



Universidad de Concepción



FACULTAD DE CIENCIAS
AMBIENTALES

**Universidad de Concepción
Facultad de Ciencias Ambientales
Ingeniería Ambiental**

Análisis del cambio de uso de suelo sobre el régimen hidrológico: Caso de estudio Cuenca del Río Vergara.

Habilitación presentada para optar al título de:

Ingeniero Ambiental

CARLOS ARTURO ZAMORANO CATALÁN

Profesora guía: Dra. Alejandra Stehr Gesche.

CONCEPCION, CHILE. 2024

**“ANÁLISIS DEL CAMBIO DE USO DE SUELO SOBRE EL RÉGIMEN HIDROLÓGICO:
CASO DE ESTUDIO CUENCA DEL RÍO VERGARA.”**

Profesor Guía: Dr. Alejandra Sther Gescher



Profesor Comisión: Dr. Mauricio Aguayo Arias



Profesor Comisión: Dra. Mariela Yévenes Burgos



CONCEPTO: APROBADO CON DISTINCIÓN MÁXIMA

Conceptos que se indica en el Título

- ✓ Aprobado por Unanimidad : (En Escala de 4,0 a 4,9)
- ✓ Aprobado con Distinción (En Escala de 5,0 a 5,6)
- ✓ Aprobado con Distinción Máxima (En Escala de 5,7 a 7,0)

Concepción, abril 2024



TESIS FINANCIADA MEDIANTE PROYECTO ANID NSFC190002

“IMPROVING WATER QUALITY TO SUSTAIN WATERSHED ECOSYSTEMS AND SOCIO-ECONOMIC DEVELOPMENT UNDER CLIMATE CHANGE: A CHINA-CHILE COMPARATIVE STUDY”

INVESTIGADOR PRINCIPAL: DRA. ALEJANDRA STEHR GESCHE

I. INDICE	
1. Introducción	1
2. ANTECEDENTES.....	3
2.1. Recursos hídricos en el mundo.....	3
2.2. Recursos hídricos en Chile.	4
2.3. SWAT como herramienta para la gestión del recurso hídrico.	4
2.4. Cambio de uso de suelo	7
2.1. Cambios de uso de suelo en el centro – sur de Chile	7
2.2. Efectos del cambio de uso de suelo en las cuencas hidrográficas.	8
2.3. Herramientas de modelación de uso de suelo	9
2.4. Casos de estudio internacionales y nacionales	10
2.5. Pregunta de investigación.....	11
2.6. Objetivo general.....	11
2.7. Objetivos específicos	11
3. METODOLOGÍA	11
3.1. Área de estudio.....	12
3.1.1. Clima.....	13
3.1.2. Presiones antropogénicas.	14
3.1.3. Información hidrometeorológica.....	17
3.1.4. Modelo hidrológico.....	20
3.2. OE 1: Elaborar un modelo hidrológico para la cuenca del Río Vergara..	21
3.3. OE 2: Generar un escenario de uso de suelo para el año 2030.	25
3.4. OE 3: Determinar la existencia de diferencias significativas	25
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	28
4.1. Calibración y validación.	28
4.2. Resumen de índices estadísticos para la calibración y validación.....	38
4.3. Análisis de cambio 2008 – 2015	40
4.4. Escenario uso de suelo año 2030 para la cuenca del Río Vergara	41
4.5. Modelación hidrológica	43
4.5.1. Normalidad de los datos	44

4.5.2.	Significancia de los resultados.....	47
4.5.3.	Cuantificación de los impactos.....	50
5.	CONCLUSIONES	54
6.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55

II. INDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Extracciones mundiales de agua 1900 – 2010.....	3
Figura 2.	Diagrama de flujo del modelo SWAT.	6
Figura 3.	Localización cuenca del río Vergara.	13
Figura 4.	Clasificación de Köppen para la cuenca del río Vergara.....	14
Figura 5.	Usos de suelo de la cuenca del río Vergara. a) año 2008; b) año 2015. 16	
Figura 6.	Información fluviométrica disponible en CR2 para la estación Río Vergara en Tijeral.....	18
Figura 7.	Información fluviométrica disponible en CR2 para la estación Río Rahue En Quebrada Culen.....	18
Figura 8.	Información fluviométrica disponible en CR2 para la estación Río Renaico en Longitudinal.	19
Figura 9.	Información fluviométrica disponible en CR2 para la estación Río Mininco en Longitudinal.	20
Figura 10.	Esquema del proceso de modelación con SWAT.	21
Figura 11.	Regionalización propuesta por Abbaspour et al. (2015) para el proceso de calibración.	22
Figura 12.	Orden jerárquico para realizar una prueba de significancia en conjuntos de datos.....	26
Figura 13.	Caudales mensuales observados y simulados pre-calibración 2002 – 2011. A) Estación río Vergara en Tijeral; b) Estación río Renaico en Longitudinal; c) Estación río Mininco en Longitudinal; d) Estación río Rahue en Quebrada Culen. 29	
Figura 14.	Caudales mensuales observados y simulados calibrados 2002 – 2011. A) Estación río Vergara en Tijeral; b) Estación río Renaico en Longitudinal; c) Estación río Mininco en Longitudinal; d) Estación río Rahue en Quebrada Culen. 32	
Figura 15.	Caudales diarios observados y simulados pre-calibración 2002 – 2011. A) Estación río Vergara en Tijeral; b) Estación río Renaico en Longitudinal; c) Estación río Mininco en Longitudinal; d) Estación río Rahue en Quebrada Culen. 34	
Figura 17.	Indices estadísticos para el proceso de calibración y validación de caudales diarios. A) Estación río Vergara en Tijeral; b) Estación río Renaico en Longitudinal; c) Estación río Mininco en Longitudinal; d) Estación río Rahue en Quebrada Culen.	38
Figura 18.	Cambio neto de uso de suelo entre el año 2008 y 2015 en la cuenca del río Vergara.	41
Figura 19.	Perdidas (morado) y ganancias (verdes) de los usos de suelo entre el año 2015 y 2030.....	42

