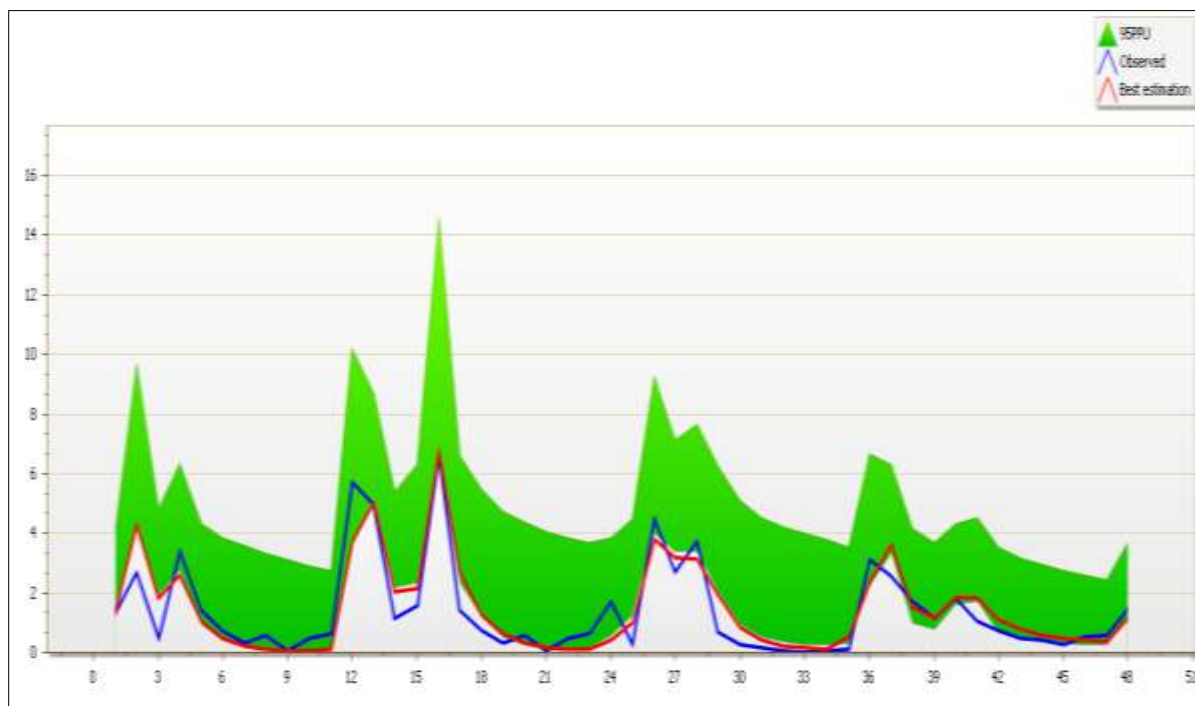
9	Tiempo de retraso de la escorrentía superficial	V__SURLAG	.bsn	10.107418	2.757682	17.457153
10	Conductividad hidráulica efectiva del canal	V__CH_K2	.rte	-180.434158	-248.184464	-112.683861
11	Valor "N" de Manning para el canal principal	V__CH_N2	.rte	0.069102	0.0165	0.121704
12	Número de la curva de escorrentía de SCS	R__CN2	.mgt	-0.217753	-0.321246	-0.11426
13	Tasa de lapso de temperatura	V__TLAPS	.sub	4.704084	0.808852	8.599316
14	Profundidad inicial del agua en el acuífero profundo	V__SHALLST	.gw	152.346649	-117.537132	422.230438
15	Profundidad inicial del agua en el acuífero poco profundo	V__DEEPST	.gw	173.174576	-1072.91309	1419.262207
16	Factor de percolación del acuífero profundo	V__RCHRG_DP	.gw	0.0265	-0.460316	0.513316
17	Altura inicial de las aguas subterráneas	V__GWHT	.gw	10.584815	5.434737	15.734893
18	Rendimiento específico del acuífero poco profundo	V__GW_SPYLD	.gw	0.112195	0.046657	0.177734
19	Eficiencia de mezcla biológica	V__BIOMIX	.mgt	0.972746	0.722791	1.222701

Nota. La tabla muestra los valores de los parámetros generados mediante la tercera calibración del modelo hidrológico SWAT para la cuenca hidrográfica del Río Rejo.

Como se puede apreciar en la Figura 17, el caudal observado y el caudal simulado ahora tienen una mejor relación, en cuanto al comportamiento de cada uno de ellos a través del tiempo; se logró ajustar la mayoría de los picos que se forman con los caudales de mayor valor, haciendo que el modelo tenga un mejor desempeño.

Figura 17

Diagrama de calibración de datos observados y simulados (tercera iteración).



Nota. La figura refleja el comportamiento del flujo simulado y observado luego del ajuste de valores de los parámetros de calibración para el periodo 2013 a 2017.

- **Valoración estadística**

Weber (2019) hace referencia que la calibración del modelo hidrológico SWAT, a través de su herramienta SWAT – CUP está conformada por al menos cuatro etapas bien definidas: evaluación de la sensibilidad de parámetros e incidencia en los resultados, selección de funciones objetivo, procedimientos de optimización de parámetros y control de indicadores de eficiencia para reoptimizar. Luego de haber realizado cada uno de los procedimientos durante la elaboración de esta investigación, y teniendo como referencia la Tabla 21 la cual señala la valoración de desempeño y su correspondiente intervalo de cada uno de los estadísticos recomendados para validar la calibración, podemos resaltar los resultados obtenidos en la Tabla 22 donde se observa la obtención de los siguientes valores; el Coeficiente de Determinación R^2 es de 0.82, considerado como bueno; eficiencia de Nash – Sutcliffe (NSE)

de 0.81, catalogado también como bueno, seguidamente el estadístico; eficiencia de King Gupta (KGE), el cual arroja un valor de 0.88, valorado como muy bueno, dentro de los rangos. Finalmente, el estadístico Porcentaje bias (PBIAS), muestra un valor de -4.9, contemplado como bueno.

Tabla 21

Esquema de valoración para evaluar el desempeño de la calibración a través de coeficientes estadísticos

Valoración de desempeño	Estadísticos recomendados			
	Coeficiente de determinación (R^2)	Eficiencia de Nash – Sutcliffe (NSE)	Eficiencia de Kling Gupta (KGE)	Porcentaje Bias (PBIAS)
Muy bueno	[0.90-1.00]	[0.75-1.00]	[0.90-1.00]	$< \pm 10$
Bueno	[0.60-0.89]	[0.65-0.75]	[0.60-0.89]	$[\pm 10 - \pm 15]$
Satisfactorio	[0.45-0.60]	[0.50-0.65]	[0.45-0.60]	$[\pm 15 - \pm 25]$
Insatisfactorio	$[<0.45]$	< 0.50	$[<0.45]$	$> \pm 25$

Nota. La tabla muestra los rangos de valoración de cada uno de los estadísticos considerados para una correcta validación del modelamiento hidrológico SWAT.

Tabla 22

Resultados de parámetros estadísticos para la calibración y validación del modelo hidrológico SWAT

Parámetros	Iteración	Valor	Valoración de desempeño
Coeficiente de determinación (R^2)	I	0.82	Bueno
	II	0.86	Bueno
	III	0.82	Bueno
Eficiencia de Nash – Sutcliffe (NSE)	I	-10.12	Insatisfactorio
	II	0.25	Bueno
	III	0.81	Muy bueno
Eficiencia de Kling Gupta (KGE)	I	-2.47	Insatisfactorio

	II	0.25	Bueno
	III	0.88	Muy bueno
Porcentaje bias (PBIAS)	I	-309.8	Insatisfactorio
	II	-49.2	Satisfactorio
	III	-4.9	Bueno

Nota. La tabla muestra los valores obtenidos de cada uno de los estadísticos y el desempeño en cada iteración realizada mediante el proceso de modelamiento hidrológico con SWAT.

4.2. Cuantificación de la estimación de los parámetros que controlan la respuesta hidrológica en la cuenca del Río Rejo

a. Cambio del uso de suelo y el efecto sobre la disponibilidad del recurso hídrico

Teniendo como referencia lo antes mencionado, en el proceso de calibración y validación del modelo hidrológico SWAT, se procedió a realizar la segunda simulación, dentro del programa QSWAT, la cual consta de dos escenarios diferentes, el primero se basa en determinar los resultados ejecutando el modelo y teniendo relevancia en el tipo de uso de suelo “plantaciones forestales” (PINE, con codificación en el modelo SWAT), ahora bien, la presente investigación tiene como objetivo determinar el efecto que tiene este uso de suelo sobre la disponibilidad del recurso hídrico en el entorno de la cuenca hidrográfica del río Rejo, por ende, en el siguiente escenario se consideró reemplazar a este tipo de uso de suelo con “terrenos agrícolas de cultivo” (AGRC, con codificación en el modelo SWAT), y de este modo comparar los resultados generados en cada escenario, teniendo como prioridad el análisis individual de cada parámetro que tienen lugar dentro del proceso de balance hídrico de la cuenca hidrográfica del Río Rejo.

La Tabla 23 hace referencia a cada uno de los tipos de uso de suelo que se encontró dentro de la cuenca, cada uno de estos posee un código único y referencial dentro de la base de datos del modelo, el cual a su vez contiene características específicas.

Tabla 23*Tipo de Uso de suelo dentro de la cuenca hidrográfica del Río Rejo*

Uso	Descripción	Uso SWAT	Ha	%
Terrenos agrícolas de cultivo genérico	Áreas cultivadas de forma intermitente en base a la disponibilidad de lluvias en la cuenca, mayormente dedicada a la subsistencia familiar.	AGRL	3940.29	17.32
Plantaciones forestales	Áreas destinadas a plantaciones forestales, en su mayoría con la especie Pinus sp.	PINE	6625.08	29.13
Terrenos agrícolas de cultivo cercano	Áreas cultivadas de forma permanente en base a la disponibilidad de lluvias en la cuenca, mayormente dedicada a la subsistencia familiar.	AGRC	6625.08	29.13
Pastos naturales	Áreas con vegetación natural, mayormente destinada a la crianza de ganado vacuno.	PAST	10534.5	46.31
Minería	Áreas destinadas a la explotación minera, se considera como parte de las instalaciones de la empresa Yanacocha.	SWRN	1616.13	7.11
Cuerpos de agua	Áreas de reducida extensión que alternan de forma aleatoria dentro de la cuenca.	WATR	30.24	0.13
TOTAL			22 746.24	100

Luego de simular los dos escenarios, el modelamiento hidrológico con la herramienta SWAT generó una cantidad considerable de datos, los cuales tienen un sustento estadístico confiable, producto de la calibración y validación del modelo. En este caso considerando los objetivos de la investigación, nos centramos en la información obtenida del recurso hídrico y de los parámetros que lo conforman en función del balance hídrico.

b. Parámetros que interactúan dentro del balance hídrico

Gonzales et al. (2021), menciona que en la Tabla 24, se muestra todos los parámetros del balance hídrico que se genera mediante la aplicación de la herramienta SWAT. Sin embargo, Bocel (2016) considera que el agua de entrada está representada por la precipitación (Precip_mm) en milímetros de agua que ingresa en la cuenca. Asimismo, el autor hace referencia que el agua de salida está representada por el agua producida, que es la sumatoria,

de la escorrentía superficial (Surq_mm), flujo lateral (Latq_mm) y flujo subterráneo (GWQ_mm), más la evapotranspiración (ET_mm) y el agua almacenada que está representada por la percolación (Perc_mm). De esta manera la presente investigación se centró en el análisis de estos parámetros siendo los más resaltantes dentro del proceso del balance hídrico.

