



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES
INGENIERÍA EN CONSERVACIÓN DE RECURSOS NATURALES

**Modelización del balance hídrico en la cuenca del río Vergara
utilizando QSWAT+**

Tesis presentada a la Facultad de Ciencias Forestales de la
Universidad de Concepción para optar al título profesional de
Ingeniero en Conservación de Recursos Naturales

Por: Valentín Sepulveda Ramírez

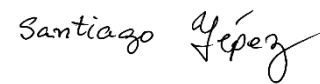
Profesores Guía: Santiago Yépez

Julio, 2025.

Concepción, Chile© 2025, Valentín Andrés Sepúlveda Ramírez.

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

**Modelización del balance hídrico en la cuenca del río Vergara
utilizando QSWAT+**



Profesor Guía

Santiago Paul Yépez Figueroa

Profesor Asociado



Profesor Guía

Rodrigo Elías Fuentes Robles

Colaborador

AGRADECIMIENTOS

La realización de esta tesis ha sido un viaje desafiante y enriquecedor, y no habría sido posible sin el apoyo inquebrantable de personas clave.

Primeramente, quisiera agradecer de corazón a mi familia directa: mis padres, Hernán y Marcela, y mi hermana Anaís. Ellos fueron los motores fundamentales de mi estabilidad mental y emocional, nunca me dejaron de lado y siempre tuvieron una palabra de apoyo cuando más la necesité. Cada llamada, cada mensaje y cada abrazo que pudimos darnos me ayudó a comprender lo realmente importantes que son, incluso a la distancia.

Las palabras quedan cortas cuando se habla de la familia que uno construye. Es aquí donde entra mi mejor amiga, Anggy, quien fue siempre un soporte incondicional durante estos cinco años lejos de mi hogar. Me abrió las puertas de su casa cuando lo necesité, me brindó apoyo y motivación para seguir adelante cuando el camino parecía estrecharse cada vez más.

Mi profunda gratitud se extiende también a mis profesores guía, Santiago Yépez y Rodrigo Fuentes. Su guía fue absolutamente esencial para desarrollar este trabajo, y agradezco su atención, comprensión y la dedicación que siempre mostraron hacia mí y hacia este proyecto. A Santiago, gracias por su paciencia y por creer en mí incluso cuando yo mismo dudaba y, a Rodrigo, por mantener siempre un trato amable y considerado, a pesar de mi ocasional desconexión.

También quisiera expresar un agradecimiento a la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad de Concepción, incluyendo a todo su personal. Este lugar, mi casa de estudios, fue donde conocí a quienes espero llamar colegas y amigos en un futuro.

No puedo dejar de mencionar a mi constante y leal compañera de aventuras, mi mascota Titi, quien me acompaña desde 2010; su presencia en las noches de desvelo y estudio, fueron clave para lograr ser quien soy hoy en día.

Finalmente, un agradecimiento especial a todas las personas con quienes compartí durante mi estadía en la Universidad, desde un tabaco casual hasta las conversaciones más profundas. A cada una de esas amistades con las que conviví y que hicieron de esta etapa una experiencia memorable.

TABLA DE CONTENIDOS

RESUMEN	viii
ABSTRACT	ix
I. INTRODUCCIÓN	1
II. METODOLOGÍA	5
III. RESULTADOS	29
IV. DISCUSIÓN	43
V. CONCLUSIONES	49
VI. BIBLIOGRAFIA	53

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2. 2: Información general de la red hídrica	9
Tabla 2. 3: Información general de la geomorfología de la Cuenca.....	10
Tabla 2. 4: Codificación de los Usos de Suelo presentes en el área de estudio.	12
Tabla 2. 5: Tipos de suelo definidos por UNESCO/FAO.....	14
Tabla 2. 6: Fuente de los Datos de Entrada.	15
Tabla 3. 1: Resultados del análisis de sensibilidad.....	31
Tabla 3. 2: Valores de reemplazo por parámetro.....	32
Tabla 3. 3: Componentes estimados del balance hídrico en la cuenca del Río Vergara.	36
Tabla 3. 4: Ratios de comparación entre los componentes estimados del balance hídrico.	39
Tabla 3. 5: Indicadores de desempeño en la simulación y post corrección por cuantiles.	41

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 2.1 Ubicación de la Cuenca del Río Vergara	7
Figura 2.2: Descripción de los usos de suelo dentro de la Cuenca del Río Vergara.....	11
Figura 2.3: Tipos de suelo en la Cuenca del Río Vergara con codificación de SWAT+. 13	
Figura 2.4: Resumen de la Metodología, procedimientos e información utilizada.	28
Figura 3.1: Resultados de la simulación de acumulación de flujos mensuales dentro de la Cuenca de Río Vergara	30
Figura 3.2: Comparación entre datos observados y simulados.....	34
Figura 3.3: Comparación de la precipitación simulada / precipitación observada.....	35
Figura 3.4: Comparación de los datos simulados, observados y post corrección por cuantiles del Caudal.	42

RESUMEN

Este estudio tuvo como objetivo modelizar el balance hídrico de la cuenca del río Vergara mediante la aplicación del modelo hidrológico QSWAT+. Para ello se realizó la recopilación y procesamiento de datos espaciales y climáticos, se calibró y validó el modelo, y se aplicó un método de corrección estadística para mejorar la simulación de caudales. Los resultados iniciales reflejaron una sobreestimación sistemática de los caudales, atribuida a la resolución limitada de los datos de entrada y a simplificaciones metodológicas. Posteriormente, la aplicación de la corrección estadística permitió mejorar significativamente los indicadores de ajuste. El balance hídrico obtenido proporciona una caracterización coherente de la dinámica hidrológica de la cuenca. A pesar de las limitaciones encontradas, el objetivo de calcular el balance hídrico fue alcanzado de manera satisfactoria, destacándose la importancia de contar con insumos de mayor calidad y una red de monitoreo más densa en futuros estudios.

ABSTRACT

This study aimed to model the water balance of the Vergara River basin through the application of the QSWAT+ hydrological model. To achieve this, spatial and climatic data were collected and processed, the model was calibrated and validated, and a statistical correction method was applied to improve discharge simulation. The initial results showed a systematic overestimation of streamflows, attributed to the limited resolution of the input data and methodological simplifications. Subsequently, the application of the statistical correction significantly improved the model performance indicators. The resulting water balance provides a consistent characterization of the basin's hydrological dynamics. Despite the identified limitations, the objective of estimating the water balance was successfully achieved, highlighting the importance of higher-quality input data and a denser monitoring network in future studies.

I. INTRODUCCIÓN

La problemática ambiental vigente en los últimos años nos habla de un deterioro constante de los ecosistemas. En Latinoamérica, este deterioro se ve exacerbado por factores como el cambio de uso de suelos, el cambio climático (Veblen et al., 2007) y la desertificación (Bergh & Promis, 2011). Estos factores interactúan de diversas formas, generando impactos significativos en los recursos hídricos y la disponibilidad del agua.

Se prevé que, con el cambio climático, aumente la frecuencia e intensidad de los eventos catastróficos relacionados con el agua en los próximos años (García et al., 2011). Es importante comprender los efectos del cambio climático y como afectan al recurso hídrico. Los eventos extremos, caracterizados por precipitaciones de alta intensidad y baja frecuencia, pueden generar desastres como inundaciones, principalmente a causa del desborde de ríos, así como también deslizamientos de laderas en situaciones más severas (Ávila, 2012).

En la Región del Biobío, el principal sistema fluvial de agua es el río Biobío, según Aguayo et al. (2016) se espera que, en escenarios futuros de expansión forestal, su caudal en épocas de estiaje (aguas bajas) disminuyan hasta en un 50%.

Según la publicación de CONAF (2017) la cobertura de bosques en Chile representa el 23,3% del total del territorio nacional, siendo un 4,07% plantaciones forestales, y esta cifra continúa en aumento. Según Alvarez-Garreton et al. (2019) con un crecimiento del 50% el área de cobertura de plantaciones forestales, se estima una disminución adicional del 18% del caudal promedio anual.

Otro de los factores que amenazan a las cuencas hidrográficas de Chile son los incendios forestales, los cuales alteran la respuesta de infiltración de las cuencas quemadas al modificar tanto las características físicas como químicas (Martin & Moody, 2001). Lloret and Zedler (2009) señalan que las cenizas en el suelo en algunos casos pueden aumentar la capacidad de infiltración y prevenir o retrasar la escorrentía producto de las lluvias.

La subcuenca del río Vergara es la segunda más grande de la cuenca del Biobío, utilizando un 17% del área de esta cuenca aproximadamente, entre las coordenadas 37°29'–38°14'S y 71°36'–73°20'O (Stehr et al., 2008). Teniendo su

origen en la comuna de Angol, en la confluencia de dos ríos, el Picoiquén y el Rehue, este último recibe gran parte de sus aguas de la cordillera de Nahuelbuta.

La subcuenca del río Vergara es otra de las tantas cuencas que han visto alterada su matriz original, por lo que también ha visto afectado su régimen hidrológico, esta variación es explicada por un fuerte aumento de las plantaciones forestales y, en consecuencia, a la pérdida del bosque nativo (Aguayo et al., 2016).