Figura 20. Especialización de los usos de suelo en la cuenca del río Vergara para el año 2030.....	42
Figura 21. Caudales modelados al año 2030 versus caudales modelados bajo escenario de cambio de uso de suelo 2030. A) Estación río Vergara en Tijeral; b) Estación río Renaico en Longitudinal; c) Estación río Mininco en Longitudinal; d) Estación río Rahue en Quebrada Culen.....	44
Figura 22. Efectos del cambio de uso de suelo en los caudales del río Vergara. Cuantificados en porcentaje de cambio.	51
Figura 23. Cambios de usos de suelo en el espacio.	52

III. INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Estudios nacionales e internacionales sobre modelación de los impactos del CUS en el régimen hídrico.....	10
Tabla 2. Usos de suelo asociados a la cuenca del río Vergara año 2008 y 2015. 15	15
Tabla 3. índices estadísticos, nombre y formula.	23
Tabla 4. Clasificación de índices estadísticos.	24
Tabla 5. Estaciones junto al periodo utilizado para el proceso de calibración y validación.	25
Tabla 6. Parámetros calibrados en SWAT CUP para los caudales mensuales modelados.....	30
Tabla 7. Parámetros calibrados en SWAT CUP para los caudales mensuales modelados.....	35
Tabla 8. Coeficientes estadísticos iniciales y finales para el proceso de calibración mensual.....	39
Tabla 9. Coeficientes estadísticos iniciales y finales para el proceso de calibración diaria	39
Tabla 10. Coeficientes estadísticos finales para el proceso de validación diaria. .	39
Tabla 11. Áreas de los usos de suelo para el año 2015 y 2030.....	43
Tabla 12. Prueba de normalidad Kolmogorov – Smirnov para los datos modelados con y sin escenario CUS para la estación Río Vergara en Tijeral.	45
Tabla 13. Prueba de normalidad Kolmogorov – Smirnov para los datos modelados con y sin escenario CUS para la estación Río Renaico en Longitudinal.	46
Tabla 14. Prueba de normalidad Kolmogorov - Smirnov para los datos modelados con y sin escenario CUS para la estación Río Mininco en Longitudinal.....	46
Tabla 15. Prueba de normalidad Kolmogorov - Smirnov para los datos modelados con y sin escenario CUS para la estación Río Rahue en Quebrada Culen.....	47
Tabla 16. Resumen resultados de la prueba de normalidad Kolmogorov-Smirnov.	47
Tabla 17. Prueba de significancia U de Mann – Whitney para los datos modelados con y sin escenario CUS para la estación Río Vergara en Tijeral.....	48
Tabla 18. Prueba de significancia U de Mann – Whitney para los datos modelados con y sin escenario CUS para la estación Río Renaico en Longitudinal.	48
Tabla 19. Prueba de significancia U de Mann – Whitney para los datos modelados con y sin escenario CUS para la estación Río Mininco en Longitudinal.....	49

Tabla 20. Prueba de significancia U de Mann – Whitney para los datos modelados con y sin escenario CUS para la estación Río Rahue en Quebrada Culen..... 49

IV. AGRADECIMIENTOS

Una vez terminado este proceso, me gustaría comenzar agradeciendo a mi madre, quien me dio la vida y su amor incondicional hasta el día de hoy. Al igual que a mi hermano, sin el apoyo de ellos, nada de esto habría sido posible. Mi pequeña familia, que, aunque no somos muchos, nos sobra el amor.

A mis amigos que conocí a lo largo de este camino, quienes estuvieron conmigo en la soledad, en los momentos difíciles y en las alegrías de la vida; juntos formamos la familia que dejamos atrás en nuestras ciudades.

A mi profesora guía, la Dra. Alejandra Stehr, por ofrecerme su apoyo desde el momento en que le expresé mi deseo de realizar mi tesis bajo su dirección.

A la Facultad de Ciencias Ambientales, que me brindó las herramientas necesarias para llevar a cabo mi tesis y me formó como profesional.