Tabla 24

Parámetros del balance hídrico obtenidos del proceso de modelamiento hidrológico con SWAT de la cuenca hidrográfica del Río Rejo

Nº	Símbolo SWAT	Variable	Unidad
1	PRECIP	Cantidad total de precipitación que cae sobre la HRU durante el paso del tiempo.	mm.
2	PET	Evapotranspiración potencial.	mm.
3	ET	Evapotranspiración real (evaporación del suelo y transpiración de la planta) de la HRU durante el paso del tiempo.	mm.
4	SW_INIT	Contenido de agua inicial en el suelo. Para la producción diaria, esta columna proporciona la cantidad de agua en el perfil del suelo al comienzo del día.	mm.
5	SW_END	Contenido de agua final en el suelo. Cantidad de agua en el perfil del suelo al final del período de tiempo (día, mes o año).	mm.
6	PERC	Agua que percola más allá de la zona de raíz del tipo de cobertura vegetativa, durante el paso del tiempo.	mm.
7	GW_RCHG	Recarga de acuíferos poco profundos.	mm.
8	DA_RCHG	Recarga de acuíferos profundos.	mm.
9	REVAP	Agua en el acuífero poco profundo retornando a la zona de raíz del tipo de cobertura vegetal en respuesta a un déficit de humedad durante el paso de tiempo.	mm.
10	SA_ST	Almacenamiento superficial de acuífero.	mm.
11	DA_ST	Almacenamiento profundo del acuífero.	mm.
12	SURQ_GEN	Escurrimiento superficial generado en HRU durante el paso del tiempo.	mm.
13	SURQ_CNT	Contribución de escurrimiento superficial al caudal en el canal principal durante el paso del tiempo.	mm.

14	LATQ	Contribución del flujo lateral al caudal.	mm.
15	GW_Q	Contribución del agua subterránea al caudal.	mm.
16	WYLD	Rendimiento o producción de agua.	mm.

Nota. La tabla muestra la descripción cada una de las variables obtenidas mediante el proceso de modelamiento hidrológico con SWAT. Fuente: Gonzales et al. (2021).

- **Escurrimiento superficial (Surq_mm)**

Neitsch et al. (2005b) señalan que el modelo hidrológico SWAT emplea distintos algoritmos para estimar la escurrimiento superficial, en función de las características físicas de la cuenca hidrográfica y de las condiciones meteorológicas predominantes. En el presente estudio, se utilizó el método del Número de Curva (CN) del Servicio de Conservación de Suelos (SCS), el cual se basa en la capacidad de infiltración del suelo y en la magnitud de la precipitación registrada en la cuenca.

Los valores estimados de escurrimiento superficial se presentan en la Figura 18, los cuales corresponden a un análisis anual comprendido entre los años 1982 y 2020, abarcando un periodo de 39 años. Cabe señalar que, conforme a las recomendaciones del modelo SWAT, se consideró un periodo de precalentamiento de tres años, motivo por el cual se excluyeron los datos de precipitación y temperatura correspondientes a los años 1979 a 1981.

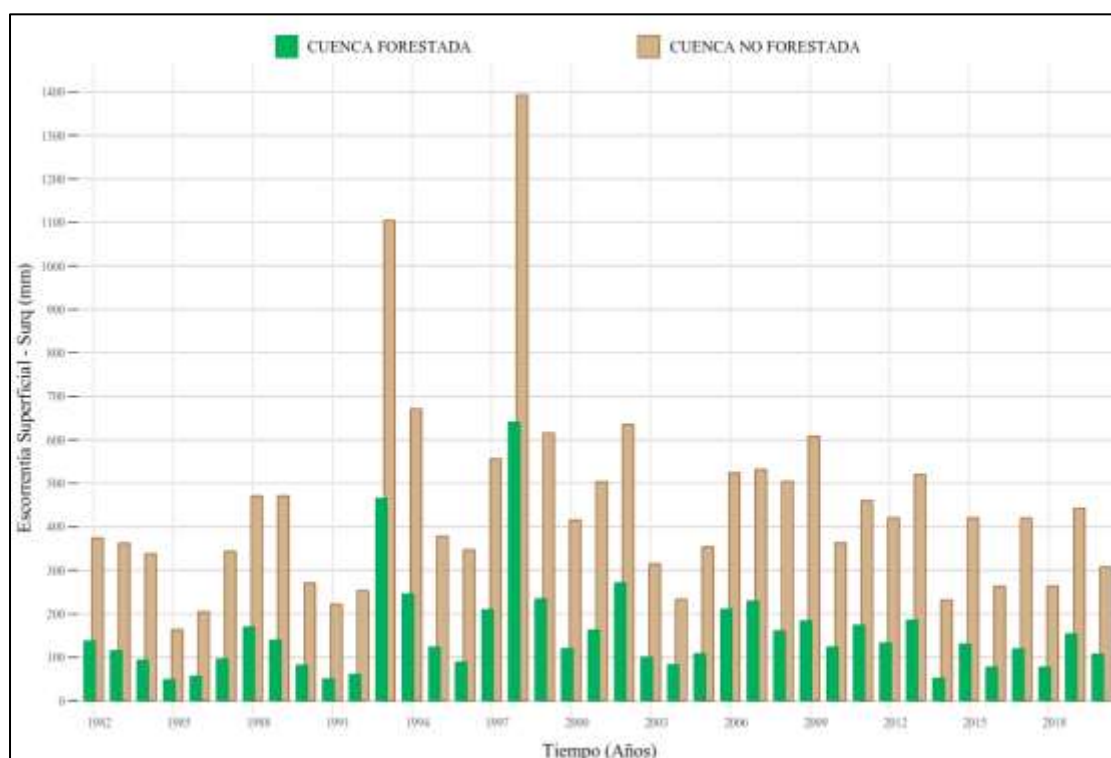
Los resultados obtenidos evidencian que el cambio en el uso del suelo en la cuenca del río Rejo, producto del establecimiento de plantaciones forestales (principalmente de *Pinus* sp.), generó una reducción significativa en la escurrimiento superficial. En términos cuantitativos, se observó una disminución aproximada del 54 % respecto al escenario base sin cobertura forestal. Estos hallazgos son consistentes con los resultados reportados por Manderso (2019), quien, mediante el uso del modelo SWAT, demostró que la presencia de cobertura forestal en una cuenca influye de manera significativa en la reducción de la escurrimiento superficial. En su

estudio, se compararon escenarios con diferentes tipos de cobertura, concluyendo que las cuencas forestadas presentan menores valores de escorrentía superficial en comparación con aquellas sin cobertura arbórea. Esta reducción se atribuye a la capacidad de la vegetación forestal para interceptar y retener la precipitación, así como a la mejora en la infiltración y almacenamiento de agua en los suelos forestales.

En la Figura 18 se identifican los años 1993 y 1998 como los periodos con mayor escorrentía superficial estimada. En 1998, se registró una lámina de agua de 1,393.03 mm en el escenario sin plantaciones forestales, mientras que en el escenario con cobertura forestal el valor estimado fue de 640.70 mm. De manera similar, en 1993 se estimó una escorrentía de 1,104.93 mm para el escenario sin cobertura forestal, y de 465.18 mm para el escenario con presencia de plantaciones forestales.

Figura 18

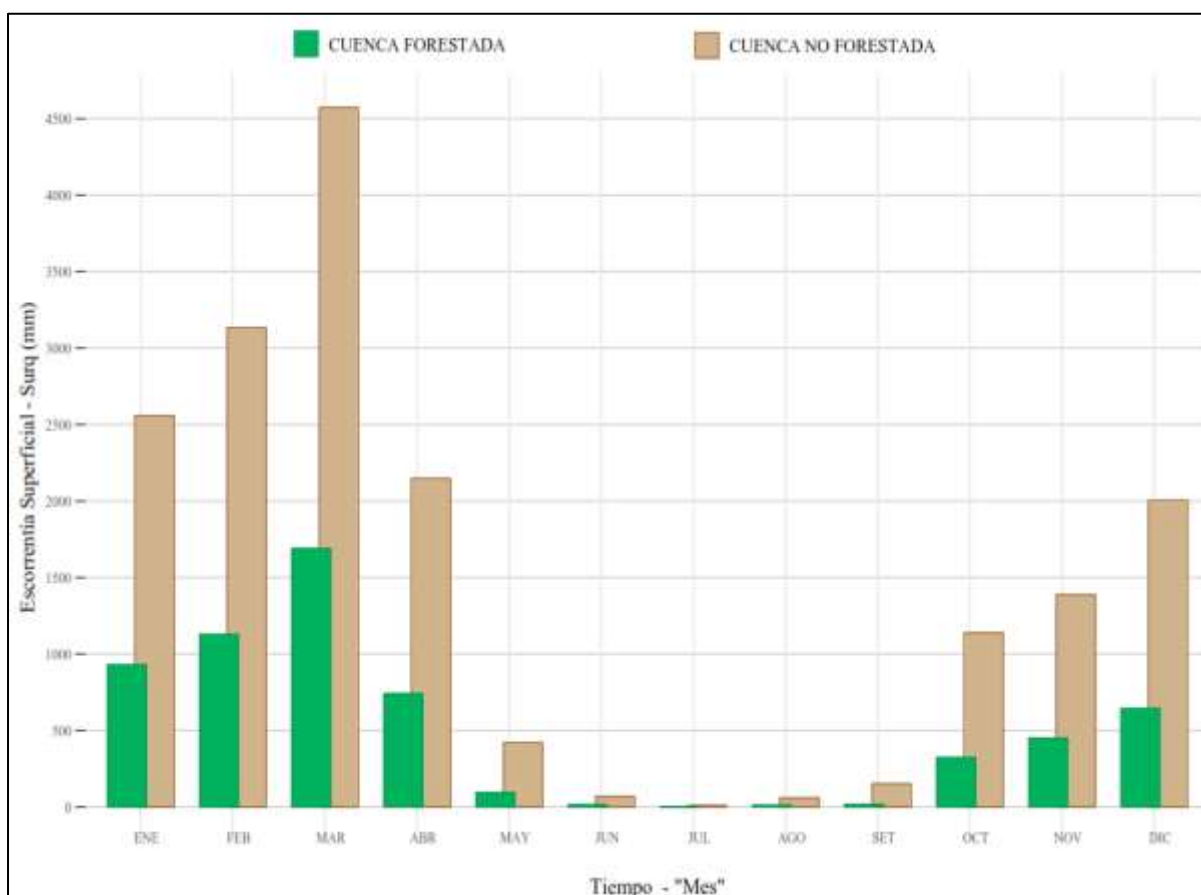
Escorrentía superficial estimada - Cuenca Forestada y Cuenca no Forestada (Período Anual 1982 - 2020).



En cuanto a los resultados mensuales estimados de escorrentía superficial, se determinó que el escenario con establecimiento de plantaciones forestales presenta una reducción aproximada del 63 % en comparación con el escenario sin alteración del uso del suelo. Esta disminución refleja el impacto significativo que tiene la cobertura forestal sobre la dinámica hidrológica de la cuenca. La Figura 19 muestra los valores mensuales más elevados de escorrentía superficial estimada para ambos escenarios. En el escenario sin cobertura forestal, los meses con mayor escorrentía fueron enero, febrero y marzo, con láminas de agua de 2,559.15 mm, 3,134.16 mm y 4,572.39 mm, respectivamente. En contraste, en el escenario con cobertura forestal, los valores máximos se registraron también en los mismos meses, pero con láminas de agua considerablemente menores: enero con 931.17 mm, febrero con 1,129.38 mm y marzo con 1,690.47 mm. Estos resultados evidencian la capacidad de las plantaciones forestales para reducir la escorrentía superficial, principalmente a través de procesos de interceptación, infiltración y almacenamiento hídrico en el suelo, lo que contribuye a una mayor regulación del flujo superficial en la cuenca

Figura 19

Escorrentía superficial estimada - Cuenca Forestada y Cuenca no Forestada (Período Mensual 1982 - 2020).



- **Flujo lateral (Latq_mm)**

Neitsch et al. (2005b) definen el flujo lateral en el modelo SWAT como la porción de agua que se desplaza horizontalmente a través del perfil del suelo antes de alcanzar un cuerpo de agua principal, como ríos o quebradas. Este tipo de flujo ocurre cuando la capacidad de infiltración del suelo se ve superada, ya sea por precipitaciones intensas o por saturación del terreno. En tales condiciones, el exceso de agua no se infiltra verticalmente, sino que se moviliza lateralmente hasta encontrar una vía de salida superficial.