En este contexto, el análisis del impacto de los cambios en el uso del suelo y del clima en la hidrología de los ríos y la disponibilidad de agua superficial puede abordarse mediante la aplicación de modelos de escorrentía-lluvia distribuidos espacialmente (Harrison & Whittington, 2002).

Uno de los modelos más utilizados para el estudio de las consecuencias del cambio de uso de suelo y factores climáticos en hidrología es el modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT). Este modelo ha sido utilizado con éxito en diferentes estudios (Behrends Kraemer et al., 2011; María et al., 2014; Silva, 2010; Stehr et al., 2008; Torres-Benites et al., 2005). El modelo funciona dividiendo las cuencas en unidades de respuesta hidrológicas (URH) en base a los datos de entrada requeridos. Se considera una herramienta útil para la

investigación de estrategias alternativas de manejo, en cuanto a los efectos sobre la hidrología y calidad del agua (White et al., 2012). SWAT es un modelo que combina bases físicas y conceptuales con procedimientos empíricos (Bautista-ávalos et al., 2013).

En el contexto de la modelación hidrológica de la cuenca del río Vergara, es relevante mencionar la existencia de un estudio realizado en esta cuenca utilizando el modelo SWAT en condiciones de escasa información (Stehr et al., 2008). Lo que brinda confianza en la aplicación de SWAT en diversas cuencas, ya que demostró la capacidad del modelo para generar resultados consistentes y verosímiles, incluso cuando se dispone de información limitada.

El objetivo de este estudio es estimar el balance hídrico en la cuenca del río Vergara, mediante la utilización de QSWAT+ (dentro de la interfaz SIG QGIS) para comprender la dinámica del recurso hídrico en el territorio.

II. METODOLOGÍA

2.1 Descripción del área de estudio

El área de estudio en la presente investigación corresponde a la cuenca hidrográfica del río Vergara, una unidad bien definida que está localizada entre las coordenadas $37^{\circ}29'$ y $38^{\circ}14'$ de latitud Sur y $71^{\circ}36'$ y $73^{\circ}20'$ en longitud Oeste. Esta ubicación posiciona a la cuenca en una zona de transición climática y ecológica de importancia estratégica dentro del territorio nacional. Con una extensión aproximada de 4400 km^2 , la cuenca del río Vergara presenta una forma irregular, con un perímetro de 442 km. Esta configuración geométrica influye directamente en los patrones de escorrentía y la respuesta hidrológica general de la cuenca.

La cuenca exhibe una variabilidad topográfica importante, contemplando desde elevaciones máximas que alcanzan los 1800 metros sobre el nivel del mar (msnm) en las zonas montañosas de su cabecera, hasta altitudes mínimas de alrededor de 50 msnm en las proximidades de su desembocadura. Este amplio rango altitudinal genera una diversidad de condiciones climáticas y ecológicas a lo largo de la cuenca, pudiendo influir en la distribución de vegetación, tipos de suelo y los procesos hidrológicos. La pendiente promedio de la cuenca, cercana

al 13% es un factor determinante en la velocidad de los flujos superficiales y en los procesos de erosión y sedimentación.

La red hídrica principal está constituida en su mayoría por el cauce del río Vergara, que se extiende a lo largo de 128 km. Este río actúa como colector principal de una red de afluentes que drenan las diversas subcuencas que componen la cuenca del río Vergara. Es importante destacar su posición jerárquica dentro del sistema hidrológico regional, ya que la cuenca del río Vergara se configura como una subcuenca integrante de la cuenca del río Biobío, una de las cuencas más importantes del centro-sur de Chile en términos de caudal y extensión (Figura 2.1).

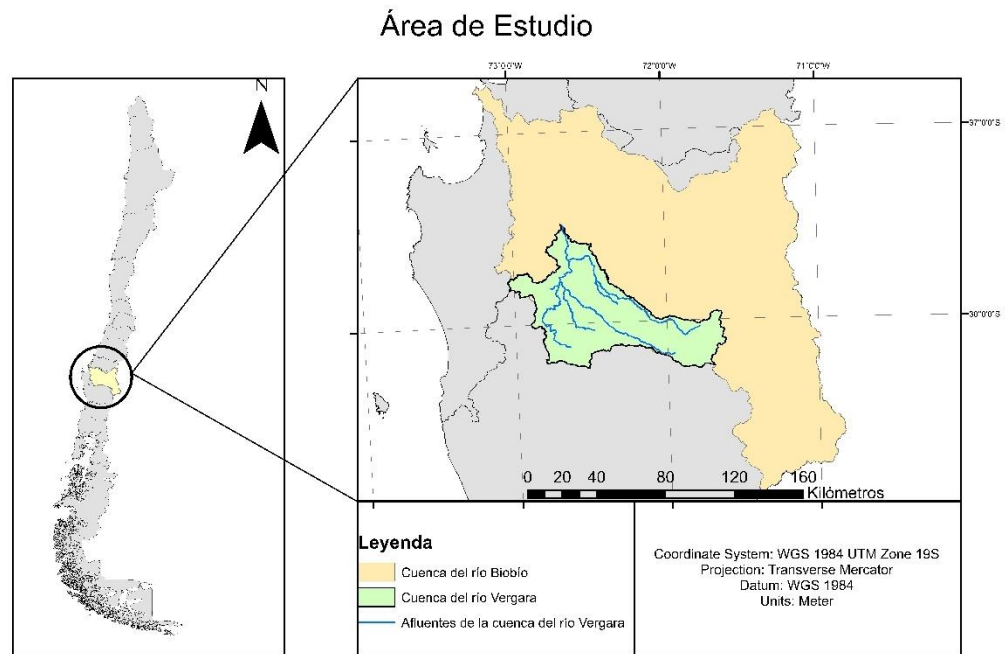


Figura 2.1 Ubicación de la Cuenca del Río Vergara

2.1.1 Información de la superficie del área de estudio

Los datos relacionados con las características generales de la superficie de la cuenca se encuentran detallados en la Tabla 2.1, ofreciendo información relevante sobre su tamaño, topografía y rangos altitudinales. Estos parámetros son esenciales para entender el relieve del terreno y como este influye en los procesos hidrológicos y en la distribución de la vegetación dentro de la cuenca

Tabla 2.1: Información general de la superficie).

Descripción	Unidad	Valor
Área de la cuenca	km ²	4342
Perímetro de la cuenca	km	541
Cota máxima	msnm	1804
Cota mínima	msnm	50
Altitud media	msnm	376
Altitud más frecuente	msnm	200
Altitud de frecuencia media	msnm	400
Pendiente promedio de la cuenca	%	13.7

2.1.2 Información de la red hídrica de la cuenca

Las especificaciones de la red hídrica de la cuenca del río Vergara se especifican en la Tabla 2.2, incluyendo atributos como el orden del río principal, su longitud y la longitud total de la red de drenaje, disponer de esta información es vital para

analizar la eficiencia de drenaje de la cuenca y la conectividad de los cursos de agua, aspectos que tienen impactos directos en el flujo de agua y el balance hídrico

Tabla 2. 1: Información general de la red hídrica

Descripción	Unidad	Valor
Orden de la red hídrica	-	4
Longitud de la cuenca	km	131
Longitud del cauce principal	km	128
Longitud de la red hídrica	km	2003
Pendiente promedio de la red hídrica	%	2.8

2.1.3 Información de la geomorfología de la cuenca

En la Tabla 2.3, se presentan los datos geomorfológicos relevantes que caracterizan la forma y estructura de la cuenca. Aquí se incluyen métricas como el índice de compacidad, el ancho medio y la densidad de drenaje. Estos indicadores son importantes para comprender la eficiencia de drenaje de la

cuenca, su susceptibilidad a eventos hidrológicos extremos y la interacción entre la forma del terreno y los procesos erosivos e hidrológicos.

Tabla 2. 2: Información general de la geomorfología de la Cuenca

Descripción	Unidad	Valor
Índice de compacidad	-	2.34
Ancho medio	km	22.15
Desnivel altitudinal	m	1754
Densidad de drenaje	-	0.71
Pendiente del cauce principal	%	11.49

Según el mapa de uso de suelos (Figura 2.2) proveniente de la información espacial de la UNESCO/FAO podemos ver que existe una notable mayoría de las coberturas de suelo FOMI y CRWO, ocupando aproximadamente dos tercios de la superficie total de la cuenca, con un área aproximada de 2300 y 1200 km^2 respectivamente.