Y, finalmente, a mí mismo, por impulsarme siempre a ser mejor, día tras día, incluso en los momentos más difíciles. Un día decidí enfrentar este camino en solitario, lejos de mi familia, con la convicción de que era lo mejor para mí; agradezco no haberme equivocado.

V. RESUMEN

En la actualidad, el uso racional, la protección los recursos hídricos y el abastecimiento de la humanidad con agua dulce limpia y suficiente, es uno de los problemas científicos más complejos. Por otro lado, Los suelos juegan un importante papel en el movimiento, almacenamiento y transformación del agua. Del agua almacenada en la tierra, más del 95% se acumula en las zonas vadosas y saturadas. Conocer el estado futuro de los recursos hídricos es una tarea fundamental para la gestión eficiente de una cuenca.

A través del modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT), calibrado y validado por el software SWAT-CUP y siguiendo la metodología propuesta por Abbaspour, se busca conocer cómo serán afectados los caudales al año 2030, bajo un escenario de cambio de uso de suelo, generado utilizando el software de modelación territorial Land Change Modeler.

Los resultados indican que para las zonas que presentan un cambio de plantación forestal hacia bosque nativo el caudal se ve aumentado tanto en periodos cálidos como húmedos, mientras que para las zonas de la cuenca que cambian a uso agrícola o forestal, el caudal se ve levemente disminuido en los periodos cálidos.

Se concluye que tanto el modelo SWAT como el modelo Land Change Modeler, pueden ser herramientas fundamentales en la gestión de recursos hídricos pensando en los desafíos futuros a los cuales nos veremos enfrentados como sociedad.

1. INTRODUCCIÓN

El agua es la molécula más ampliamente distribuida en nuestro planeta, cubriendo casi un 75% de la superficie de la Tierra. La vida sin este recurso sería imposible, dado que no existe sustituto alguno. Dentro de las características que presenta el agua, como su renovación a través del ciclo hidrológico, la autodepuración, entre otros, existe una ilusión de permanente disponibilidad de este recursos en la población. Es por esto que las personas han crecido sin una preocupación por el cómo se utilizan los recursos hídricos. Sin embargo, en las últimas décadas esta situación ha cambiado completamente, puesto que en diversas partes del mundo se han percatado cómo las actividades humanas estaban afectando este recurso (Shiklomanov, 1998).

En la actualidad, el uso racional, la protección los recursos hídricos y el abastecimiento de la humanidad con agua dulce limpia y suficiente, es uno de los problemas científicos más complejos. Este problema cada vez traspasa más fronteras, pasando de ser un problema regional a un problema a nivel mundial. La escasez de agua junto con la creciente contaminación de los cuerpos de agua ha jugado un rol limitante, tanto en el desarrollo económico y social de muchos países en el mundo, incluso países no situados en zonas áridas (Gleick et al., 1993). La disponibilidad y competencia por el agua en el mundo variará como consecuencia del cambio de uso de suelo y el cambio climático, provocados por el desarrollo económico global y regional (Dibaba et al., 2020; Mekonnen et al., 2022).

Los suelos juegan un importante papel en el movimiento, almacenamiento y transformación del agua. Del agua almacenada en la tierra, más del 95% se acumula en las zonas vadosas (poco profundas) y saturadas (aguas subterráneas). En la misma línea, el cambio de uso de suelo, para los hidrólogos es un problema que no desaparecerá (Sahin & Hall, 1996). El uso de suelo y cambio de uso de suelo analiza las influencias de los componentes terrestres de los ecosistemas (incluyendo la cobertura de suelo), siendo un determinante importante de los ciclos del agua a escala local, regional y continental (WWAP, 2018).

La alta variabilidad de las precipitaciones, el aumento de la necesidad tanto de comida como agua, eventos extremos hidrológicos de forma más frecuentes y un incremento de población, aportan a la degradación del medioambiente, afectando la disponibilidad de los recursos biofísicos (Mekonnen & Manderso, 2023). La demanda de agua potable está directamente relacionada con los cambios en el estilo de vida, crecimiento económico y el tamaño de la población. Por lo que la escasez hídrica es el resultado de la excesiva demanda humana y la incertidumbre hidrológica que se vive (Alemu et al., 2022).

Para Chile, conocer el estado de sus sistemas hídricos es de suma importancia, no solo por el rol fundamental del agua en la sobrevivencia de la población, sino que también de esto depende la sostenibilidad en el desarrollo económico y productivo (Valdés-Pineda et al., 2014). Es por esto que el uso intensivo del recurso hídrico, requiere eficiencia hidrológica, garantizando de esta forma la sostenibilidad económica y ambiental, por lo que además de contar con políticas públicas adecuadas para obtener una gobernanza eficiente, es necesario también generar información crucial de nuestros recursos hídricos (Valdés-Pineda et al., 2014).