Las estimaciones anuales del flujo lateral en la cuenca del río Rejo indican que el escenario con intervención mediante el establecimiento de plantaciones forestales presenta

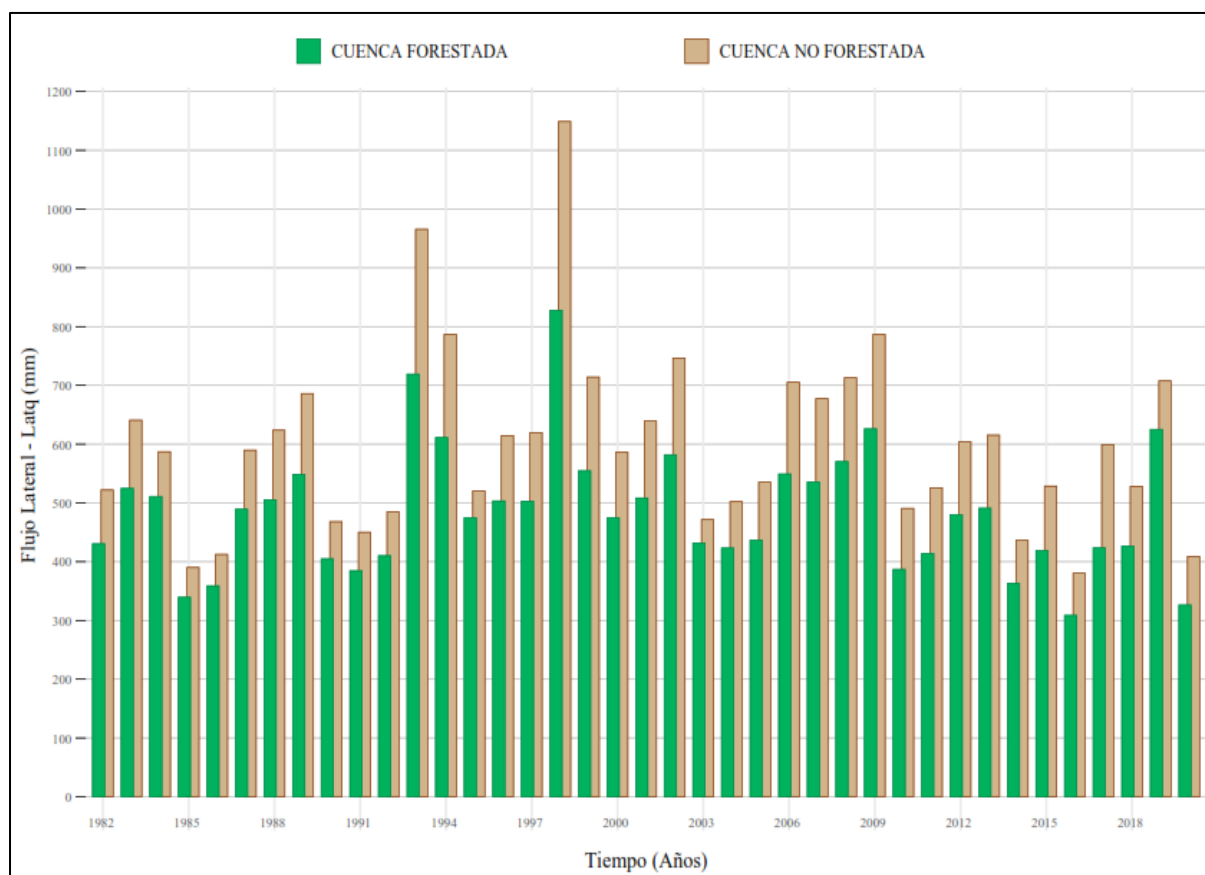
valores aproximadamente 28 % inferiores en comparación con el escenario sin cambio de uso del suelo. Esta diferencia refleja el efecto regulador de la cobertura forestal sobre los procesos de escorrentía y transporte hídrico.

Estos resultados son consistentes con los hallazgos de Zhang et al. (2016), quienes utilizaron el modelo SWAT para evaluar el impacto del cambio de uso del suelo en una cuenca montañosa semiárida. Su estudio demostró que la conversión de áreas forestadas a no forestadas incrementa significativamente el flujo lateral, debido a la reducción en la capacidad de interceptación de la vegetación y al aumento de la exposición directa del suelo a la lluvia, lo que favorece la escorrentía superficial y la erosión. En consecuencia, se resalta la importancia de conservar la cobertura forestal como una estrategia efectiva para mitigar el flujo lateral y preservar los recursos hídricos en las cuencas hidrográficas.

La Figura 20 muestra que los años con mayor flujo lateral estimado fueron 1998 y 1993. En el escenario sin cobertura forestal, se registraron láminas de agua de 1,148.96 mm y 965.64 mm, respectivamente. En contraste, en el escenario con establecimiento de plantaciones forestales, los valores fueron de 827.69 mm en 1998 y 719.07 mm en 1993, evidenciando una reducción significativa atribuida a la presencia de vegetación forestal.

Figura 20

Flujo Lateral estimado – Cuenca Forestada y Cuenca no Forestada (Período Anual 1982 - 2020).

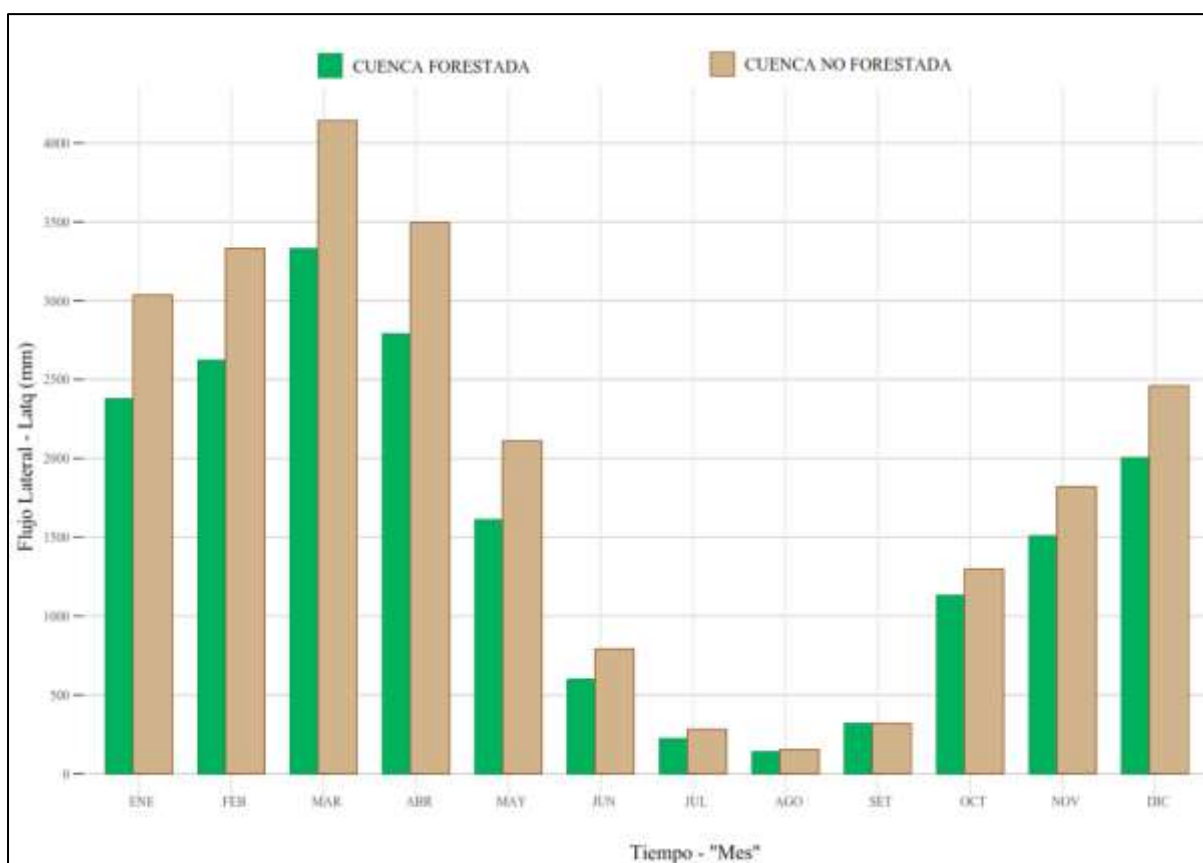


De acuerdo con los valores mensuales obtenidos y presentados en la Figura 21, se observa que el flujo lateral estimado en el escenario con establecimiento de plantaciones forestales es aproximadamente un 20 % inferior al registrado en el escenario sin intervención por cambio de uso del suelo. Esta diferencia evidencia el efecto regulador de la cobertura forestal sobre el comportamiento hidrológico de la cuenca. En el escenario sin cobertura forestal, los meses con mayor flujo lateral estimado fueron febrero, marzo y abril, con láminas de agua de 3,332.90 mm, 4,141.56 mm y 3,497.49 mm, respectivamente. En contraste, en el escenario con presencia de plantaciones forestales, los valores máximos también se registraron en los mismos meses, aunque con magnitudes menores: febrero con 2,622.23 mm, marzo con 3,329.68 mm y abril con 2,789.98 mm. Estos resultados refuerzan la evidencia de que la

cobertura forestal contribuye a reducir el flujo lateral, principalmente mediante procesos de interceptación, mejora en la infiltración y mayor retención de agua en el perfil del suelo, lo que resulta en una menor escorrentía lateral hacia los cuerpos de agua superficiales

Figura 21

Flujo Lateral estimado – Cuenca Forestada y Cuenca no Forestada (Período Mensual 1982 - 2020).



- **Flujo subterráneo (GWQ_{mm})**

El flujo subterráneo estimado a nivel anual en el escenario con establecimiento de plantaciones forestales supera en aproximadamente un 20 % los valores obtenidos en el escenario sin intervención por cambio de uso del suelo. Este incremento está en concordancia con los resultados reportados por Kibii et al. (2021), quienes demostraron que, a medida que aumenta la proporción de cobertura forestal, también se incrementa la proporción del flujo base

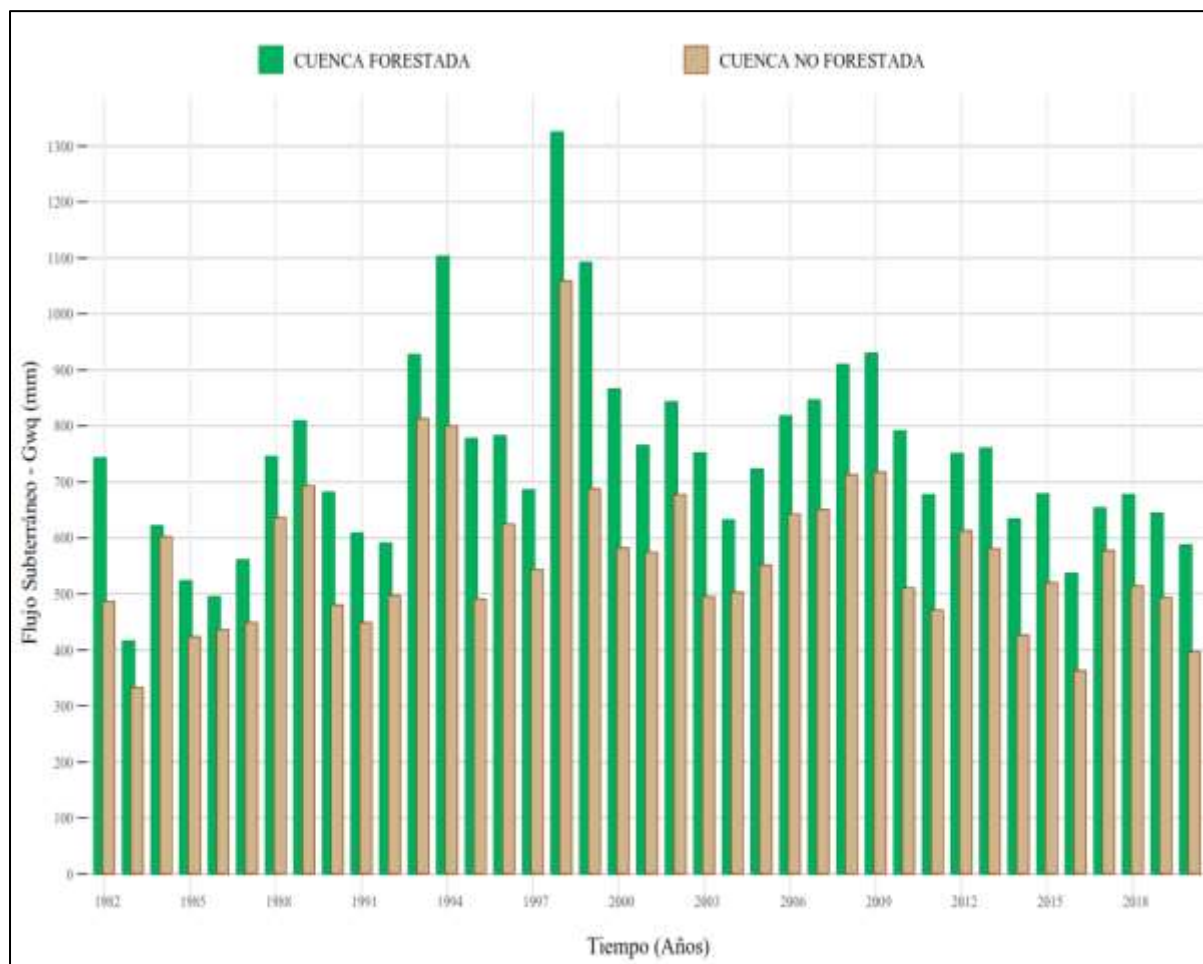
respecto al escurrimiento total. Asimismo, se observó una tendencia creciente en los componentes de flujo intermedio y flujo subterráneo, atribuida al aumento del índice de área foliar generado por la vegetación forestal. Este cambio favorece una mayor infiltración del agua en el suelo y un incremento en el almacenamiento hídrico subterráneo.