Usos de Suelo dentro de la Cuenca del Río Vergara

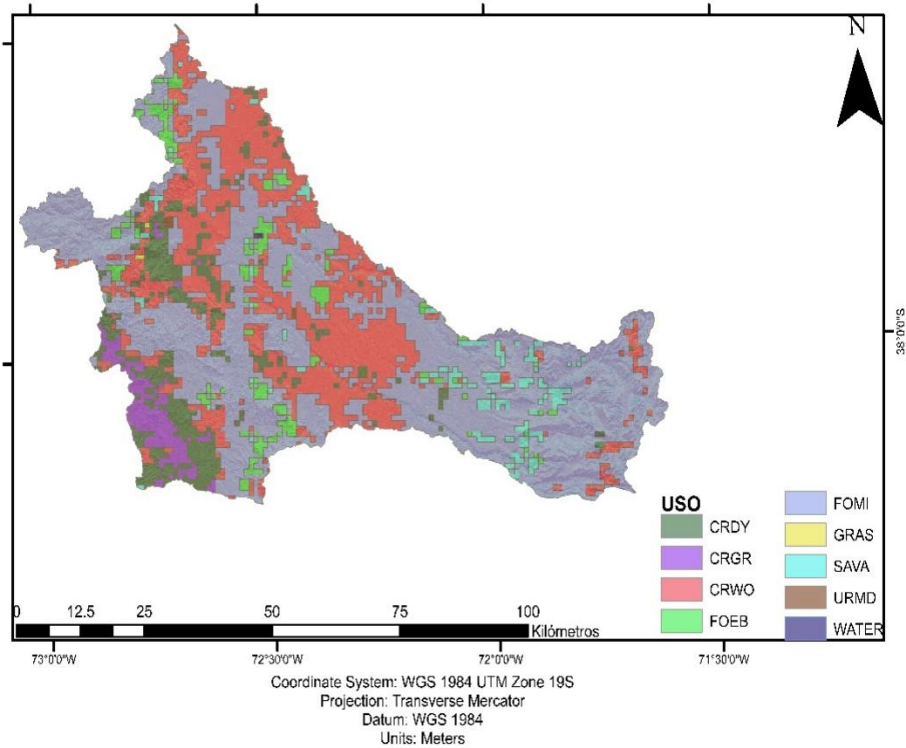


Figura 2.2: Descripción de los usos de suelo dentro de la Cuenca del Río Vergara.

El mapa de usos de suelo proporcionado por USGS que debe ser introducido en QSWAT+ trabaja con una codificación propia. en la Tabla 2.4, se muestra la codificación utilizada y su uso de suelo en función de lo descrito por SWAT+.

Tabla 2. 3: Codificación de los Usos de Suelo presentes en el área de estudio.

Código uso de suelos USGS	Uso de suelos
CRDY	Cultivos de rotación de secano- cultivos anuales intensivos en zonas sin riego
CRGR	Cultivos en hileras o permanentes de secano
CRWO	Cultivos bajo cobertura arbórea
FOEB	Bosque nativo
FOMI	Bosque mixto con manejo
GRAS	Pastizales o praderas
SAVA	Matorral de vegetación secundaria
URMD	Urbanización de densidad media
WATER	Cuerpos de agua superficiales

Como se mencionó anteriormente, los principales usos de suelo presentes fueron FOMI, correspondiente al Bosque Mixto con algún nivel de manejo y CRWO, que hace referencia a cultivos bajo cobertura arbórea principalmente.

El ráster de tipos suelos de la UNESCO/FAO nos entrega información valiosa respecto al tipo de suelo y su profundidad, cada uno con una codificación

particular que QSWAT+ procesa, que es la que se puede ver en la leyenda de la Figura 2.3.

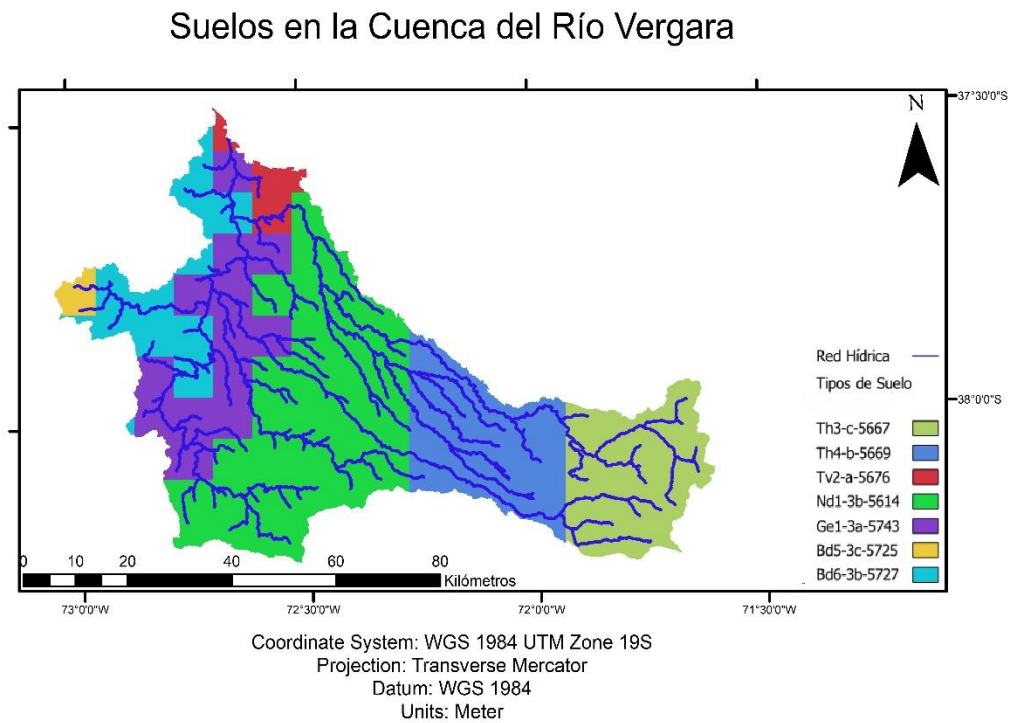


Figura 2.3: Tipos de suelo en la Cuenca del Río Vergara con codificación de SWAT+.

En concordancia con la Figura 2.3 y la Tabla 2.5 se puede apreciar que el tipo de suelo predominante es la de Arcilla Densa, lo que nos indica un mayor porcentaje de arcilla en su composición principal.

Tabla 2. 4: Tipos de suelo definidos por UNESCO/FAO.

Código	Profundidad (mm)	Textura Principal
Th3-c-5667	630	Franco
Th4-b-5669	1,000	Franco
Tv2-a-5676	1,000	Franco
Nd1-3b-5614	1,000	Arcilla Densa
Ge1-3a-5743	1,000	Arcilla
Bd5-3c-5725	790	Franco Arcilloso
Bd6-3b-5727	810	Franco Arcilloso

2.2 Recolección de datos

Para la adecuada implementación y calibración del modelo hidrológico SWAT+ en la cuenca del río Vergara, se llevó a cabo una recopilación de información espacial y climática relevante para la caracterización biofísica e hidrológica de la zona a estudiar. Este proceso abarcó la obtención de datos topográficos, edáficos, de uso y cobertura de suelos, así como información climática y registros de caudales observados en la red existente (Tabla 2.6).

Tabla 2. 5: Fuente de los Datos de Entrada.

Información	Fuente
Modelo de elevación digital	ALOS PALSAR 30 m
Uso de suelo	USGS Global Land Cover Characterization (GLCC)
Tipo de suelo	FAO/UNESCO Soil Mapping Unit
Clima observado	CR2, WGN, CAMELS
Caudal observado	CR2, CAMELS

El procesamiento de los datos climáticos implicó la organización y conversión de las series de tiempo a archivos de entrada mensuales, siguiendo el formato específico requerido por SWAT+. Adicionalmente, se utilizaron generadores de

datos climáticos como el WGN para complementar y extender las series de tiempo observadas, permitiendo una simulación hidrológica más robusta. En los casos en que se identificaron vacíos o inconsistencias en la información recopilada, se aplicaron procedimientos de revisión, corrección y completado de datos mediante métodos de interpolación, de acuerdo con la naturaleza y disponibilidad de la información. Este proceso de revisión es crucial para asegurar la calidad de los datos de entrada al modelo.

2.3 Delimitación de la cuenca e ingreso de datos a QSWAT+

La fase inicial de modelación en SWAT+ comprende la delimitación de la cuenca del río Vergara y la preparación de los datos espaciales fundamentales para su posterior análisis. Este proceso se llevó a cabo utilizando la interfaz gráfica de QSWAT+, un entorno que facilita la integración de datos geoespaciales y la configuración del modelo.

El punto de partida para la delimitación fue el modelo de elevación digital (DEM) Alos Palsar con una resolución espacial de 30m. La resolución de este DEM permitió una representación detallada de la topografía de la región, crucial para la correcta identificación de la red de drenaje. Inicialmente, se definieron los canales del río principal, trazando su curso y determinando su jerarquía y orden.

La delimitación de la cuenca del río Vergara y sus subcuencas se realizó mediante algoritmos hidrológicos implementados en QSWAT+. Estos algoritmos analizan la dirección del flujo de agua superficial a partir del DEM, identificando las áreas que contribuyen al caudal en un punto de salida que puede o no estar definido por el usuario. Este proceso generó automáticamente los límites de la cuenca principal y de las diversas subcuencas que la componen, proporcionando una estructura espacial jerárquica para el modelo.

La asignación del orden de los ríos en la red de drenaje se llevó a cabo siguiendo la metodología de Strahler (Strahler, 1952). Este sistema de clasificación jerárquica asigna un orden numérico a cada segmento del río en función del número de tributarios que se unen a él. Esta clasificación es importante para comprender la complejidad estructural de la red de drenaje, así como para la parametrización de procesos hidrológicos relacionados con el flujo en los cauces.

2.4 Configuración y ejecución inicial del modelo

La configuración inicial del modelo QSWAT+ implicó la definición de diversos parámetros y métodos que guiarían la simulación de los procesos hidrológicos dentro de la cuenca del río Vergara. La selección de estos parámetros y métodos

se basó en las características específicas de la cuenca, la disponibilidad de datos y los objetivos del presente estudio.