En Chile el cambio de uso de suelo ha sido alterado drásticamente a lo largo de las últimas décadas, convirtiendo grandes extensiones de bosque nativo en plantaciones exóticas para la industria forestal y para la agricultura (Aguayo et al., 2009; Fierro et al., 2017; Rojas, 2018)

2. ANTECEDENTES

2.1. Recursos hídricos en el mundo

A nivel mundial, los recursos hídricos se han ido volviendo cada vez más vulnerable debido al incremento de la demanda a partir del crecimiento de la población, la necesidad de producir comida, expandir la industrialización debido al aumento del nivel de vida, contaminación debido a las mismas actividades industriales y el cambio climático (Carroll et al., 2013; Goonetilleke et al., 2016; McDonald et al., 2014). La demanda de agua dulce se ha incrementado por un factor de seis en los últimos 100 años (figura 1) y continúa creciendo a un ritmo aproximado de 1% anualmente desde las década de 1980 (AQUASTAT, 2010).

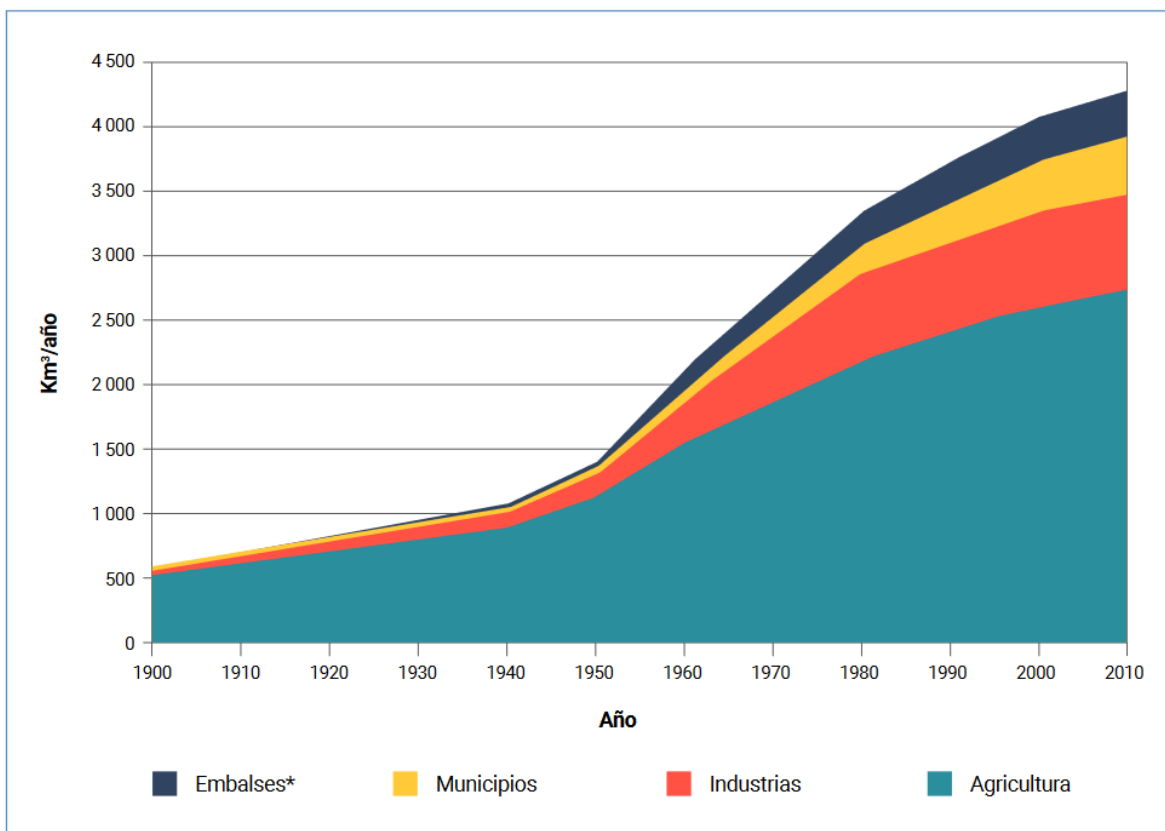


Figura 1. Extracciones mundiales de agua 1900 – 2010.
Fuente: AQUASTAT (2010)

Debido a la escases y la pobre calidad del agua, se espera que al año 2050 al menos una de cuatro personas viva con escasez de agua dulce (Goonetilleke & Vithanage, 2017). Según Connor (2015) para el año 2050 será necesario producir globalmente un 60% más de comida y un 100% en países en vías de desarrollo, un punto importante, considerando que se utiliza aproximadamente un 70% del agua potable en la agricultura (Pimentel et al., 2004).