Según Neitsch et al. (2005b), el flujo subterráneo se refiere al movimiento del agua que ocurre por debajo de la superficie del suelo, desplazándose a través de poros y fisuras, principalmente en la zona no saturada o subsuperficial. Este flujo puede seguir diversas rutas: puede infiltrarse hacia el nivel freático —donde el suelo está completamente saturado— y desde allí continuar hacia acuíferos, manantiales o pozos, o bien descargar directamente en cuerpos de agua superficiales como ríos o quebradas.

La Figura 22 presenta los valores más altos de flujo subterráneo estimado en el escenario con cobertura forestal, destacando los años 1998 y 1994 con láminas de agua de 1,324.99 mm y 1,103.48 mm, respectivamente. En contraste, en el escenario sin establecimiento de plantaciones forestales, los valores máximos también se registraron en los mismos años, pero con magnitudes inferiores: 1,059.18 mm en 1998 y 800.06 mm en 1994. Estos resultados refuerzan la evidencia de que la cobertura forestal contribuye significativamente al aumento del flujo subterráneo, favoreciendo la recarga hídrica y la regulación del ciclo hidrológico en la cuenca.

Figura 22

Flujo Subterráneo estimado – Cuenca Forestada y Cuenca no Forestada (Período Anual 1982-2020).

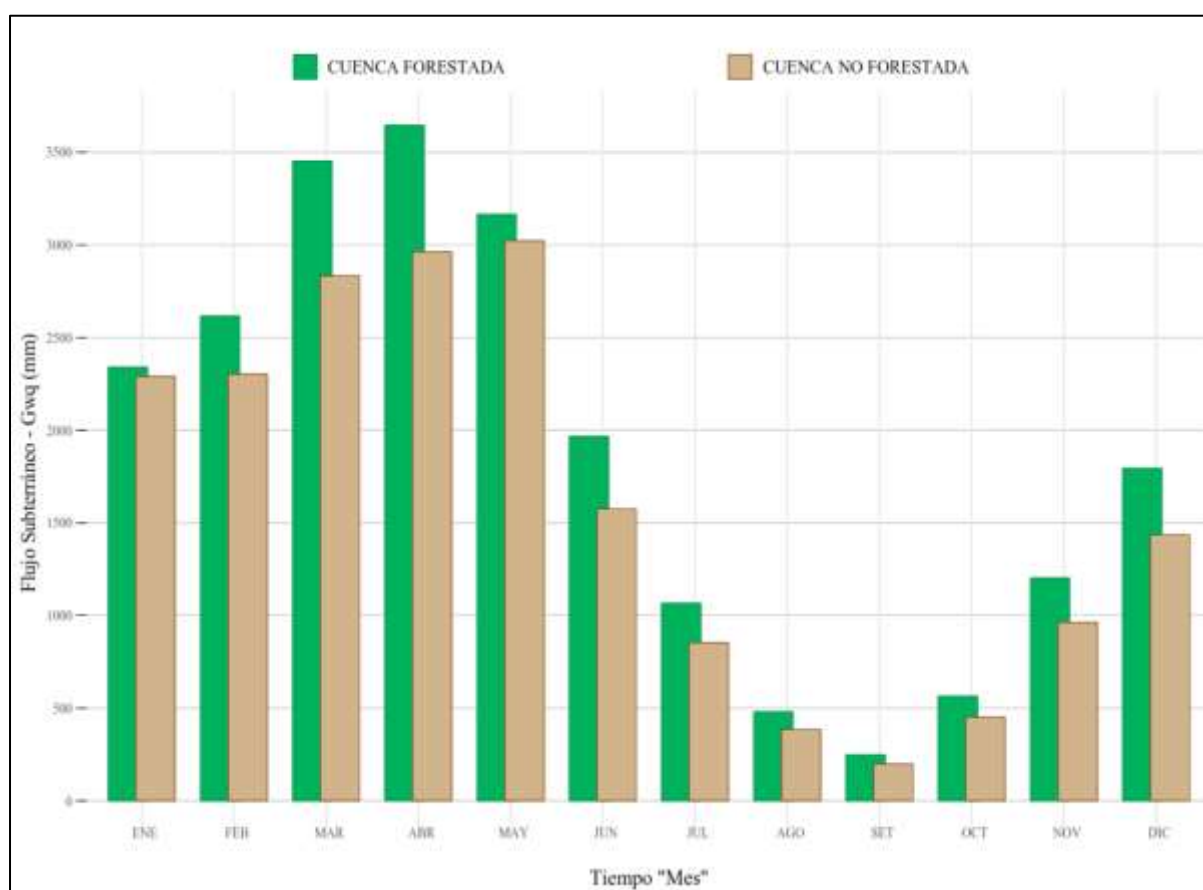


En el análisis mensual del flujo subterráneo, se observa que los valores estimados en el escenario con establecimiento de plantaciones forestales superan en aproximadamente un 20 % a los registrados en el escenario sin intervención por cambio de uso del suelo, según lo mostrado en la Figura 23. Esta diferencia refleja el efecto positivo de la cobertura forestal sobre la infiltración y el almacenamiento hídrico subterráneo. Los meses con mayor flujo subterráneo estimado en el escenario con cobertura forestal fueron abril, marzo y mayo, con láminas de agua de 3,645.89 mm, 3,453.83 mm y 3,165.47 mm, respectivamente. En contraste, en el escenario sin establecimiento de plantaciones forestales, los valores máximos también se registraron en los mismos meses, pero con magnitudes inferiores: abril con 2,963.06 mm, mayo

con 3,022.78 mm y marzo con 2,833.11 mm. Estos resultados refuerzan la evidencia de que el establecimiento de cobertura forestal contribuye significativamente al incremento del flujo subterráneo, favoreciendo la recarga de acuíferos y la regulación del ciclo hidrológico en la cuenca.

Figura 23

Flujo Subterráneo estimado – Cuenca Forestada y Cuenca no Forestada (Período Mensual 1982 - 2020).



- **Percolación (Perc_mm)**

Arnold y Fohrer (2005) definen la percolación como el movimiento vertical del agua a través del perfil del suelo, que culmina en su infiltración hacia los acuíferos subterráneos. Este proceso constituye una salida de agua desde las capas superiores del suelo hacia la zona

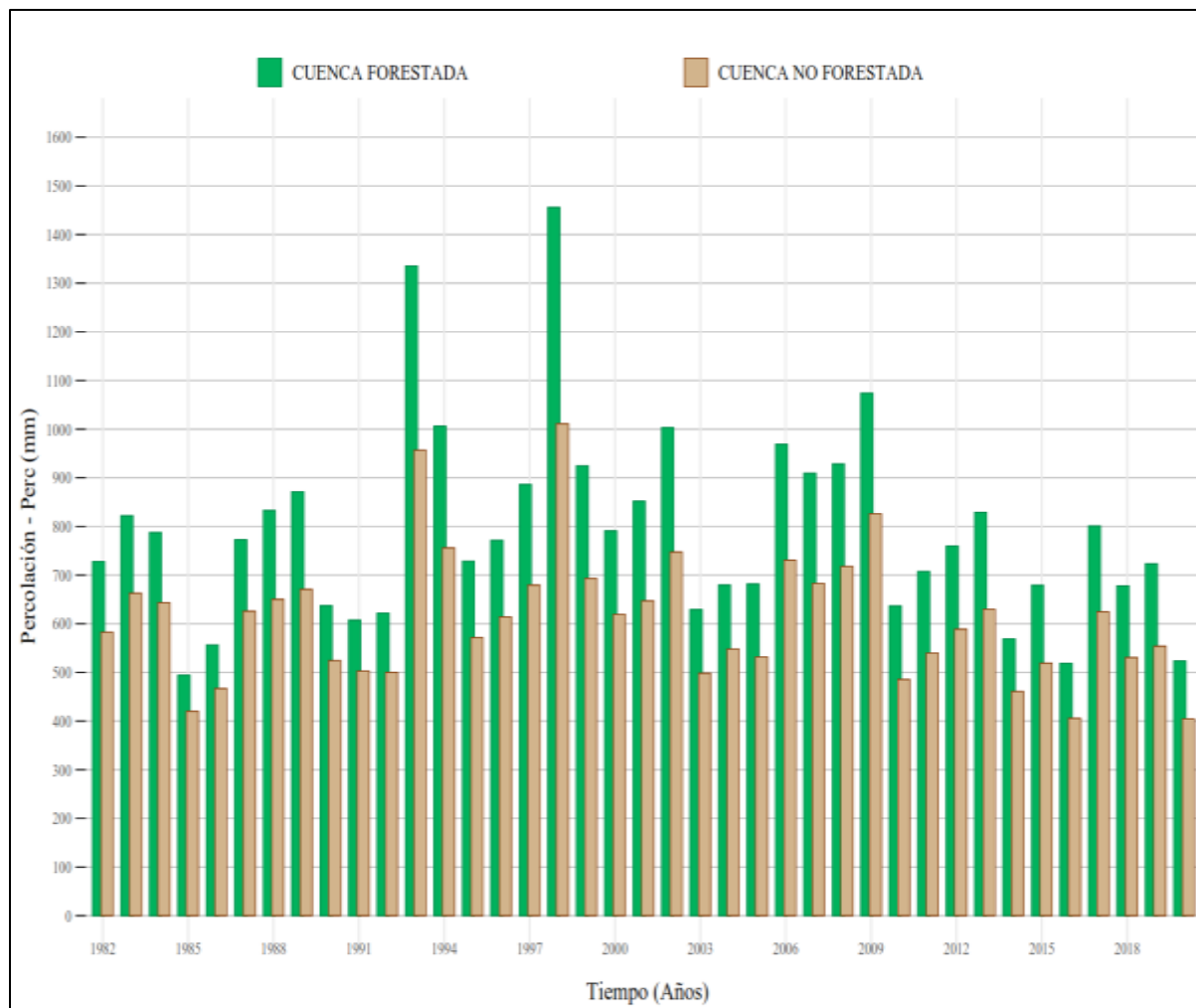
saturada, y representa un componente clave dentro del balance hídrico modelado por la herramienta SWAT, al influir directamente en la recarga de los acuíferos.

Los valores anuales estimados de percolación en el escenario con establecimiento de plantaciones forestales superan en aproximadamente un 31 % a los registrados en el escenario sin intervención por cambio de uso del suelo. Esta diferencia es coherente con los resultados obtenidos por Kibii et al. (2021), quienes señalan que la implementación de prácticas de manejo sostenible del territorio —como el establecimiento de especies forestales (bambú, *Pinus* sp., entre otras) y la recuperación de tierras degradadas— genera un incremento significativo en la cobertura vegetal. Este aumento contribuye a reducir el escurrimiento superficial, mejorar la recarga de aguas subterráneas y potenciar la percolación dentro de la cuenca hidrográfica. Los autores destacan que estas prácticas deben mantenerse y fortalecerse hasta alcanzar niveles sostenibles de recarga acuífera.

Según lo mostrado en la Figura 24, los valores más altos de percolación en el escenario con cobertura forestal se registraron en los años 1998 y 1993, con láminas de agua acumuladas de 1,455.87 mm y 1,335.21 mm, respectivamente. En contraste, en el escenario sin establecimiento de plantaciones forestales, los valores máximos también se observaron en los mismos años, pero con magnitudes inferiores: 1,011.09 mm en 1998 y 956.74 mm en 1993.