Para la simulación de la escorrentía superficial se optó por el método de “Curve Number” (CN) desarrollado por el Servicio de Conservación de Recursos Naturales de los Estados Unidos (NRCS). La elección de este método se fundamentó en su capacidad para estimar la escorrentía directa a partir de la precipitación, considerando las características del suelo, el uso de la tierra y las condiciones de humedad. Dada la relativa limitación en la resolución espacial y la cantidad de datos disponibles para la cuenca del río Vergara, el método CN representa una alternativa robusta y ampliamente utilizada en estudios hidrológicos con información limitada.

En cuanto a la estimación de la evapotranspiración potencial (PET) se seleccionó el método de Hargreaves (Hargreaves y Samani, 1985). Este método se caracteriza por requerir únicamente datos de temperatura máxima y mínima diaria, lo que lo convierte en una opción adecuada en situaciones donde la información de radiación solar, necesaria para otros métodos más complejos como sería Penman-Monteith, no está disponible o es limitada.

La ejecución de una simulación hidrológica precisa requiere la definición cuidadosa de ciertos parámetros clave que influyen en la representación de la red de drenaje y la correcta generación espacial en la cuenca de las Unidades de Respuesta Hidrológica (HRUs). Entre estos parámetros destacan el umbral de canal y el umbral de arroyo. Estos umbrales actúan como filtros basados en la acumulación de flujo calculada a partir del DEM, determinando que celdas se consideran parte de un canal o dentro de una red de drenaje simulada.

“Channel Threshold” se utiliza para iniciar la identificación de los canales principales dentro de la cuenca, se define un valor de acumulación de flujo y aquellas celdas cuyo valor de acumulación supera este umbral se consideran puntos de inicio de un canal principal. Un valor alto en este umbral resulta en una red de drenaje con menos canales principales, seleccionando únicamente aquellos con una extensa área de drenaje. Por el contrario, un valor bajo dará lugar a una red de drenaje más densa y ramificada. “Stream Threshold”, por su parte, se emplea para identificar una red de drenajes más detallada, incluyendo arroyos de menor orden o tributarios de los canales principales, al igual que el umbral anterior, se basa en un umbral de acumulación de flujo, aunque este valor suele ser diferente y generalmente mayor para distinguir arroyos de los canales principales basándose únicamente en la magnitud del flujo acumulado.

2.5 Uso y configuración de SWAT+ Editor

El SWAT+ Editor constituye una interfaz fundamental dentro del flujo de trabajo del modelo, permitiendo la gestión y modificación de diversos parámetros y archivos de entrada que controlan la simulación hidrológica. A través de este editor se especifican detalles cruciales relacionados con los datos climáticos, la duración de la simulación y las variables de salida de interés para el análisis del balance hídrico.

Inicialmente, dentro del editor, se procedió a la configuración del generador de datos climáticos WGN. Este módulo integrado permite generar series de tiempo sintéticas de variables climáticas a partir de datos históricos. Para este estudio, se utilizaron los parámetros del WGN que incluyen información estadística de temperatura máxima y mínima, precipitación promedio, humedad relativa, cantidad máxima de precipitación diaria y dirección del viento predominante, entre otros. La correcta configuración del WGN, es crucial para asegurar una representación climática realista durante el periodo simulado, especialmente en escenarios donde las series de tiempo observadas pueden ser incompletas o de corta duración.

Posteriormente, se definió la duración de la simulación dentro del editor, SWAT+ nos ofrece la flexibilidad de trabajar con datos en diferentes escalas temporales:

diaria, mensual o anual. Para fines de este estudio, se optó por trabajar con datos agregados a escala mensual, abarcando periodos de simulación que oscilaron entre 10 y 20 años. La elección de una escala mensual permite analizar las tendencias hidrológicas a mediano y largo plazo, suavizando las fluctuaciones diarias y facilitando la comparación con datos climáticos mensuales disponibles. La selección de la duración del periodo de simulación se basó en la disponibilidad y representatividad de los datos climáticos y de caudal observados para la cuenca del río Vergara.

Como paso final en la configuración en el editor, se especificaron los datos de salida que serían extraídos del modelo. Se selecciono la variable referida al balance hídrico a diferentes escalas espaciales y temporales; en cuanto a la escala espacial se selecciono a nivel de cuenca, HRU y LSU, por su parte, la escala temporal se definió como anual y mensual.

2.6 Uso y configuración de SWAT+ Toolbox

SWAT* Toolbox (en adelante “toolbox”) representa un conjunto de herramientas esenciales dentro del entorno de SWAT+ que nos permiten extender las funcionalidades básicas del modelo. Su uso es fundamental para la incorporación de datos observados, la realización de análisis de sensibilidad de los parámetros del modelo y posteriormente, la calibración de los resultados de la simulación.

Para iniciar este proceso, fue necesario ejecutar el modelo de forma preliminar dentro de la toolbox. Durante esta configuración, se definieron los componentes del modelo que serían considerados en los análisis posteriores, incluyendo los canales de la red de drenaje, los reservorios y los acuíferos subterráneos. La selección de estos componentes asegura que el análisis de sensibilidad y la calibración se enfoquen en los elementos clave del sistema hidrológico de la cuenca del río Vergara.

Asimismo, se especificó la escala espacial a la cual se deseaba analizar el balance hídrico. Para obtener una comprensión integral de la dinámica del agua en la cuenca, se seleccionaron tres niveles de agregación espacial: la cuenca en su totalidad, las unidades de superficie terrestre (LSUs) y las Unidades de Respuesta hidrológica (HRUs). Esta desagregación espacial permite identificar patrones y variaciones en el balance hídrico a diferentes niveles de organización

del territorio. Adicionalmente se definió una temporalidad mensual y anual para la salida de datos del balance hídrico, facilitando así el análisis de tendencias estacionales e interanuales.

Un paso crucial dentro de la toolbox fue la selección de los parámetros del modelo que serían objeto del análisis de sensibilidad. Este análisis tiene como objetivo identificar aquellos parámetros que tienen una mayor influencia en las variables de salida del modelo, particularmente en el caudal simulado. Los parámetros seleccionados para este estudio fueron:

- Cn2: representa el potencial de escorrentía
- ESCO: factor de compensación de la evaporación de agua en el suelo
- EPCO: Factor de compensación de evapotranspiración de agua considerando vegetación
- CANMX: máxima cantidad de agua que las hojas pueden retener proveniente de lluvias
- PERCO: que tan rápido el agua se percola
- LAT_TTIME: que tan rápido se mueve el agua bajo la tierra
- CN3_SWF: potencial de escorrentía cuando el suelo se encuentra muy mojado

La selección de estos siete parámetros se basó en su influencia en los procesos de escorrentía, evapotranspiración y movimiento del agua en el suelo, los cuales son componentes fundamentales del balance hídrico.

Una vez definidos los parámetros para el análisis de sensibilidad, se procedió a la incorporación de datos observados al modelo a través de la toolbox. Para la cuenca del río Vergara se identificó la existencia de solo una estación de monitoreo hidrometeorológico ubicada en el río Vergara a la altura de Tijeral. En consideración de esta única estación disponible se agregaron al canal correspondiente del modelo las series de tiempo de caudal y precipitaciones observadas en esta estación. La incorporación de estos datos observados es un paso esencial para la posterior calibración del modelo, ya que permiten comparar los resultados de la simulación con las mediciones reales en un punto específico.

2.7 Calibración del modelo dentro de SWAT + Toolbox

Tras la identificación de los parámetros más sensibles a través del análisis previamente realizado, la siguiente etapa crucial en el proceso de modelación hidrológica consistió en la calibración del modelo SWAT+. La calibración tiene como objetivo ajustar los valores de los parámetros del modelo dentro de rangos

aceptables, de manera que las salidas de la simulación se ajusten de la mejor manera posible a los datos observados disponibles.

Para fines de este estudio, se optó por la utilización de la función de calibración automática implementada dentro de toolbox. La calibración automática implica el uso de algoritmos de optimización que iterativamente modifican los valores de los parámetros sensibles dentro de rangos predefinidos, evaluando el ajuste entre los caudales simulados y los caudales observados mediante funciones objetivo-específicas.

En la configuración de la calibración automática, es necesario definir los umbrales o rangos de modificación permisible para cada uno de los parámetros sensibles identificados en el análisis previo. Estos rangos definen los límites dentro de los cuales el algoritmo de optimización puede ajustar los valores de los parámetros durante el proceso de calibración.

En este estudio, los umbrales de modificación de los parámetros fueron asignados por defecto durante la simulación automática. Si bien el uso de valores predeterminados puede simplificar la configuración inicial, es fundamental

reconocer que una definición inadecuada de estos rangos puede resultar en una calibración deficiente o incluso en el fallo total de la simulación.

2.8 Validación de los resultados

Este estudio evalúa el desempeño del modelo SWAT+ a través de la aplicación del método de corrección por cuantiles. El objetivo principal de esto fue reducir los errores sistemáticos de sobreestimación y mejorar la precisión de la simulación. Para cuantificar la mejora se calcularon múltiples indicadores de desempeño estadístico.