2.2. Recursos hídricos en Chile.

Según el Banco Mundial el año 2011 (Lajaunie et al., 2011), la disponibilidad hídrica del país era de 54000 m³ hab⁻¹ yr⁻¹, posicionando al país en el 20° lugar en disponibilidad de recursos hídricos. Sin embargo, la mayoría de la población de Chile está localizada en la zona centro – norte del país, donde se presentan áreas de climas áridos o semiáridos, zonas que naturalmente presentan menor cantidad de agua. Esta variabilidad natural, si es combinada con los efectos que el cambio climático presenta, como por ejemplo, el aumento de altura de la isoterma 0, la disponibilidad hídrica para el verano se puede ver reducida aún más (Valdés-Pineda et al., 2014), así como también, actuar como agente de propagación de la sequía recurrente que presenta el país. Para el año 2020, entre las regiones de Atacama y Ñuble, mantienen un déficit de precipitación de casi un 100% con respecto al promedio histórico del año 1981-2010 (DGA, 2020). También, el aumento de la degradación de los suelos y la pérdida de biodiversidad debido a la sequía amenaza la producción agrícola y con eso la seguridad alimentaria, representando una fuente de pobreza y migración rural (Morales et al., 2005).

2.3. SWAT como herramienta para la gestión del recurso hídrico.

El desarrollo y la gestión del agua en grandes zonas requiere un entendimiento básico de los procesos hidrológicos y la simulación de posibles escenarios a futuro

a escala de cuenca. Las preocupaciones actuales que motivan el desarrollo del modelamiento hidrológicos incluyen cambio climático, la gestión del abastecimiento de agua potable en regiones áridas, deslizamientos de tierra a gran escala y los impactos de la gestión de los suelos. Los desafíos que existen a la hora de desarrollar un modelo a escala de cuenca son: (1) que sea computacionalmente eficiente; (2) que permita considerar la variabilidad espacial; (3) que requiera información fácil de conseguir; (4) que sea continuo en el tiempo; (5) que sea capaz de simular escenarios de gestión del territorio; y (6) que entregue resultados razonables (Arnold et al., 1998).

El modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT) es un modelo basado físicamente, es determinístico, continuo en el tiempo, y trabaja a escala de cuenca. Fue desarrollado por la USDA Agricultural Research Service. El modelo utiliza información espacialmente distribuida, como la topografía, suelos, usos de suelo, gestión de los suelos y clima, para predecir la hidrología, sedimentos, nutrientes, pesticidas y hasta bacterias fecales. Una cuenca de interés de estudio es dividida en subcuencas, que luego son divididas en las Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU, por sus siglas en inglés), las cuales son áreas de la cuenca que tienen las mismas características (topografía, uso de suelo y suelos) (Douglas-Mankin et al., 2010). En la figura 2 se aprecia el funcionamiento general del modelo SWAT.

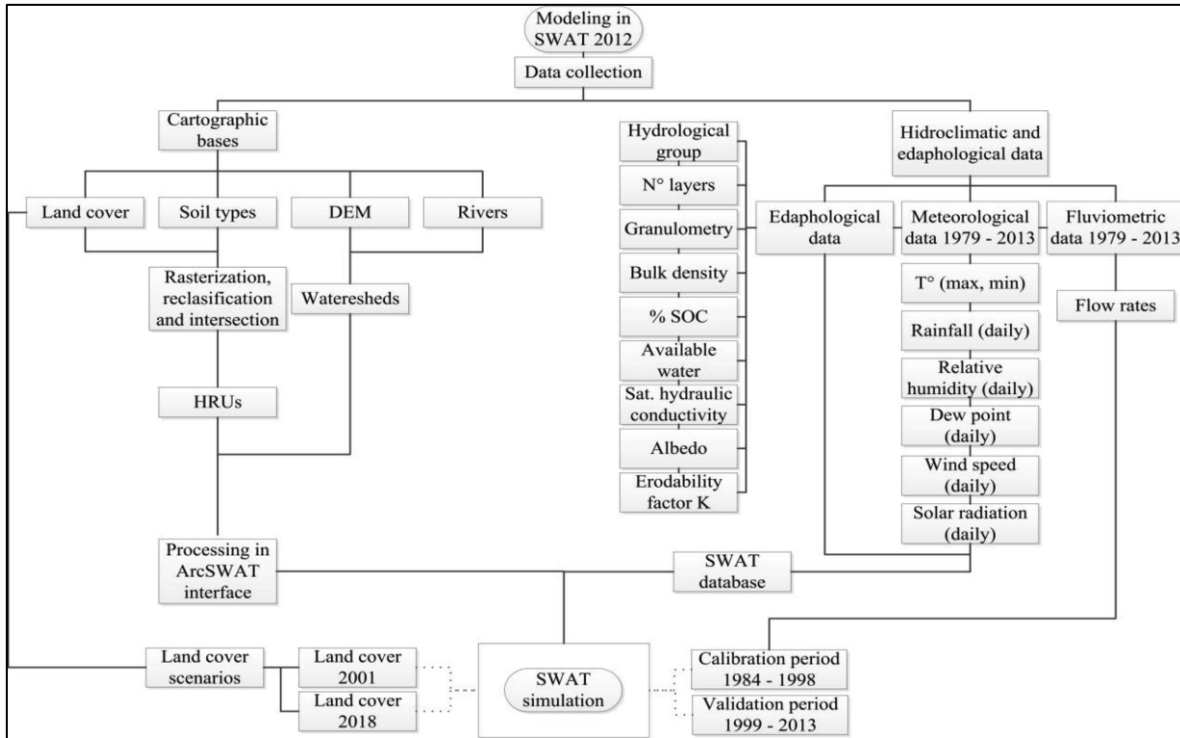


Figura 2. Diagrama de flujo del modelo SWAT.
Fuente: Esse et al. (2021).