Figura 24

Percolación estimada – Cuenca Forestada y Cuenca no Forestada (Período Anual 1982-2020).



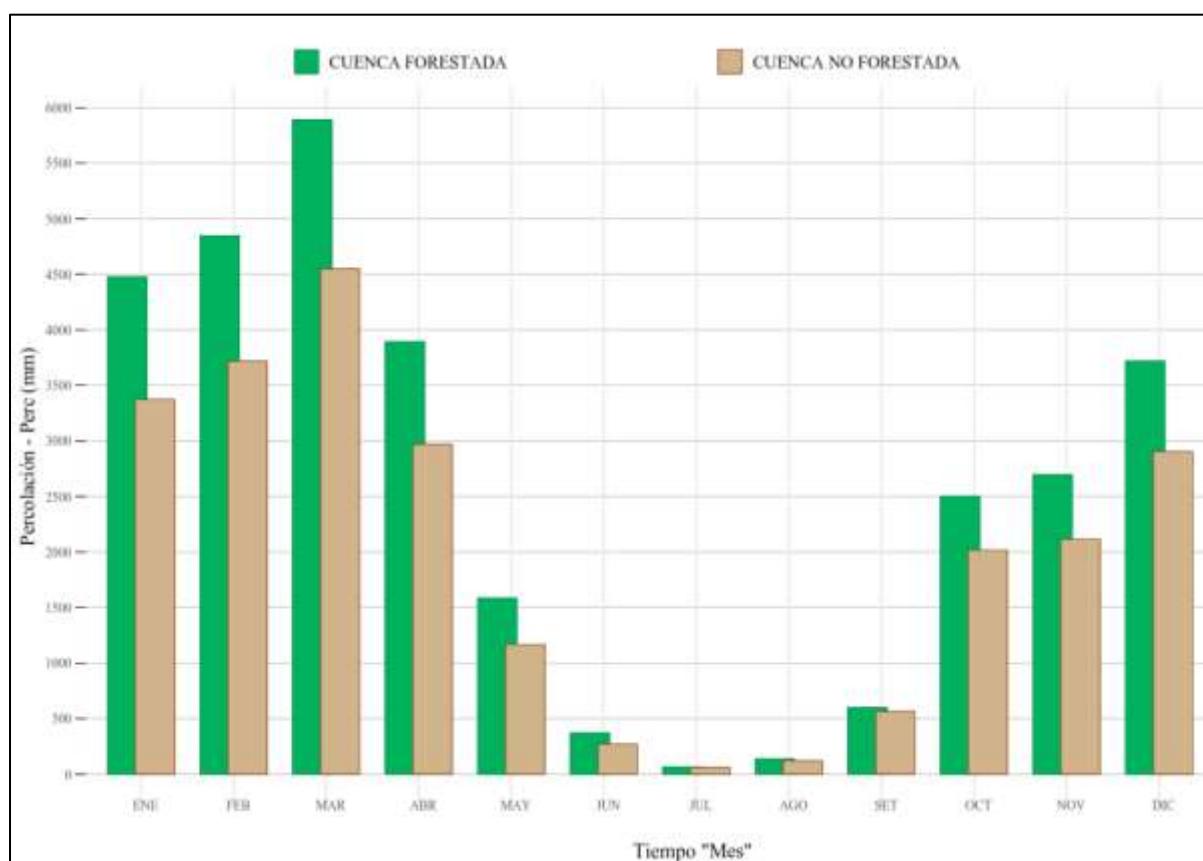
Según el análisis mensual de los valores estimados de percolación, presentados en la Figura 25, se observa que el escenario con intervención mediante el establecimiento de plantaciones forestales registra un incremento aproximado del 23 % en comparación con el escenario sin cobertura forestal. Esta diferencia refleja el efecto positivo de la vegetación forestal sobre los procesos de infiltración y recarga hídrica. Los meses con mayor acumulación de percolación en el escenario con cobertura forestal fueron marzo, febrero y enero, con láminas de agua de 5,889.88 mm, 4,846.31 mm y 4,477.39 mm, respectivamente. En contraste, en el escenario sin establecimiento de plantaciones forestales, los valores máximos también se

registraron en los mismos meses, pero con magnitudes inferiores: marzo con 4,548.48 mm, febrero con 3,717.62 mm y enero con 3,372.26 mm.

Estos resultados refuerzan la evidencia de que el establecimiento de cobertura forestal contribuye significativamente al aumento de la percolación mensual, favoreciendo la recarga de acuíferos y la regulación del ciclo hidrológico en la cuenca.

Figura 25

Percolación estimada – Cuenca Forestada y Cuenca no Forestada (Período Mensual 1982 - 2020).



- **Evapotranspiración (Et_mm)**

Arnold y Fohrer (2005) definen la evapotranspiración como un proceso hidrológico modelado en la herramienta SWAT, que representa la cantidad total de agua que se pierde por evaporación desde la superficie del suelo y por transpiración a través de la vegetación. Este

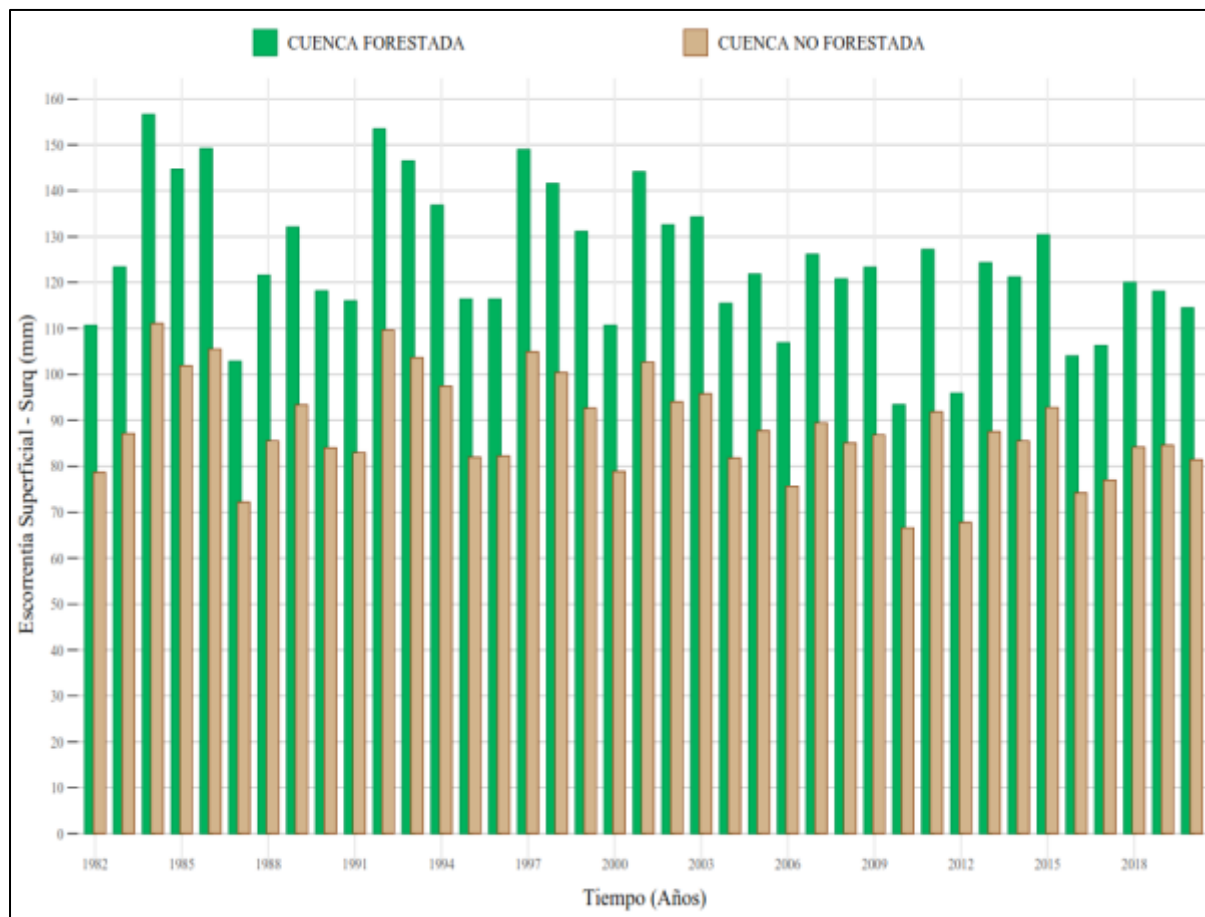
proceso está influenciado por diversos factores, entre ellos la precipitación, la temperatura, la humedad del suelo y la cobertura vegetal. Además, los autores destacan que la evapotranspiración constituye un componente esencial del ciclo hidrológico y es determinante en el balance hídrico de una cuenca.

Los valores anuales estimados de evapotranspiración, obtenidos mediante la aplicación del modelo SWAT, se presentan en la Figura 26. En el escenario con establecimiento de plantaciones forestales, los valores superan en aproximadamente un 30 % a los registrados en el escenario sin cambio de cobertura vegetal. Estos resultados coinciden con lo reportado por Martínez (2021), quien señala que el incremento en la evapotranspiración está directamente relacionado con el aumento de la cobertura forestal proyectada en escenarios de cambio de uso del suelo (LUCC, por sus siglas en inglés). Dicho incremento se atribuye a la mayor demanda hídrica de las especies forestales, así como al aumento en la transpiración vegetal.

La Figura 26 muestra que los valores máximos de evapotranspiración en el escenario con cobertura forestal se registraron en los años 1984 y 1992, con láminas de agua acumuladas de 156.60 mm y 153.46 mm, respectivamente. En contraste, en el escenario sin establecimiento de plantaciones forestales, los valores máximos para esos mismos años fueron de 111.08 mm en 1984 y 109.65 mm en 1992.

Figura 26

Evapotranspiración estimada – Cuenca Forestada y Cuenca no Forestada (Período Anual 1982 - 2020).



La Figura 27 presenta los valores mensuales estimados de evapotranspiración, evidenciando que el escenario con establecimiento de plantaciones forestales supera en aproximadamente un 35 % los valores registrados en el escenario sin cambio de cobertura vegetal. Esta diferencia refleja el efecto de la vegetación forestal sobre la demanda hídrica del sistema, principalmente por el incremento en la transpiración y la evaporación desde la superficie del suelo.

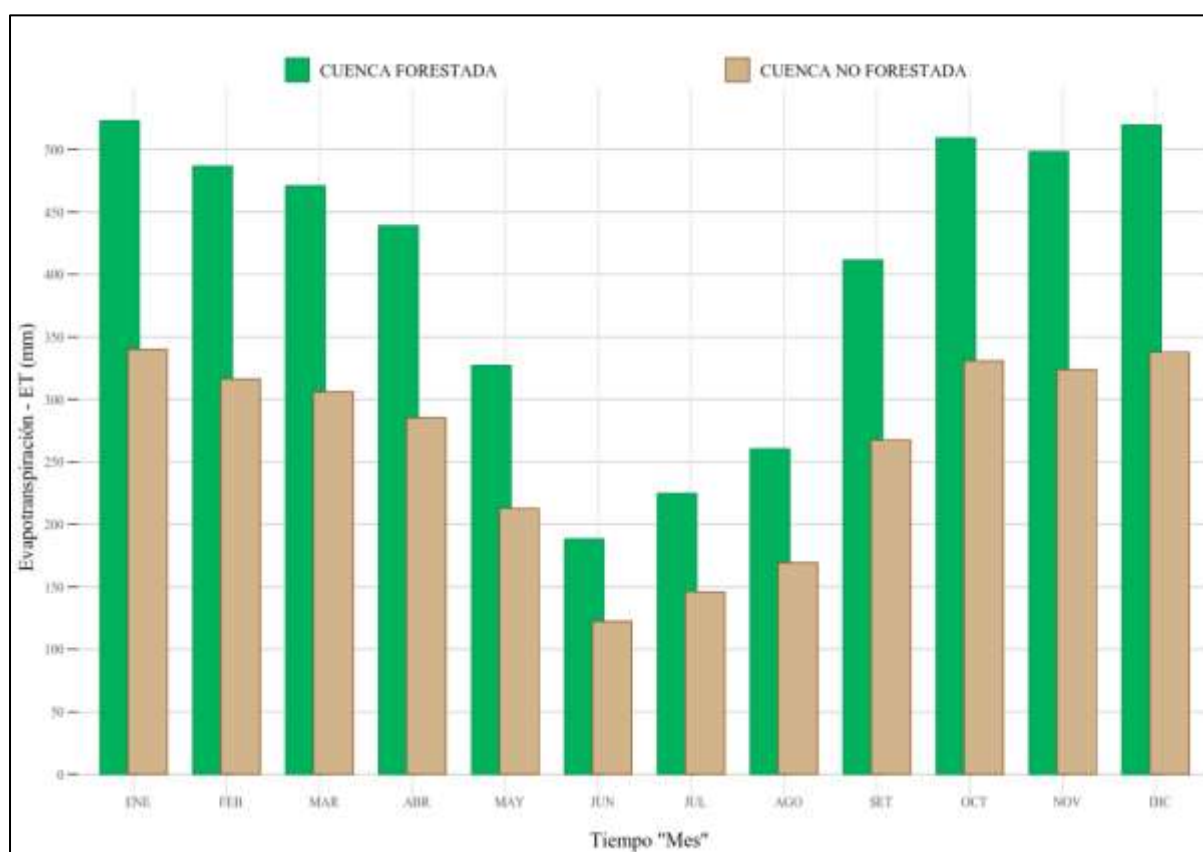
En el escenario con cobertura forestal, los meses con mayor acumulación de evapotranspiración fueron enero, febrero y marzo, con láminas de agua de 523.02 mm, 486.64 mm y 470.83 mm, respectivamente. En contraste, en el escenario sin establecimiento de

plantaciones forestales, los valores máximos también se registraron en los mismos meses, pero con magnitudes inferiores: enero con 339.96 mm, febrero con 316.31 mm y marzo con 306.04 mm.