Para validar los resultados se procedió a trabajar con el método de corrección por cuantiles para intentar corregir el sesgo y la sobreestimación de los resultados. Más allá de una corrección de la media o la varianza, la corrección por cuantiles ajusta toda la distribución de los datos simulados, lo que es crucial para poder representar de forma adecuada la frecuencia y magnitud de los eventos extremos, incluyendo los caudales máximos y mínimos.

El método de corrección por cuantiles es no paramétrico, lo que significa que no se asume una distribución estadística específica para los datos. Esto es lo que lo hace aplicable a una amplia variedad de datos, incluyendo los que no siguen una distribución normal.

El análisis y la corrección por cuantiles fueron realizados utilizando RStudio y sus múltiples funciones estadísticas. Se desarrollo un script para leer los datos, aplicar la corrección por cuantiles y calcular el desempeño.

Para manejar los datos faltantes en el modelo, se excluyeron las series temporales que no incluyeran información.

2.9 Resumen de la metodología

A grandes rasgos la metodología se dividió en 5 herramientas, las cuales fueron; QGIS, QSWAT+, SWAT+ Editor, SWAT+ Toolbox y RStudio, los insumos y procedimientos resumidos se muestran en la Figura 2.4.

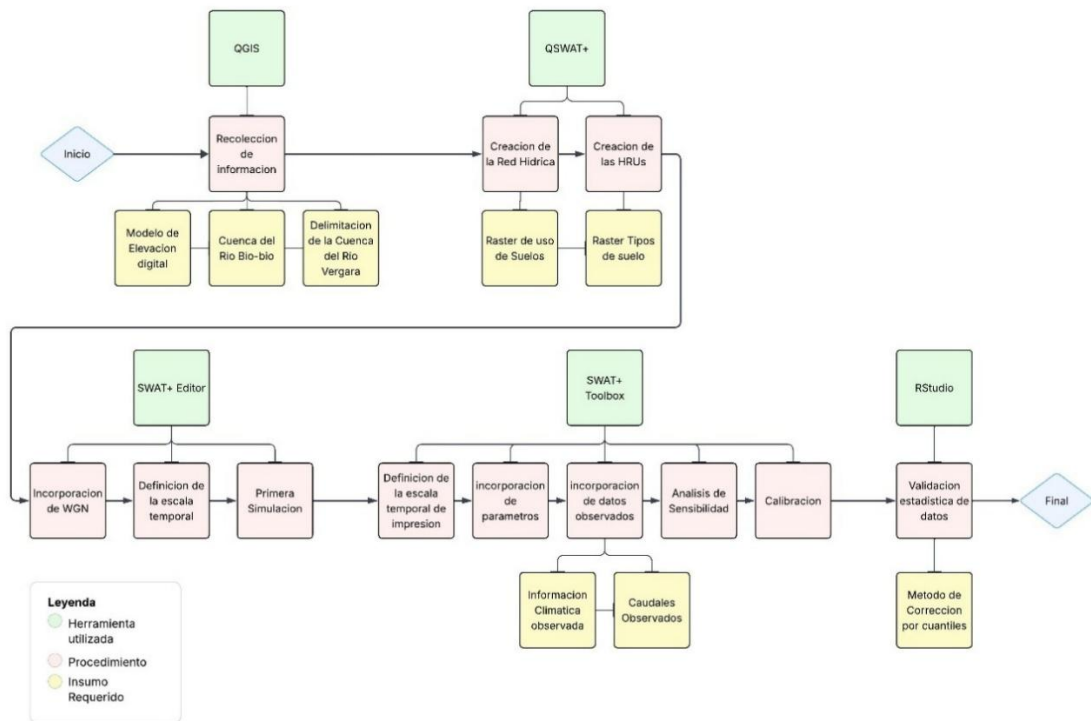


Figura 2.4: Resumen de la Metodología, procedimientos e información utilizada.

III. RESULTADOS

3.1 Caudales Acumulados

Uno de los principales objetivos a calcular para comprender el balance hídrico en una cuenca es el caudal acumulado, la temporalidad definida de impresión de datos en este estudio fue de datos promediados anuales y mensuales, QSWAT+ nos entrega múltiples archivos de salida, entre ellos el caudal acumulado dentro de la cuenca.

La Figura 3.1 nos muestra que los principales ríos tributarios en cuanto a aporte de caudal al río Vergara son: el Río Renaico, con un mayor aporte y el Río Rahue, donde nace el río estudiado, en su conjunción con el Río Picoiquén.

Promedio Mensual de Flujo Acumulado en la Cuenca del Río Vergara

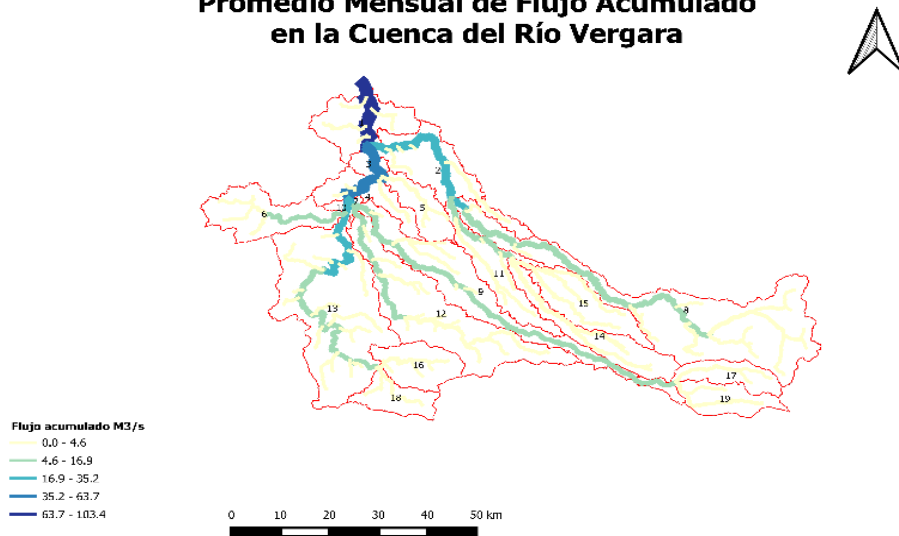


Figura 3.1: Resultados de la simulación de acumulación de flujos mensuales dentro de la Cuenca de Río Vergara

3.2 Análisis de sensibilidad

Para comprender la influencia de los parámetros utilizados por el modelo en la simulación de caudal y precipitación, se llevó a cabo un análisis de sensibilidad, que nos indica la contribución relativa de cada parámetro a la variabilidad de salidas del modelo como se puede observar en la Tabla 3.1.

Tabla 3. 1: Resultados del análisis de sensibilidad.

Nombre	Primer orden de sensibilidad
Perco	0.3704677
Cn3_swf	0.2462389
Esco	0.2189939
Cn2	0.1372559
Canmx	0.0270350
Lat_ttime	0.0000083
Epc0	0.0000000

Los resultados que muestra la Tabla 3.1, nos indican que el parámetro “perco”, es decir, la percolación del agua es el parámetro más sensible y que mayor impacto tiene en el modelo, al igual que Cn3_swf y ESCO (potencial de escorrentía cuando el suelo está muy mojado y factor de compensación de la evapotranspiración del suelo respectivamente). En contraste, parámetros como “canmx”, Lat_ttime” y “epco” son los menos influyentes en este modelo.

3.3 Resultados de la calibración

La calibración del modelo se llevó a cabo ajustando los parámetros más sensibles identificados en el análisis previo, con el objetivo de optimizar la concordancia entre los resultados simulados y los datos observados de caudal y precipitación. La Tabla 3.2, nos presenta los valores de reemplazo aplicados a cada parámetro durante el proceso de calibración, junto con el tipo de ajuste realizado y los rangos trabajados, el ajuste realizado fue el mejor de 5 pruebas automáticas con 40 interacciones por parámetro.

Tabla 3. 2: Valores de reemplazo por parámetro

Parámetro	Tipo de cambio	Valor mínimo	Valor máximo	Ajuste
Cn2	Porcentaje	-20	20	-4.824
Esco	Reemplazo	0	1	0.684
Epcó	Porcentaje	0	1	0.760
Canmx	Reemplazo	1	100	17.225
Perco	Reemplazo	0	1	0.180
Lat_ttime	Porcentaje	-10	20	14.499
Cn3_swf	reemplazo	0	1	0.992

Los valores mínimos y máximos definen el rango de búsqueda de los valores a ajustar, definiendo claramente los límites que serán modificados, por ejemplo, si el valor mínimo y máximo en "cn2" es de -20 y 20 respectivamente, esto nos indica un rango de búsqueda entre -20% y 20%.

El tipo de cambio nos explica que función se utilizó para obtener el resultado de la calibración, el cambio en porcentaje nos refiere una modificación del valor original en el porcentaje indicado mientras que el tipo de cambio en reemplazo nos indica que el valor directamente fue reemplazado por el valor mencionado.

3.4 Simulación de caudal a nivel de Canal post calibración

La Figura 3.2 nos presenta la comparación temporal entre el caudal observado y el caudal simulado por el modelo SWAT+ para el periodo comprendido entre 2007 y 2024.