Para que el modelo muestre un buen desempeño y credibilidad es que se debe realizar un proceso de calibración y validación para la variable que es de interés estudiar. Moriasi et al. (2007) recomienda utilizar diferentes estadísticos en la evaluación del rendimiento del modelo. En otros estudios revisados, es un factor común encontrar la utilización de los estadísticos Coeficiente de Determinación (R²), Nash-Sutcliffe (NS) y el porcentaje bias (PBIAS) (Alemu et al., 2022; Gilboa et al., 2015; Trang et al., 2017; Yevenes & Mannaerts, 2011).

Para ayudar en este proceso de probar el rendimiento del modelo, es que se ha desarrollado un software llamado SWAT CUP, este software trae consigo programas de calibración automatizada, que involucra correr el modelo, alterar los parámetros del modelo cuidadosamente y extraer la información que se requiere (Mekonnen & Manderso, 2023).

En Chile, este modelo ha sido diversamente utilizado. En la base de datos de Web Of Science, se encuentran 39 investigaciones las cuales utilizan como herramienta

el modelo SWAT y que tienen como área de estudio a Chile. Los usos varían entre el cambio de uso de suelo y los impactos en la hidrología de las cuencas (Aguayo et al., 2016; Martínez-Retureta et al., 2020; Moya et al., 2022; Pereira et al., 2022); Impacto del cambio climático en la hidrología de una cuenca en el centro sur del país (Martínez-Retureta et al., 2021); Impactos de cambio de uso de suelo y cambio climático en las cuencas (Galleguillos et al., 2021; Martínez-Retureta et al., 2022); entre otros.

2.4. Cambio de uso de suelo

Los suelos juegan un rol importante en el movimiento, almacenamiento y transformación del agua. Aproximadamente el 65% del agua que cae a la tierra se almacena o se evapora del suelo y las plantas (Oki & Kanae, 2006).

El uso de suelo, según la EPA, es el término que se utiliza para describir el uso humano de la tierra, representando las actividades económicas y culturales (usos agrícolas, residenciales, industriales, entre otros.) que se practican en un área determinada. Bajo esta línea es que Paul and Rashid (2017) definen el cambio de uso de suelo como un proceso por el cual las actividades humanas transforman el paisaje natural, refiriéndose a cómo se ha utilizado la tierra, haciendo hincapié en el papel funcional de la tierra para las actividades económicas. El cambio de uso de suelo es una de las principales causantes de los impactos producidos en la naturaleza por acción humana.

El uso de suelo y el cambio de uso del suelo inducidos directamente por el hombre analiza las influencias de los componentes terrestres de los ecosistemas (WWAP, 2018), siendo un determinante importante de los ciclos de agua a escala local, regional y continental. Las decisiones sobre el uso de suelo pueden tener importantes consecuencias para los recursos hídricos, las personas, la economía y el medio ambiente (WWAP, 2018).

2.1. Cambios de uso de suelo en el centro – sur de Chile

En Chile, el cambio de uso de suelo se ha visto afectado drásticamente a lo largo de las últimas décadas, convirtiendo grandes extensiones de bosque nativo en plantaciones exóticas para la industria forestal y para la agricultura (Aguayo et al., 2009; Fierro et al., 2017; Rojas, 2018). Tendencia que coincide con la situación mundial (Manushevich & Beier, 2016). Este crecimiento en las especies exóticas como el *Pinus spp* y *Eucalyptus spp*, se deben principalmente al decreto de ley 701, el cual entre los años 1986 y 2011 subsidió el 75% del costo de las plantaciones a los propietarios forestales, además de otorgarles protección permanente de las tierras ante expropiación. Si bien se decretaron las medidas de protección para los ecosistemas nativos de la zona, estas medidas no siempre se cumplieron, lo que condujo a situaciones en las que el estado subsidió la sustitución de bosque nativo por especies exóticas (Heilmayr et al., 2020).

2.2. Efectos del cambio de uso de suelo en las cuencas hidrográficas.

El uso de suelo generalmente ha sido considerado como un problema ambiental local, pero se está convirtiendo en un problema de importancia global. Este puede alterar el equilibrio superficial y la distribución de las precipitaciones, evapotranspiración, escorrentía y flujo de las aguas subterráneas; estos dos últimos suelen aumentar cuando se tala la vegetación (Foley et al., 2005).