Estos resultados refuerzan la evidencia de que el aumento en la cobertura vegetal, especialmente mediante especies forestales, incrementa la evapotranspiración mensual, lo que tiene implicancias directas en el balance hídrico de la cuenca y en la planificación de recursos hídricos.

Figura 27

Evapotranspiración estimada – Cuenca Forestada y Cuenca no Forestada (Período Mensual 1982 - 2020).



CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- La implementación de plantaciones forestales en la cuenca del Río Rejo trasciende el simple cambio de uso de suelo; representa la restauración de un capital natural capaz de generar valiosos servicios ecosistémicos, particularmente y en específico los de regulación hídrica. Los resultados cuantitativos de este estudio no son meras cifras, sino la evidencia directa de los mecanismos biofísicos a través de los cuales el ecosistema forestal modula el ciclo hidrológico, generando beneficios tangibles para la cuenca y sus habitantes.
- Los resultados obtenidos evidencian que la implementación de plantaciones forestales en la cuenca del río Rejo genera transformaciones sustanciales en la dinámica hídrica, las cuales pueden ser interpretadas desde el marco de los **servicios ecosistémicos**. En particular, se observa una **reducción del 65.6% en la escorrentía superficial** y una **disminución del 19.7% en el flujo lateral**, lo que indica una menor velocidad de escurrimiento y una mayor capacidad del suelo para retener el agua. Estos cambios reflejan una mejora en el servicio de **regulación hídrica**, al disminuir el riesgo de erosión, transporte de sedimentos y eventos de escorrentía intensa.
- En contraste, el **flujo subterráneo se incrementa en un 24%**, mientras que la **percolación aumenta en un 22.6%**, lo que evidencia una mayor infiltración del agua hacia capas profundas del suelo. Este comportamiento favorece la **recarga de acuíferos**, fortaleciendo el servicio de **provisión de agua subterránea**, especialmente relevante en contextos de estacionalidad hídrica o sequías prolongadas. La vegetación forestal actúa como un regulador natural, facilitando el almacenamiento hídrico en el subsuelo y promoviendo una distribución más equilibrada del recurso a lo largo del año.

- Asimismo, se registra un **incremento del 29% en la evapotranspiración**, lo que sugiere una mayor interacción entre la vegetación y la atmósfera. Este proceso contribuye al servicio de **regulación climática local**, al influir en la humedad ambiental y en la generación de microclimas más estables. Además, este intercambio energético entre suelo, agua y vegetación forma parte del servicio de **soporte ecosistémico**, al mantener activos los flujos biogeoquímicos esenciales para la salud del ecosistema.
- Se sugiere llevar a cabo estudios comparativos a escala de microcuenca para analizar con mayor detalle la dinámica del balance hídrico y evaluar el impacto de las plantaciones forestales en contraste con otros usos del suelo.
- Se recomienda impulsar investigaciones que integren el análisis de usos de suelo forestales, incorporando proyecciones de cambio climático, para cuantificar su impacto en la disponibilidad y gestión de los recursos hídricos en cuencas de diversa escala. Este enfoque permitirá identificar estrategias de adaptación frente a escenarios climáticos futuros y optimizar la planificación territorial basada en evidencia.

CAPÍTULO VI

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Abbaspour, K., Johnson, A., & van Genuchten, M. T. (2004). Estimating uncertain flow and transport parameters using a sequential uncertainty fitting procedure. *Vadose Zone Journal*, 3(4), 1340–1352. <https://doi.org/10.2113/3.4.1340>
- Aguayo, M., Stehr, A., & Link, O. (2016). *Respuesta hidrológica de una cuenca de meso escala frente a futuros escenarios de expansión forestal*. Departamento de Planificación Territorial, Facultad de Ciencias Ambientales, Centro EULA, Universidad de Concepción. <https://www.scielo.cl/pdf/rgeong/n65/art10.pdf>
- Aguilar, J., & Naranjo, L. (2018). *Elaboración de la base de información hidrometeorológica de la cuenca del Río Guayas para el procesamiento con el modelo Hydraccess ante inundaciones*. Universidad Central del Ecuador. <https://www.dspace.uce.edu.ec/server/api/core/bitstreams/129462cf-18c6-434f-95a1-2ce7b5a29827/content>
- Alcántara, J. (2008). *Caracterización hidromorfológica de la microcuenca Puyllucana - Baños del Inca - Cajamarca, mediante la aplicación de ArcGIS*. Universidad Nacional de Cajamarca. <https://repositorio.unc.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14074/102/T%20551%20A347%202015.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). <https://www.fao.org/4/x0490e/x0490e00.htm>

- Arnold, J., & Fohrer, N. (2005). SWAT 2000: Current capabilities and research opportunities in applied watershed modelling. *Hydrological Processes*, 19(3), 563–572. <https://doi.org/10.1002/hyp.5611>
- Arrueta. (2009). *Balance hídrico y análisis de las relaciones precipitación – escorrentía en la microcuenca de la Quebrada El Gallo, San Antonio de Oriente*. Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano.
- Averyt, K., Meldrum, J., Caldwell, P., Sun, G., McNulty, S., Huber-Lee, A., & Madden, N. (2013). Sectoral *contributions* to surface water stress in the coterminous United States. *Environmental Research Letters*, 8(3), 035046. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/3/035046>
- Báez, C. (2018). *Análisis geomorfológico y tectónico para la determinación de los factores condicionantes en la producción de sedimentos de la subcuenca hidrográfica del Río Salado (Cuenca hidrográfica del Río Coca)*. Escuela Politécnica Nacional. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19058>
- Baldeon, L. C. (2016). *Modelamiento hidrológico de la subcuenca del río Ahamayo*. Universidad del Centro del Perú. <https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/4588/Baldeon%20Jara.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Bocel, J. (2016). *Modelación hidrológica para evaluar los niveles de erosión hídrica y producción de sedimentos en diferentes usos y coberturas de la tierra y su efecto en la calidad del agua en la subcuenca del Río San Francisco, cuenca del lago de Atitlán, Guatemala* (Tesis de maestría). Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), Turrialba, Costa Rica.

https://repositorio.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/8596/Modelacion_hidrologica.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- Bonnesoeur, V., Locatelli, B., Guariguata, M., Ochoa-Tocachi, B., Vanacker, V., Mao, Z., Stokes, A., & Mathez-Stiefel, S. (2019). Impacts of forests and reforestation on hydrological services in the Andes: A systematic review. *Forest Ecology and Management*, 433, 569–584. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.11.033>
- Botero, A., & Vélez, J. J. (2010). Estimación del tiempo de concentración y tiempo de rezago en la cuenca experimental urbana de la quebrada San Luis, Manizales. *DYNA*, 77(165), 58–71. <https://doi.org/10.15446/dyna.v77n165.17030>
- Bruijnzeel, L. (2004). Hydrological function of tropical forests: ¿not seeing the soil for the trees? *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 104(1), 185-228. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2004.01.015>
- Calder, I. (1992). Hydrologic effects of land-use change. En D. Maidment (Ed.), *Handbook of hydrology* (pp. xx-xx). McGraw-Hill.
- Camino, M., Bó, M., Cionchi, J., Del Río, J. L., López de Armentia, A., & De Marcos, S. G. (2018). *Estudio morfométrico de las cuencas de drenaje de la vertiente sur del sudeste de la provincia de Buenos Aires*. Buenos Aires, Argentina. <https://www.redalyc.org/journal/3832/383257036005/html/>
- Camones, A. (2018). *Influencia de la humedad del suelo en la relación precipitación – escorrentía en las cuencas del Anya y Mchique*. Junín, Perú. https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UNAL_89f99a3446615b535dc9dc1febdefe69

Campos, D. (1998). *Procesos del ciclo hidrológico*. Editorial Universitaria Potosina.

<https://aneascapacitacion.com/wp-content/uploads/2020/09/Capitulo-1.pdf>

Cañibano, A., Sastre, P., & D'Andrea, R. (2016). *Área y perímetro para la caracterización de formas*. Facultad de Agronomía, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires (UNCPBA), Argentina.

https://revistasuma.fespm.es/sites/revistasuma.fespm.es/IMG/pdf/s83-25-area_y_perimetro.pdf

Carajal, D. (2017). *Dinámica hídrica bajo condiciones climáticas cambiantes en la subcuenca del Río Tempisquito, cuenca del Tempisque, Guanacaste, Costa Rica* (Tesis de maestría). Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), Turrialba, Costa Rica.

https://repositorio.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/8705/Dinamica_hidrica_bajo_condiciones_climaticas.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Carnus, J.-M., Parrota, J., Brockerhoff, E., Arbez, M., Jactel, H., Kremer, A., Lamb, D., O'Hara, K., & Walters, B. (2006). Planted forests and biodiversity. *Journal of Forestry*, 104(2), 65–77. <https://doi.org/10.1093/jof/104.2.65>

Carrillo, J., & Cardona, A. (2012). Groundwater flow systems and their response to climate change: A need for a water-system view approach. *American Journal of Environmental Sciences*, 8(3), 220–235. <https://doi.org/10.3844/ajessp.2012.220.235>

Carrillo, J., & Ouyse, S. (2013). *Evaluación del funcionamiento de los sistemas de flujo de agua subterránea en México para reducir los impactos de la sequía*. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). <https://ru.dgb.unam.mx/bitstream/20.500.14330/TES01000832013/3/0832013.pdf>

- Carrillo, J., Huízar, R., Cardona, A., Varela, G., Granel, E., & Zenteno, G. (2007). Impactos ambientales relacionados con el uso inadecuado del agua subterránea en México. En *Nuevo Atlas Nacional de México*. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).
- Carvalho, P., & Delgado, C. (2013). *Estudio hidrológico – hidráulico del puente sobre el río Jadán, Parroquia Jadán, Cantón Gualaceo, provincia del Azuay*. Universidad de Cuenca. <https://rest-dspace.ucuenca.edu.ec/server/api/core/bitstreams/a69fb734-a0a5-491e-9ca7-535ba6ea17b3/content>
- Castañeda, M., & Barros, V. (1994). Las tendencias de la precipitación en el cono sur de América al este de los Andes. *Actas VI Reunión Argentina de Agrometeorología*, 19(1), 23–32. Córdoba, Argentina. <https://agrometeorologia.criba.edu.ar/Downloads/TODO-final.pdf>
- Cerignoni, F., & Rodrigues, V. (2015). Análisis morfométrico de la microcuenca “C” núcleo Cunha. *SECF*, 366, 355–366. São Paulo, Brasil.
- Chester, S., Sandra, B., Eduardo, C., & David, M. (2017). Morfología interpretativa de alta resolución usando *datos* LIDAR en la cuenca hidrográfica del Río Paute en Ecuador. En *CONFIBSIG* (pp. 399–412). <https://revistas.uazuay.edu.ec/index.php/memorias/article/view/87/81>
- Clavijo, L., & Pérez, C. (2016). *Cálculo del caudal de crecientes en la quebrada Canoas hasta su desembocadura en la quebrada Tapias, municipio de Cuitiva, departamento de Boyacá, Colombia*. <https://repository.udistrital.edu.co/server/api/core/bitstreams/7db676e2-76b1-4e90-90ee-8a5fe93261c1/content>