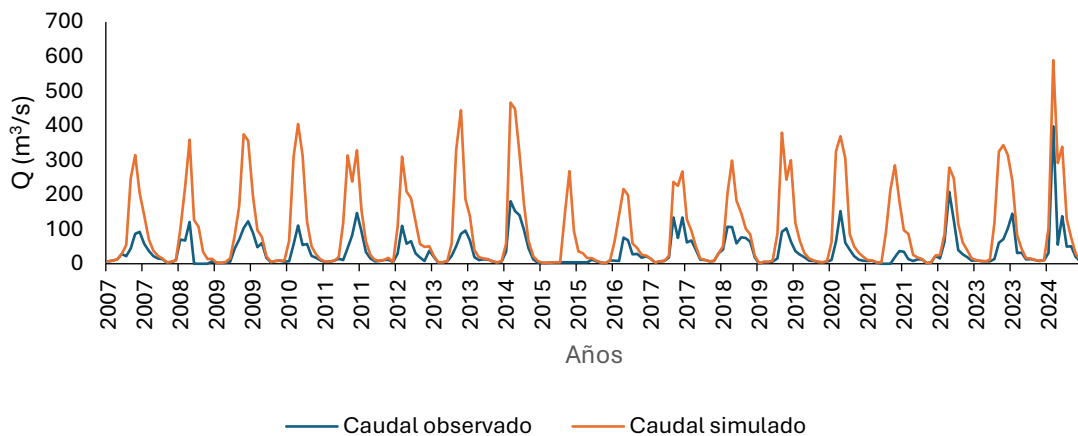


Figura 3.2: Comparación entre datos observados y simulados.

Observando estos resultados, rápidamente se puede entender que el modelo cae en una sobreestimación considerable en su estimación de caudal, pero comprendiendo siempre cuando ocurren los máximos caudales. Es importante tener en consideración que existen muchos meses sin información en la plataforma de Cr2 y de CAMELS.

3.5 Simulación de precipitación

La Figura 3.3, nos presenta la comparación temporal entre la precipitación acumulada observada y simulada por el modelo, en el periodo comprendido entre 2007 y 2020.

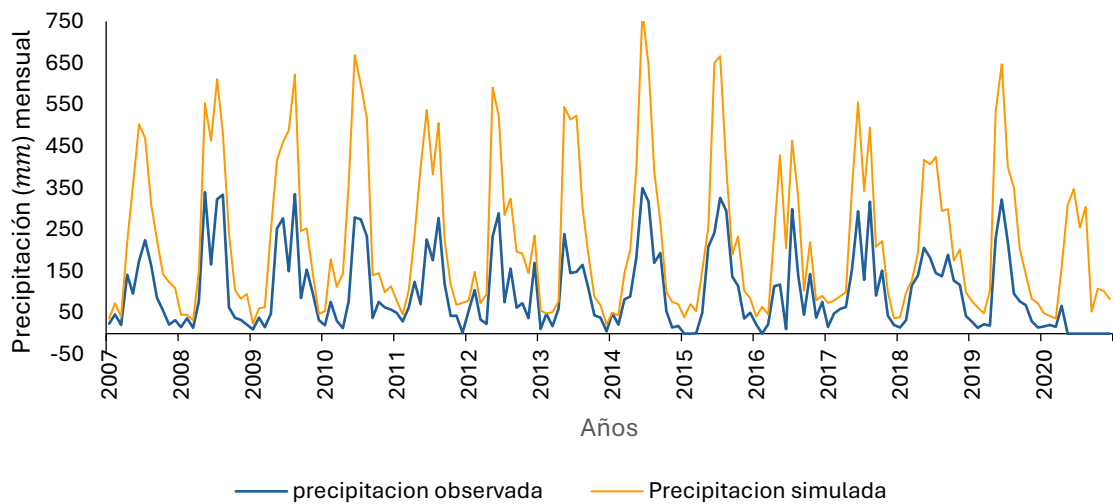


Figura 3.3: Comparación de la precipitación simulada / precipitación observada.

Rápidamente podemos observar que la precipitación se ajusta de mejor manera a la precipitación real, aunque sigue cayendo en una sobreestimación de los resultados.

3.6 Resultados del Balance hídrico

La Tabla 3.3, resume los principales componentes del balance hídrico anual promedio estimado para la cuenca del Río Vergara durante el periodo de simulación. Los valores se presentan en mm/año, lo que nos permite comparar directamente las magnitudes de cada proceso hidrológico en la cuenca

Tabla 3. 3: Componentes estimados del balance hídrico en la cuenca del Río Vergara.

Nombre	Significado	Valor (mm/año)
Precipitación	precipitación anual total	1522.9
ET	Evapotranspiración real	708.6
PET	Evapotranspiración potencial	1104.5
Surface Runoff	Escorrentía superficial	494.6
Lateral Flow	Lateral Flow	66.7
Revap	Evapotranspiración de acuífero	23.1
Percolation	Percolación de agua a acuíferos poco profundos	250.2
Deep aquifer recharge	Recarga de acuíferos profundos	12.5
Return Flow	Flujo de retorno	214.5

La precipitación representa la entrada total de agua a la cuenca en forma de lluvia, nieve o granizo. El modelo estima una precipitación acumulada de 1522 mm/año aproximadamente

La evapotranspiración real se refiere a la cantidad total de agua que se transfiere desde la superficie terrestre a la atmosfera por evaporación desde el suelo y las superficies de agua, y también por la transpiración de las plantas. El modelo estimó una pérdida de aproximadamente 708 mm/año.

La escorrentía superficial es el flujo de agua que ocurre sobre la superficie del terreno cuando la intensidad de la precipitación excede la capacidad de infiltración del suelo. El modelo estimó una contribución aproximada de 494 mm/año.

El flujo lateral por su parte es el movimiento subsuperficial del agua en las capas superiores del suelo, lo que eventualmente contribuye al flujo en los canales. El modelo estimó un flujo lateral promedio de 66 mm/año aproximadamente en la cuenca.

La evapotranspiración de acuíferos representa la cantidad de agua que se evapora directamente desde el acuífero hacia la zona no saturada de agua y posteriormente a la atmosfera. El modelo estimó una perdida promedio de 23 mm/año.

La percolación es el movimiento descendente del agua a través de la zona no saturada hacia los acuíferos poco profundos. El modelo estimó una recarga promedio a estos acuíferos de 250 mm/año.

La recarga a acuíferos profundos representa la cantidad de agua que se filtra desde los acuíferos poco profundos hacia los más profundos. El modelo estimó una recarga promedio de 12.5 mm/año aproximadamente.

El flujo de retorno nos habla del agua que inicialmente se infiltra al suelo y posteriormente regresa a la red de drenaje superficial, ya sea como flujo subsuperficial o flujo base desde los acuíferos. El modelo estimó una contribución promedio de 214.5 mm/año aproximadamente.

La Tabla 3.4 presenta una serie de ratios calculados a partir de los componentes del balance hídrico anual promedio de la cuenca estudiada. Estos cocientes (ratios) nos proporcionan una perspectiva de la importancia de los diferentes procesos hidrológicos en la cuenca en relación con la precipitación o el caudal totales.

Tabla 3. 4: Ratios de comparación entre los componentes estimados del balance hídrico.

Ratio	Valor
Evapotranspiración / precipitación	0.465
Recarga profunda / precipitación	0.008
Flujo del canal / precipitación	0.509
Flujo base / flujo total	0.362
Escorrentía superficial / flujo total	0.638
Percolación / precipitación	0.164

- El ratio entre la evapotranspiración y la precipitación es de 0.465 esto indica que aproximadamente el 46.5% de la precipitación anual promedio se pierde a través de la evapotranspiración de la cuenca.

- El ratio entre la recarga de acuíferos y la precipitación total es de 0.008, es decir, alrededor de un 0.8% de la precipitación anual promedio contribuye a la recarga de los acuíferos profundos.
- El ratio entre el flujo del canal (incluye la escorrentía superficial, el flujo lateral y el flujo de retorno o flujo de base) y la precipitación total es de 0.509, esto indica que aproximadamente el 51% de la precipitación anual promedio se convierte en flujo total en el sistema de canales de la cuenca.
- El ratio entre flujo de base y el flujo total de agua es de 0.362, esto nos indica que el flujo base contribuye aproximadamente un 36% al flujo total en los canales.
- El ratio entre la escorrentía superficial y el flujo total del canal es de un 0.638, esto nos indica que la escorrentía superficial representa aproximadamente el 64% del flujo total.
- El ratio entre la percolación de agua a acuíferos poco profundos y la precipitación total es de 0.164, esto sugiere que alrededor del 16.4% de la precipitación anual promedio se infiltra para recargar acuíferos poco profundos.

3.7 Validación de los resultados y corrección de sesgo en el caudal

Se calcularon el NSE, MSE, PBIAS y MARE, estos indicadores permiten evaluar el desempeño del modelo antes y después de la aplicación del método de corrección por cuantiles, como se puede apreciar en la Tabla 3.5.

Tabla 3. 5: Indicadores de desempeño en la simulación y post corrección por cuantiles.