Los impactos producidos por este proceso antropogénico se han podido estudiar en diferentes escalas de tiempo. Ni et al. (2021), para un estudio realizado en la subcuenca del río Big Sunflower, uno de los principales tributarios del río Yazoo-Mississippi, consideró el cambio de uso de suelo en un periodo de 6 años donde principalmente se desarrolla la agricultura, demostró, a través de modelación con el software SWAT, que es posible encontrar cambios en los caudales, aumentos en la carga de sedimentos en los cuerpos de agua (resultado coincidente con los de Yan et al. (2013) y aumento en los niveles de nutrientes (nitrógeno y fosforo) valores coincidentes con otros estudios (Lee et al. 2008; Lee et al. 2019). Hay que tener en

consideración que la cuenca de estudio tuvo un cambio desde uso de suelo forestal a uso de suelo agrícola y que la escala de tiempo es pequeña. Por otro lado, está el estudio de Yan et al. (2013), en el cual, para un periodo de tiempo de 20 años, propone cambios más significativos en los impactos producidos por el cambio de uso de suelo en los cuerpos de agua. La gran mayoría de estudios consultados coinciden en los resultados antes mencionados, destacando en algunos el aumento de escorrentía superficial (Lee et al. 2008; Lee et al. 2019; Teklay et al., 2021) o el aumento de la evapotranspiración (Liu et al., 2013).

Para el caso de Chile, Martínez-Retureta et al. (2020) para la cuenca del río Andalién, obtuvo como resultado el uso de suelo afecta el ciclo hidrológico de forma significativa, los caudales y evapotranspiración se ven aumentados debido al cambio de uso de suelo, mientras que, por otro lado, por ejemplo, la percolación se ve disminuida a lo largo de los años.

2.3. Herramientas de modelación de uso de suelo

El análisis y la modelación del cambio de cobertura y uso de suelo son las principales herramientas para identificar las áreas más susceptibles de cambiar, así ayudándonos en la comprensión de los procesos que se llevan a cambio en el territorio y permitimos desarrollar predicciones en base a lo conocido (Veldkamp & Lambin, 2001; Xiang & Clarke, 2003). Los modelos para predecir los cambios en los usos de suelo se han creado con la finalidad de formalizar nuestro conocimiento y analizar, reconocer y anticipar el abandono de las tierras (Parker et al., 2001; Verburg et al., 2004). Potencialmente los modelos podrían usarse como herramienta de apoyo para las decisiones de los gestores de tierras (Qacami et al., 2023).

Dentro de los modelos de uso de suelo se encuentra el Land Change Modeler (LCM), el cual desde su creación en el 2007 ha sido aplicado en muchas disciplinas a una diversidad de áreas geográficas (Qacami et al., 2023). Este modelo ha sido usado para explicar, predecir y proyectar el pasado, presente y el futuro de las

condiciones del paisaje, lo cual es importante para los tomadores de decisiones y el desarrollo de políticas en diferentes áreas (Shooshtarian et al., 2018).

LCM ofrece diversas metodologías con las cuales es posible crear distintos tipos de escenario, según las condiciones iniciales y antecedentes que se tengan. Una de esas metodologías es la red neuronal Perceptrón Multicapa (Multi Layer Perceptron neural network, MLP) la cual es una herramienta muy potente para modelar relaciones no lineales complejas. Se recomienda la utilización para un número máximo de 9 transiciones.

La cadena de Markov utilizada por el software para generar el escenario de cambio de uso de suelo, ayuda a generar una matriz de transición la cual calcula la probabilidad de cambio de un píxel a otro, simulando un estado futuro a partir de otros precedentes (Eastman, 2012; Paegelow et al., 2003; Reynoso Santos et al., 2016).

2.4. Casos de estudio internacionales y nacionales

Tabla 1. Estudios nacionales e internacionales sobre modelación de los impactos del CUS en el régimen hídrico.

Escenario uso de suelo	Área de estudio	Cambios en la cuenca	Referencia
Aumento de tierras agrícolas; disminución de bosques y pastizales.	Cuenca río Finchaa, Etiopia Área 3781 km ²	Aumento de escorrentía y caudales	Dibaba et al. (2020)
Aumento de tierras agrícolas; disminución de bosque.	Cuenca río Dong Nai, Vietnam Área 7500 km ²	Aumento de escorrentías; aumentos de caudales en periodos húmedos y disminución en periodos secos	Khoi and Suetsugi (2014a)
Sólo bosque nativo (NF); Bosque mixto (Mix); Suelos agrícolas (Agr)	3 subcuencas del río Quepe Área 540 km ²	NF: aumento de caudal; Mix: disminución de caudal; Agr: aumento de caudal.	Esse et al. (2021)

Fuente: Elaboración propia

2.5. Pregunta de investigación

¿Cómo afecta el cambio de uso de suelo en los caudales diarios de la Cuenca del Río Vergara para el año 2030?

2.6. Objetivo general

- Evaluar los efectos del cambio de uso de suelo en los caudales diarios bajo un escenario de uso de suelo para el año 2030.