- Condori, W. (2019). *Efecto del cambio de uso del suelo sobre la producción de agua y sedimentos en la subcuenca del río Llallimayo – Melgar – Puno, Perú*. https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UANT_977f9da10f5e4c32433914f9de3c3d32
- Cotler, H. (2010). *Cuencas hidrográficas: Fundamentos y perspectivas para su manejo y gestión*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2013/Cuencas_fin_al_2014.pdf
- Cruz, B., Gaspari, F., Rodríguez, M., Carrillo, F., & Telléz, J. (2015). Análisis morfométrico de la cuenca hidrográfica del Río Cuale, Jalisco, México. *Investigación y Ciencia*, 23(65), 26–34. <https://www.redalyc.org/pdf/674/67441039004.pdf>
- De Paula Lima, W. (2008). *Hidrología forestal aplicada ao manejo de bacias hidrográficas*. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo (USP), Piracicaba, São Paulo, Brasil. https://www.ipef.br/publicacoes/acervohistorico/informacoestecnicas/hidrologia_florestal_aplicada_ao_manejo_de_bacias_hidrograficas.pdf
- Del Águila, S. (2021). *Modelamiento de procesos hidrológicos en cuencas de la sierra central del Perú* (Tesis doctoral). Escuela de Posgrado, Universidad Nacional Agraria La Molina. <https://repositorio.lamolina.edu.pe/items/20e0b424-b0e2-4e75-9fdc-78e2ddd996be>
- Demetrio, M. (2016). *Caracterización hidrográfica de la cuenca Ayuquila – Armería mediante la aplicación de un sistema de información geográfica*. Universidad de Guadalajara, Autlán de Navarro, Jalisco, México. <https://hdl.handle.net/20.500.12104/34349>

- Faustino, J. (2012). Identificación, *evaluación y manejo de zonas de recarga hídrica*. Managua, Nicaragua. <https://cenida.una.edu.ni/relectronicos/REN10C355c.pdf>
- Fernández, C. (2017). *Modelamiento hidrológico de la región hidrográfica del Titicaca*. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), Dirección de Hidrología, Lima, Perú. <https://repositorio.senamhi.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12542/245/Modelamiento-hidrol%C3%B3gico-regi%C3%B3n-hidrogr%C3%A1fica-Titicaca.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Flores, M. Z. (2011). *Análisis y comparación de metodologías de ordenación de cuencas hidrográficas: Aplicación a la cuenca de La Paz en Baja California Sur, México*. https://m.riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/19233/Texto_TFM_%20Z_%20Flores_Maria.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Foglia, L., Hill, M. C., Mehl, S. W., & Burlando, P. (2009). Sensitivity analysis, calibration, and testing of a distributed hydrologic model using error-based weighting and one objective function. *Water Resources Research*, 45(6), 1–18. <https://doi.org/10.1029/2008WR007255>
- Fohrer, N., Haverkamp, S., Eckhardt, K., & Frede, H. (2001). Hydrologic response to land use changes on the catchment scale. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 26(7-8), 577–582. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1464190901000521>
- Frasson, R. P. M., & Krajewski, W. F. (2013). Rainfall interception by maize canopy: Development and application of a process-based model. *Journal of Hydrology*, 489, 246–255. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.03.015>

- Gaspari, F., Rodríguez, A., Senisterra, G., Denegri, G., Delgado, M., & Besteiro, S. (2012). Caracterización morfométrica de la cuenca alta del Río Sauce Grande, Buenos Aires, Argentina. *Revista/Publicación, X(X)*, 143–158.
<https://revistas.unlp.edu.ar/domus/article/view/476/505>
- Gaspari, F., Senisterra, G., Delgado, M., & Besterio, S. (2013). *Elementos metodológicos para el manejo de cuencas hidrográficas* (2ª ed.). Universidad Nacional de La Plata.
<https://libros.unlp.edu.ar/index.php/unlp/catalog/view/109/460/1658-1>
- Germer, S., Neill, C., Krusche, A. V., & Elsenbeer, H. (2010). Influence of land-use change on near-surface hydrological processes: Undisturbed forest to pasture. *Journal of Hydrology*, 380(3-4), 473–480. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.11.022>
- Gimeno, J. (2019). *Evaluación de la respuesta hidrológica bajo distintos escenarios de uso de suelo en la cuenca del río Lumaco, región de la Araucanía, Chile* (Tesis de maestría). Programa Interfacultades, Facultad de Ciencias Forestales y de la Conservación de la Naturaleza, Universidad de Chile.
<https://mgpa.forestaluchile.cl/Tesis/Gimeno%20Fernando.pdf>
- Gobierno Regional de Cajamarca. (2011). *Zonificación ecológica y económica base para el ordenamiento territorial del departamento de Cajamarca*. Cajamarca, Perú.
https://sinia.minam.gob.pe/sites/default/files/sinia/archivos/public/docs/estudio_de_la_propuesta_de_zee_1.pdf
- Gonzales, E., Ríos, N., Benegas, L., & Argotty, F. (2021). Impacto del cambio climático y cambio de uso/cobertura de la tierra en la respuesta hidrológica y erosión hídrica en la subcuenca del río Quiscab. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 12(4).
<https://revistatyca.org.mx/index.php/tyca/article/view/1917/2386>

- Guevara, E. (2015). *Métodos para el análisis de variables hidrológicas y ambientales*. Ministerio de Agricultura y Riego (MINAGRI), Autoridad Nacional del Agua (ANA), Lima, Perú.
<https://repositorio.ana.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12543/3940/ANA0002522.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Hernández, E. (1980). *Introducción a la interceptación*. Universidad de los Andes, Facultad de Ciencias Forestales, Escuela de Ingeniería Forestal, Mérida, Venezuela.
- Huamán, J. (2016). *Evaluación de la capacidad de infiltración por precipitaciones, utilizando infiltrómetro de doble anillo en la zona de recarga hídrica de la unidad hidrográfica de Rontoccocha – Abancay*. Universidad Tecnológica de los Andes, Abancay, Perú.
<https://repositorio.utea.edu.pe/server/api/core/bitstreams/d81f5965-1f17-427f-9952-f773552b9ba4/content>
- Huerta, A. (2020). *Vulnerabilidad de la disponibilidad de los recursos hídricos en el Perú frente al cambio climático: Análisis probabilístico de Budyko* (Tesis de maestría). Escuela de Posgrado, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.
<http://45.231.83.156/bitstream/handle/20.500.12996/4503/huerta-julca-adrian-marko.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Ibáñez, S., Moreno, H., & Gisbert, J. (2010). *Morfología de las cuencas hidrográficas*. Universidad Politécnica de Valencia, España.
<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/10782/Morfolog%c3%ada%20de%20una%20cuenca.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2014). *Estudio Nacional del Agua 2014*. Bogotá, Colombia.
https://www.andi.com.co/Uploads/ENA_2014.pdf

Iroumé, A., & Huber, A. (2002). Comparison of interception losses in a broadleaved native forest and *Pseudotsuga menziesii* (Douglas fir) plantation in the Andes Mountains of southern Chile. *Hydrol. Processes* 16, 2347–2361.

<https://www.mindat.org/reference.php?id=7249760>

Iroumé, A., & Huber, A. (2000). Intercepción de las lluvias por la cubierta de bosques y efecto en los caudales de *crecida* en una cuenca experimental en Malalcahuello, IX Región, Chile. *Bosque*, 21(1), 45–56.

<https://revistas.uach.cl/index.php/bosque/article/view/5417/6084>

Jaramillo, M. (2021). *Modelación del impacto por cambio de uso de suelo sobre el comportamiento hidrológico de la subcuenca del río Quindío bajo los escenarios 2000, 2020 y 2040* (Trabajo de especialización). Facultad de Ciencias y Tecnológicas, Universidad Santo Tomás.

<https://repository.usta.edu.co/server/api/core/bitstreams/a77c9956-596a-43c8-8155-1fb0c648b17c/content>

Jiménez, O., Farias, H., & Rodríguez, C. (2005). Procesos de sedimentación en embalses en ambientes tropicales: Estudios de casos en Costa Rica y República Dominicana. *Ingeniería del Agua*, 12.

<https://polipapers.upv.es/index.php/IA/article/view/2561/2543>

Kibii, J. K., Kikorir, E. C., & Kogei, J. K. (2021). Application of Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to evaluate the impact of land use and climate variability on the Kaptagat catchment river discharge. *Journal of Hydrology*, 600, 126532.

<https://www.mdpi.com/2071-1050/13/4/1802>

Llerena, C., Hermoza, R., & Llerena, L. (2007). *Plantaciones forestales, agua y gestión de cuencas*. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Nacional Agraria La Molina;

- Instituto de Promoción para la Gestión del Agua (IPROGA). <https://cepes.org.pe/wp-content/uploads/2019/03/03-Ilerena.pdf>
- López, A., & Delgado, K. (2009). *Modelización hidrológica en la subcuenca Lempa Alto*. Comisión Trinacional del Plan Trifinio, El Salvador, Honduras, Guatemala. <https://repositorio.ues.edu.sv/bitstreams/bd49b6e4-0e3b-4bdd-a325-1f5a3b079005/download>
- López, A., González, E., & López, A. (2017). Pérdidas por interceptación 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*, 8(4). <https://revistatyca.org.mx/index.php/tyca/article/view/1329/1252>
- Maier, C. A., Albaugh, T. J., Cook, R. L., Hall, K., McInnis, D., Johnsen, K. H., Johnson, J. D., Rubilar, R. A., & Vose, J. M. (2017). Comparative water use in short-rotation *Eucalyptus benthamii* and *Pinus taeda* trees in the southern United States. *Forest Ecology and Management*, 397, 126–138. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.04.038>
- Manderso, T. (2019). Evaluating impact of land-use/land-cover change on surface runoff using ArcSWAT model in Sore and Geba watershed, Ethiopia. *Journal of Hydrology*, 578, 124057. <https://pdfs.semanticscholar.org/36cc/ef8f7d2434a6283b9a3dcf6f52b29d67465c.pdf>
- Martínez, R. (2021). *Efectos del cambio de uso/cobertura del suelo sobre la respuesta hidrológica en cuencas del centro sur de Chile bajo escenarios de cambio climático* (Tesis doctoral). Dirección de Posgrado, Facultad de Ciencias Ambientales, Universidad de Concepción, Chile.

<https://bibliotecadigital.ciren.cl/server/api/core/bitstreams/1834e05e-59d7-44c9-9873-53eb185a9592/content>

Mas, J., & Sandoval, A. (2011). *Modelación de los cambios de cobertura/uso del suelo en una región tropical de México*. Centro de Investigación en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), México.
https://www.camafu.org.mx/wp-content/uploads/2018/02/NS_5_1_Mas-Flamenco.pdf

Mattoon, A. (1998). Paper forests. *World Watch*, 11(2), 20–28.

Mattos, G., Parodi, G., & Damiano, F. (2010). *Análisis de amenaza por inundación en área urbana empleando modelos hidrodinámicos y herramientas SIG*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Buenos Aires, Argentina.
<https://es.scribd.com/doc/166512808/Analisis-de-amenaza-por-inundacion-en-area-urbana-empleando-modelos-hidrodinamicos-y-herramientas-SIG>

Mendo, M. (2008). *Valoración económica de los bienes y servicios ambientales del bosque Granja Porcón, Cajamarca – Perú* (Tesis doctoral). Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo, Perú. <https://dspace.unitru.edu.pe/server/api/core/bitstreams/81279374-aecd-4d3c-82ce-f63b0809459b/content>

Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación. (2011). *Herramientas para la evaluación y gestión del riesgo climático en el sector agropecuario*. Santa Fe, Argentina.
https://apps.iica.int/observatorio-girsa/Content/Archivos/Publicaciones/Archivos/23102017_Herramientas_Evaluacion.pdf

Monsalve, J. (2008). Desarrollo de un modelo conceptual de producción, transporte y depósito de sedimentos. Tesis Doctoral no publicada. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid. España.