Indicador	Resultado en la simulación	Resultado post corrección por cuantiles
NSE	-1.63663	0.1264
MSE	5959.05	1974.433
PBIAS	78.3868	0.1731
MARE	2.0241	1.02

- Coeficiente de Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE): que mide la bondad del ajuste del modelo, con 1 indicando un ajuste perfecto y valores negativos indicando que la media de los datos observados es mejor que la simulación efectuada por el modelo.
- Error Cuadrático Medio (MSE): cuantifica la magnitud promedio del error cuadrado, proporcionando una medida de la precisión del modelo.

- Sesgo Porcentual (PBIAS): evalúa la tendencia del modelo a sobreestimar, un PBIAS positivo nos habla de una sobreestimación y un PBIAS negativo de una subestimación de los datos.
- Error Absoluto Relativo Medio (MARE): calcula el error relativo promedio, expresado como porcentaje, proporcionando una medida de la precisión relativa del modelo.

Como se puede apreciar en la Figura 3.4, Los resultados de la corrección por cuantiles (CPC) fueron aplicados mes a mes para permitir así comparar de mejor manera el desempeño de esta corrección la simulación de datos utilizando el método de corrección por cuantiles se ajusta de mejor manera a los caudales observados, no obstante, sigue presentando un par de sobreestimaciones menores.

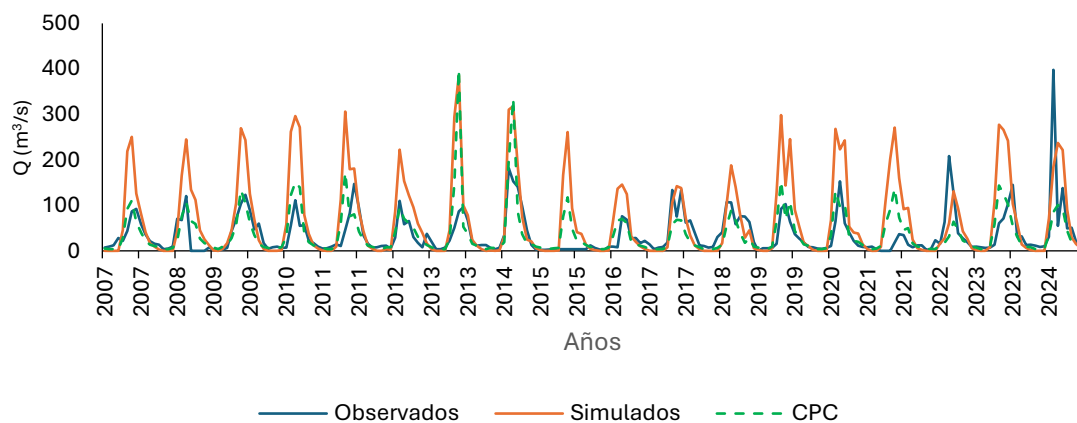


Figura 3.4: Comparación de los datos simulados, observados y post corrección por cuantiles del Caudal.

IV. DISCUSIÓN

La simulación del comportamiento hidrológico en la cuenca del río Vergara utilizando el modelo QSWAT+ representa una contribución significativa al conocimiento de los procesos hidrológicos en cuencas altamente intervenidas en el sur de Chile. El uso de este modelo permite integrar múltiples variables ambientales y escenarios de uso de suelo, proporcionando una visión comprensiva y espacialmente distribuida del funcionamiento de la cuenca. En este contexto, los resultados obtenidos han sido contrastados con investigaciones relevantes, como los trabajos de Oerung et al. (2011), Abbaspour et al. (2015) y Martínez-Retureta et al (2020), los cuales permiten contextualizar y fortalecer la interpretación de los hallazgos.

Un aspecto fundamental en el presente estudio fue la calidad y resolución espacial de los datos utilizados. La modelación hidrológica distribuida requiere insumos espaciales detallados, tales como modelos digitales de elevación (DEM), coberturas de uso de suelo y mapas de tipos de suelo. En este sentido, la resolución espacial adecuada de estos insumos permite una representación más realista de los procesos que ocurren en cada unidad de respuesta hidrológica (HRU), lo cual se refleja en una mejor capacidad predictiva de este modelo. Esto ha sido destacado por Abbaspour et al. (2015), quienes, en su

modelación a escala continental con SWAT para Europa, señalan que la precisión espacial y la calidad de los datos de entrada son determinantes en la fidelidad de los resultados y en la posterior aplicabilidad de los modelos para la toma de decisiones.

La cuenca del río Vergara presenta una matriz de uso de suelo dominada por plantaciones forestales de especies exóticas como *Pinus radiata* y *Eucalyptus* spp., que representan cerca del 40% del territorio. Diversos estudios han documentado el impacto hidrológico negativo de estas plantaciones, principalmente en la disminución del caudal base y en el aumento de la evapotranspiración. Martínez-Retureta et al. (2020), señala que en la cuenca del río Andalién se demostró que la expansión de plantaciones forestales desde un 35% a más de un 60% entre 1986 y 2011 provocó una reducción significativa en la percolación y el flujo lateral, al tiempo que aumentaba la escorrentía superficial y la evapotranspiración. En el presente estudio, se evidenciaron patrones similares, reafirmando la necesidad de considerar escenarios de restauración de bosque nativo para mejorar la regulación hídrica de la cuenca.

Un aporte relevante de este estudio fue la aplicación del método de corrección por cuantiles, a falta de presupuesto para la utilización de SWAT CUP, para ajustar las series de caudales simulados. Este proceso resultó clave para mejorar

el desempeño del modelo, especialmente en indicadores estadísticos de eficiencia como el NSE, el MSE y el PBIAS. Inicialmente, las simulaciones presentaban desviaciones considerables respecto a los valores observados, especialmente en los caudales bajos. Sin embargo, tras la aplicación de la corrección por cuantiles, se logró un ajuste más realista de las series temporales, disminuyendo errores sistemáticos y mejorando significativamente la representación de los eventos hidrológicos extremos.

El mapeo por cuantiles ha sido recomendado en la literatura como una técnica robusta para reducir sesgos en modelos de simulación hidrológica como señala Enayati et al. (2021). Especialmente en condiciones de datos limitados o con alta variabilidad temporal. Oerung et al. (2011) en su estudio sobre la cuenca Save en Francia, utilizaron el modelo SWAT para evaluar el transporte de sedimentos y carbono orgánico particulado, destacando la importancia entre un buen ajuste de los datos simulados y observados para así identificar de mejor manera las áreas críticas de pérdida de suelo y contaminación. La aplicación de estrategias como la corrección por cuantiles permite justamente reducir las diferencias entre simulaciones y observaciones, haciendo más confiables los resultados para la formulación de medidas de manejo.

En cuanto a la eficiencia del modelo, el indicador NSE presento valores significativamente más altos luego de su corrección, superando el umbral de aceptabilidad (≥ 0.5) propuesto por Moriasi et al. (2007). El MSE, por su parte, mostro una reducción considerable, lo que indica una mejora en la capacidad del modelo para reproducir los valores observados sin errores extremos. El PBIAS, que mide el sesgo porcentual también se ubico dentro de valores aceptables tras la corrección, lo que sugiere una buena representación del volumen total de agua en el sistema. Estos resultados respaldan la utilidad del procedimiento de ajuste, especialmente en cuencas donde la escasez de estaciones de aforo limita la calidad de los datos observados.

En la cuenca del río Vergara, las zonas de cabecera y aquellas con presencia de bosque nativo presentaron una mayor capacidad de generación de escurrimiento base y de regulación hídrica, coincidiendo con lo reportado Stehr et al. (2008) para otras cuencas dentro del centro-sur de Chile. Este tipo de información es especialmente valiosa para la toma de decisiones en torno a la planificación territorial, la restauración ecológica y la gestión integrada de recursos hídricos.

Por otra parte, el enfoque distribuido del modelo QSWAT+ permite incorporar escenarios de cambio de uso de suelos y analizar su efecto en la provisión y regulación del agua. Tal como lo plantea Martínez-Retureta et al. (2020), es

fundamental integrar herramientas de modelación con enfoque espacial para comprender las interacciones entre cobertura vegetal topografía y procesos hidrológicos. La identificación de las unidades territoriales con mayor incidencia en la dinámica del agua es clave para priorizar acciones de restauración y conservación de ecosistemas.

Finalmente, es importante destacar que la utilización de modelos como SWAT+ y su versión QSWAT+ requiere de un proceso riguroso de calibración y validación. En estudios como el de Abbaspour et al. (2015), se ha demostrado la necesidad de incorporar procedimientos de análisis de incertidumbre y sensibilidad para garantizar la robustez de los resultados. Aunque en el presente estudio no se aplicó el módulo de SWAT-CUP, los ajustes realizados y la aplicación del método de corrección por cuantiles o mapeo de cuantiles permitieron mejorar la consistencia de las simulaciones y sentar las bases para futuras investigaciones con enfoques más avanzados en la calibración automática del modelo y análisis estadísticos.

En síntesis, la integración de información espacial detallada, la aplicación de técnicas de corrección robustas y el uso de modelos hidrológicos constituyen pilares fundamentales para una evaluación integral del comportamiento hídrico de una cuenca. Este enfoque resulta especialmente pertinente en contextos de

alta intervención antrópica, como el de la cuenca del río Vergara, donde se requiere un conocimiento profundo y detallado para orientar decisiones de manejo del recurso hídrico en el marco del cambio climático y la presión antrópica sobre los ecosistemas.