<https://m.riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/8303/tesisUPV2757.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Mora, S., & Valverde, R. (2005). *Geología: Procesos de la dinámica interna y externa*. Editorial Tecnológica de Costa Rica.

Muñoz-Villers, L. E., Holwerda, F., Gómez-Cárdenas, M., Equihua, M., Asbjornsen, H., Bruijnzeel, L. A., Marín-Castro, B. E., & Tobón, C. (2012). *Water balances of old-growth and regenerating montane cloud forests in central Veracruz, Mexico*. *Journal of Hydrology*, 462-463, 53–66.

Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., & Williams, J. R. (2005b). *Soil and Water Assessment Tool: Theoretical documentation* (Versión 2005). Texas Water Resources Institute. <https://swat.tamu.edu/media/1292/swat2005theory.pdf>

Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., Srinivasan, R., & Williams, J. R. (2005a). *Soil and Water Assessment Tool: Input/output file documentation* (Version 2005). Texas Water Resources Institute. <https://swat.tamu.edu/media/1291/swat2005io.pdf>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2006). *Ordenación responsable de los bosques plantados: Directrices voluntarias* (Documento de trabajo sobre los bosques y árboles plantados FP37S). Departamento Forestal. <https://www.fao.org/4/J9256S/J9256S00.pdf>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2007). *Situación de los bosques del mundo*. <https://www.fao.org/4/i2000s/i2000s.pdf>

Ortiz, S. (2016). *Similitud hidráulica de sistemas hidrológicos altoandinos y transferencia de información hidrometeorológica*. Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú. <https://www.revistatyca.org.mx/index.php/tyca/article/view/1177/1080>

- Ospina, M. J., & Mancipe, J. S. (2016). *Estudio morfométrico y estimación de caudal por medio del método racional para la creciente de la quebrada Canauchita hasta la desembocadura en el río Chirche del municipio de Otanche en el departamento de Boyacá, Colombia.*
<https://repository.udistrital.edu.co/server/api/core/bitstreams/cb5daf13-7766-4cad-92b7-35175f02c137/content>
- Oyarzún, C., Godoy, R., De Schrijver, A., & Staelens, J. (2007). Water quality and sediment - N, P export from a native forest and a *Pinus radiata* plantation in southern Chile. *Hydrological Processes*, 21(2), 295-304. <https://doi.org/10.1002/hyp.6226>
- Peña, R., & Lavado, W. (2024). Efecto del LULC sobre la respuesta hidrológica en la cuenca Puyango – Tumbes. *Ciencias Técnicas y Aplicadas, Polo del Conocimiento.*
<https://polodelconocimiento.com/ojs/index.php/es/article/view/7358/pdf>
- Pizarro, R., Sangüesa, C., Vallejos, C., Mendoza, R., Pino, J., Berrios, A., & Ibáñez, A. (2017). *Antecedentes de la relación masa forestal y disponibilidad hídrica en Chile.* Centro Tecnológico de Hidrología Ambiental, Facultad de Ciencias Forestales y de la Conservación de la Naturaleza, Universidad de Chile.
<https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000370891.locale=en>
- Poma, W. (2011). *Estudio de suelos y capacidad de uso mayor del departamento de Cajamarca.* Gobierno Regional de Cajamarca, Cajamarca, Perú.
<https://zeeot.regioncajamarca.gob.pe/sites/default/files/INFSUELOSZEE091.pdf>
- Proaño, M., Gavilanes, M., Valenzuela, P., & Cisneros, C. (2006). *Aplicación del modelo SWAT en la subcuenca del río Ambato: Proyecto Cuencas Andinas – CODESAN – GTZ.* Quito, Ecuador.

Programa de Manejo Forestal Sostenible en la Región Andina. (2012). *Ideas y soluciones para restauración de bosques: Incentivos para la restauración y recuperación de bosques*. Lima, Perú.

PRONAMACHCS & FAO. (1998a). *Manual de plantaciones forestales para la sierra peruana*. Gobierno de los Países Bajos, Lima, Perú.

PRONAMACHCS & FAO. (1998b). *Manejo de plantaciones forestales*. Gobierno de los Países Bajos, Lima, Perú.

Putuhena, W. M., & Cordery, I. (2000). Some hydrological effects of changing forest cover from *Eucalyptus* and *Pinus radiata*. *Agricultural and Forest Meteorology*, 100(1), 59–72. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168192399000866>

Ramírez, A., Cruz, A., Sánchez, P., & Monterroso, A. (2015). La caracterización morfométrica de la subcuenca del río Moctezuma, Sonora: Ejemplo de aplicación de los sistemas de información geográfica. *Geografía Agrícola*, 60. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=75749286003>

Raya, A., Delgado, F., & Nanía, L. (2016). Determinación del cauce principal de un río mediante herramientas SIG y análisis multicriterio. *Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos*. Departamento de Ingeniería Hidráulica, Instituto del Agua, Universidad de Granada, España. https://www.conocetusfuentes.com/documentos/doc_187.pdf

Reyes, A., Ulises, F., & Carvajal, Y. (2010). Guía básica para la caracterización morfométrica de cuencas hidrográficas (1ª ed.). Universidad del Valle, Cali, Colombia.

Ricce, M., & Robles, K. (2014). *Evaluación de la disponibilidad de recursos hídricos superficiales y estrategias de gestión sostenible en la microcuenca Río Negro – Satipo*. Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo, Perú.

<https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/3985/Ricce%20Torres%20-%20Robles%20Coronel.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Rizo, R., Romero, L., & Zeledón, J. (2011). *Caracterización biofísica y socioeconómica de la microcuenca La Jabonera, perteneciente a la subcuenca del río Estelí*. Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua, Nicaragua.

<https://repositorio.unan.edu.ni/id/eprint/1853/1/14261.pdf>

Rui, X., & Jiang, C. (2010). Revisión de la investigación de la interacción de procesos hidrogeomorfológicos. *Advances in Water Science*, 21(4), 444–449.

Ruiz, E., & Martínez, M. (2018). *Hidrología aplicada*. Departamento de Ingeniería Química y del Medio Ambiente, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Bilbao, Bilbao, Bizkaia, España.

Sahin, V., & Hall, M. J. (1996). The effects of afforestation and deforestation on water yields. *Journal of Hydrology*, 178(1-4), 293–309. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(95\)02825-0](https://doi.org/10.1016/0022-1694(95)02825-0)

Salvatierra, F. (2006). *Estudio de la cuenca del río Cajolá con fines de manejo de suelos*. Municipio de Cajolá, Departamento de Quetzaltenango, Guatemala. http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/01/01_0677.pdf

Sánchez, J. (2004). *Hidrología* (2ª ed.). Universidad de Salamanca.

Schumm, S. A. (1956). Evolution of *drainage* systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey. *Geological Society of America Bulletin*, 67(5), 597–646. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1956\)67\[597:EODSAS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1956)67[597:EODSAS]2.0.CO;2)

Stehr, A., Aguayo, M., Link, O., Parra, O., Romero, F., & Alcayaga, H. (2010). Modelling the hydrologic response of a mesoscale Andean watershed to changes in land use patterns

- for environmental planning. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(10), 1963-1977.
<https://hess.copernicus.org/articles/14/1963/2010/hess-14-1963-2010.pdf>
- Strahler, A. N. (1952). Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. *Bulletin of the Geological Society of America*, 63(11), 1117–1142. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1952\)63\[1117:HAAOET\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1952)63[1117:HAAOET]2.0.CO;2)
- Tacusi, C., & Hacha, E. (2015). *Modelación hidrológica en la subcuenca de Pitumarca con la aplicación del modelo WEAP (Sistema de Evaluación y Planeación de Agua)*. Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco. Canchis, Cusco, Perú.
<http://repositorio.unsaac.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12918/130/253t20150036.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Tipán, D. (2018). *Estudio hidráulico del Río Guano para la determinación de la conductancia entre río-acuífero y zonas de inundación* [Tesis de grado, Universidad Nacional de Chimborazo]. <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/4983>
- Tobón, C., Barrionuevo, M., et al. (2009). *Los bosques andinos y el agua*. ECOBONA.
<https://sinia.minam.gob.pe/sites/default/files/siar-puno/archivos/public/docs/1566.pdf>
- Vargas, J., De la Fuente, L., & Arumí, J. L. (2012). *Balance hídrico mensual de una cuenca Patagónica de Chile: Aplicación de un modelo parsimonioso*. Santiago de Chile, Chile.
https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-28132012000200003&lng=en&nrm=iso&tlng=en
- Vásquez, V. (2000). *Manejo de cuencas altoandinas*. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú.
https://www.academia.edu/45664011/MANEJO_Y_GESTI%C3%93N_DE_CUENCAS_HIDROGR%C3%81FICAS_Universidad_Nacional_Agraria_La_Molina

- Villón, M. (2002). *Hidrología*. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Agrícola. Cartago, Costa Rica. <https://es.scribd.com/document/391253876/2002-MAXIMO-VILLON-L-HIDROLOGIA-pdf>
- Villón, M. (2004). *Hidrología*. Editorial Tecnología de Costa Rica.
- Ward, A., & Trimble, S. (2004). *Environmental hydrology*. Lewis Publishers, CRC Press Company.
- https://www.researchgate.net/publication/237052821_Environmental_Hydrology
- Weber, J., & Baigorri Ocampo, S. (2019). Calibración del modelo hidrológico SWAT para una cuenca de la región serrana de Córdoba (Argentina). *Aqua-LAC*, 11(1), 34–54.
- <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000368911>
- World Rainforest Movement. (1999). *Pulpwood plantations: A growing problem* (Briefing Paper). Montevideo, Uruguay.
- Xu, H., & Wu, M. (2017). *Water availability indices – A literature review* (Technical Report). Argonne National Laboratory. Argonne, Chicago, United States.
- https://water.es.anl.gov/documents/Technical%20Report_%20Literature%20Review%20of%20Water%20Availability%20Indices_030317.ems_vs.pdf
- Yang, T., Yu, P., & Chen, C. (2005). Long-term runoff forecasting by combining hydrological models and meteorological records. *Hydrological Processes*, 19(10), 1967–1981.
- https://www.oieau.fr/eaudoc/system/files/documents/40/202614/202614_doc.pdf
- You, W., Ji, Z., Wu, L., Deng, X., Huang, D., Chen, B., Yu, J., & He, D. (2017). Modeling changes in land use patterns and ecosystem services to explore a potential solution for meeting the management needs of a heritage site at the landscape level. *Ecological Indicators*, 73, 68–78.

https://www.researchgate.net/publication/308736926_Modeling_changes_in_land_use_patterns_and_ecosystem_services_to_explore_a_potential_solution_for_meeting_the_management_needs_of_a_heritage_site_at_the_landscape_level

Zabala, J. A. (2016). *Cálculo de caudal máximo de creciente en las quebradas Honda, Horca, Negra, Molinos que desemboca en el Río Somondoco. Municipio de Almeida. Departamento de Boyacá* [Trabajo de grado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. Bogotá, Colombia.
<https://repository.udistrital.edu.co/server/api/core/bitstreams/fb14cac5-d89a-4cff-9dd5-d6aa11a7e194/content>

Zhang, L., Nan, Z., Xu, Y., & Li, S. (2016). Hydrological impacts of land use change and climate variability in the headwater región of the Heihe River Basin, Northwest China. *PLOS ONE*, 11(6), e0158394.
<https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0158394>

Zuleta, C. (2013). *Análisis del comportamiento del recurso hídrico ante cambios en el uso del suelo y el cambio climático en la cuenca del río Pejibaye, Costa Rica* [Tesis de maestría, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE)]. Turrialba, Costa Rica.
https://repositorio.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/9025/Analisis_del_comportamiento_del_recurso_hidrico.pdf?sequence=1&isAllowed=y

ANEXOS

Anexo 1. Panel fotográfico del trabajo



Figura 28. Identificación de áreas de plantaciones forestales con especies exóticas.



Figura 29. Identificación de áreas de plantaciones forestales en combinación con cultivos.



Figura 30. Identificación de áreas de cultivos propios de la zona.



Figura 31. Identificación de áreas sin cobertura vegetal temporal.



Figura 32. Identificación de áreas de plantaciones forestales con especies exóticas, en combinación con áreas cultivadas.



Figura 33. Toma de datos de aforo dentro de la cuenca hidrográfica Rejo.