V. CONCLUSIONES

La presente investigación, basada en la implementación del modelo hidrológico SWAT+ en la cuenca del río Vergara, permitió identificar los principales componentes del balance hídrico y evaluar la dinámica de los procesos hidrológicos dominantes en un territorio caracterizado por una alta intervención antrópica, escasa información climática e hidrológica y una marcada estacionalidad en la disponibilidad del recurso hídrico.

Los resultados obtenidos durante la fase inicial de simulación evidenciaron una sobrestimación significativa y sistemática de los caudales, atribuible principalmente a la baja resolución de los insumos cartográficos de uso de suelo y tipos de suelo, a la simplificación del método utilizado para estimar la evapotranspiración potencial y a la limitada disponibilidad de registros observados para la calibración efectiva del modelo. Esta condición es consistente con las dificultades comúnmente reportadas en cuencas de datos escasos, donde la heterogeneidad espacial y la ausencia de monitoreo continuo limitan el ajuste preciso de los parámetros hidrológicos.

En este escenario, la aplicación del método de corrección por cuantiles se estableció como una estrategia metodológica eficaz para reducir el sesgo sistemático presente en las simulaciones originales. Dicha corrección permitió mejorar considerablemente los principales indicadores estadísticos de desempeño (como NSE, MSE y PBIAS), ajustando tanto los valores medios como los extremos hidrológicos. La implementación de este enfoque contribuyó, además, a fortalecer la credibilidad de los resultados obtenidos, validando el uso de procedimientos de posprocesamiento como herramienta complementaria a la modelación hídrica bajo condiciones de incertidumbre estructural y de entrada.

Sin embargo, a pesar de las mejoras alcanzadas, persisten importantes limitaciones estructurales relacionadas con la calidad de los datos de entrada y la representatividad espacial de la información observada. La dependencia de cartografía con resolución insuficiente y la escasez de estaciones hidrometeorológicas activas en la cuenca impiden una caracterización más detallada de los flujos de agua, el almacenamiento edáfico y de las interacciones entre la cobertura vegetal, el suelo y el clima (principalmente los datos de precipitación simulados). Estas limitaciones restringen, en consecuencia, el potencial predictivo del modelo en escenarios de mayor complejidad o en estudios de calidad del agua.

Desde una perspectiva aplicada, los resultados de la modelación permiten concluir que la cuenca del río Vergara presenta una alta dependencia de las aguas superficiales y una reducida capacidad de almacenamiento subterráneo, situación que la expone a una mayor vulnerabilidad frente a escenarios de estrés hídrico, ya sea por déficit de precipitaciones o eventos extremos derivados del cambio climático. Esta condición estructural sugiere una baja resiliencia del sistema hidrológico frente a perturbaciones, lo cual refuerza la necesidad de integrar la gestión del agua con estrategias de planificación ecológica y ordenamiento territorial.

En este sentido, se plantea como prioridad la promoción de medidas de restauración ecológica, particularmente mediante la recuperación de coberturas de bosque nativo y la gestión sostenible del uso del suelo y la promoción de mecanismos naturales para la regulación del ciclo hidrológico. Asimismo, se propone fortalecer la red de monitoreo hidrológico y climático en la cuenca, incorporar técnicas de calibración multiobjetivo y avanzar hacia modelos integrados que consideren simultáneamente variables de volumen y calidad del agua.

En síntesis, esta investigación demuestra que, aun en condiciones de información limitada y poco detallada, es posible alcanzar resultados robustos y

confiables para la gestión territorial mediante la integración de modelación hidrológica distribuida, técnicas de corrección estadística y análisis espacial. El enfoque aplicado en la cuenca del río Vergara constituye una base metodológica replicable para otras cuencas del país, aportando evidencia científica para la toma de decisiones en contextos de alta presión sobre los recursos hídricos. De este modo, se contribuye a la construcción de un conocimiento aplicado que fortalezca la gestión integrada de las cuencas hidrográficas en Chile, promoviendo una visión preventiva y adaptativa frente a los desafíos actuales y futuros del recurso hídrico.

VI. BIBLIOGRAFIA

- Abbaspour, K. C., Rouholahnejad, E., Vaghefi, S., Srinivasan, R., Yang, H., & Kløve, B. (2015). A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. *Journal of Hydrology*, 524, 733–752. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.027>.
- Aguayo, M., Stehr, A., & Link, O. (2016). Respuesta hidrológica de una cuenca de meso escala frente a futuros escenarios de expansión forestal. *Revista de Geografía Norte Grande*, (65), 197–214. http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-34022016000300010&nrm=iso.
- Álvarez-Garreton, C., Lara, A., Boisier, J. P., & Galleguillos, M. (2019). The impacts of native forests and forest plantations on water supply in Chile. *Forests*, 10(6), 473. <https://doi.org/10.3390/f10060473>.
- Ávila, K. (2012). Análisis del comportamiento de eventos extremos de precipitación en la zona centro y sur de Chile continental [Tesis de máster, Universitat de Barcelona]. <http://hdl.handle.net/2445/31769>.
- Bautista-Ávalos, D., Cruz-Cárdenas, G., Moncayo-Estrada, R., García, J., & Estrada-Godoy, F. (2013). Aplicación del modelo QSWAT para evaluar la contaminación por fuentes difusas en la subcuenca del lago de Chapala, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 30, 263–274.

Behrends Kraemer, F., Chagas, C. I., Vázquez Amábile, G., Palacín, E. A., Santanatoglia, O. J., Castiglioni, M. G., & Massobrio, M. J. (2011). Aplicación del modelo hidrológico QSWAT en una microcuenca agrícola de la Pampa Ondulada. *Ciencia del Suelo*, 29(1), 75–82.

Bergh, G., & Promis, A. (2011). Conservación de los bosques nativos de Chile: Un análisis al informe FAO sobre la evaluación de los recursos forestales nacionales. *Revista Bosque Nativo*, 48, 9–11.

CONAF. (2017). *Bosques en Chile*. Corporación Nacional Forestal.

Enayati, M., Bozorg-Haddad, O., Bazrafshan, J., Hejabi, S., & Chu, X. (2021). Bias correction capabilities of quantile mapping methods for rainfall and temperature variables. *Journal of Water and Climate Change*, 12(2), 401–419. <https://doi.org/10.2166/wcc.2020.261>.

García, M. L., Carvajal Escobar, Y., & Jiménez, H. (2011). La gestión integrada de los recursos hídricos como estrategia de adaptación al cambio climático. *Ingeniería y Competitividad*, 9(1), 19–29. <https://doi.org/10.25100/iyc.v9i1.2492>.

Harrison, G., & Whittington, H. W. (2002). Vulnerability of hydropower projects to climate change. *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings*, 149, 249–255. <https://doi.org/10.1049/ip-gtd:20020173>.

- Lloret, F., & Zedler, P. H. (2009). The effect of forest fire on vegetation. En *Fire effects on soils and restoration strategies* (1.^a ed.).
- María, V., Feler, Vázquez Amábile, G., Meer, H., Gaspari, F., Prieto, D., & Flamenco, E. (2014). Validación del modelo QSWAT en la cuenca del río Quequén Grande y evaluación de potenciales cambios a nivel de cuenca. <https://doi.org/10.13140/2.1.1763.2008>.
- Martin, D. A., & Moody, J. A. (2001). Comparison of soil infiltration rates in burned and unburned mountainous watersheds. *Hydrological Processes*, 15(15), 2893–2903. <https://doi.org/10.1002/hyp.380>.
- Martínez-Retureta, R., Aguayo, M., Stehr, A., Sauvage, S., Echeverría, C., & Sánchez-Pérez, J. M. (2020). Effect of land use/cover change on the hydrological response of a southern center basin of Chile. *Water*, 12(1), 302. <https://doi.org/10.3390/w12010302>.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885–900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>.
- Oeurng, C., Sauvage, S., & Sánchez-Pérez, J. M. (2011). Assessment of hydrology, sediment and particulate organic carbon yield in a large agricultural catchment using the SWAT model. *Journal of Hydrology*, 401(3–4), 145–153. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.02.017>.

Silva, O. (2010). Evaluación del modelo hidrológico QSWAT en la cuenca media del río Pao en Venezuela. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 36(3).

Stehr, A., Debels, P., Romero, F., & Alcayaga, H. (2008). Hydrological modelling with QSWAT under conditions of limited data availability: Evaluation of results from a Chilean case study. *Hydrological Sciences Journal*, 53(3), 588–601. <https://doi.org/10.1623/hysj.53.3.588>.

Torres-Benites, E., Mejía-Sáenz, E., Cortés-Becerra, J., Palacios-Vélez, E., & Exebio-García, A. (2005). Adaptación de un modelo de simulación hidrológica a la cuenca del río Laja, Guanajuato, México. *Agrociencia*, 39(5), 481–490.

Veblen, T., Young, K., & Orme, A. R. (2007). Future environments of South America. En *The physical geography of South America* (pp. 340–352).

White, M. W., Harmel, R. D., & Haney, R. L. (2012). Development and validation of the Texas Best Management Practice Evaluation Tool (TBET). *Journal of Soil and Water Conservation*, 67(6), 525–535. <https://doi.org/10.2489/jswc.67.6.525>