2.7. Objetivos específicos

- Generar un modelo hidrológico SWAT para la cuenca del Río Vergara, región del Biobío, Chile Central.
- Generar un escenario de uso de suelo para el año 2030 para la cuenca del Río Vergara.
- Determinar la existencia de diferencias significativas en los caudales diarios, bajo un escenario de cambio de uso de suelo a para el año 2030.

3. METODOLOGÍA

3.1. Área de estudio

La Cuenca del río Vergara nace próxima a la localidad de Nacimiento, en la región del Biobío (figura 3). El río Vergara, por el cual su cuenca toma ese nombre, es el tributario meridional más importante que recibe el río Bio bío y nace de la confluencia entre los ríos Malleco y Rehue.

La cuenca presenta un área de 4390 km², presenta un clima mediterráneo de lluvia invernal y hacia la zona cordillerana, presenta un clima templado lluvioso con sequedad estival. Dentro de las actividades económicas que se dan dentro de la cuenca, se encuentra la agricultura y la silvicultura, desarrolladas principalmente en la zona media de la cuenca, mientras que en la zona más alta se encuentran diferentes especies arbóreas nativas de la zona. Los suelos que predominan en la cuenca son principalmente los suelos tipo Barbara y Cauquenes. El primero presenta una topografía ondulada, buen drenaje, utilizada principalmente por *Nothofagus* y compuesto por material de cenizas volcánicas; por el otro lado el suelo de tipo Cauquenes, presenta una topografía variable con la presencia de lomajes y cerros, presenta un escurrimiento superficial rápido e interno bueno, compuesto principalmente de materiales graníticos y/o granodioríticos (Tapia, 2004).

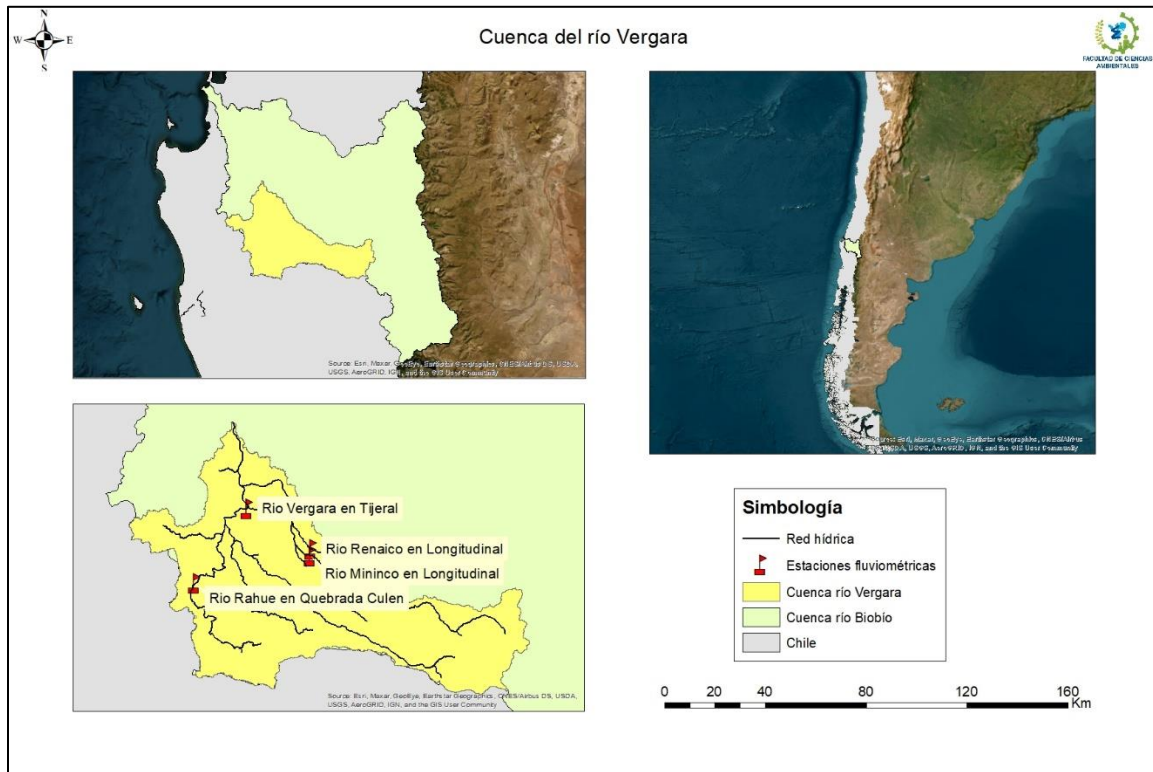


Figura 3. Localización cuenca del río Vergara.
Fuente: Elaboración propia a través de ArcGIS.

3.1.1. Clima

En la figura 4 se ve reflejada la espacialidad que toman los diferentes climas antes descritos, siendo notoria la prevalencia del clima mediterráneo de lluvia invernal, donde llueve en promedio 700 mm al año y presenta una temperatura promedio de 11 °C, en gran parte de la cuenca; mientras que el segundo tipo de clima predominante es el clima templado lluvioso con leve sequedad estival, el cual se encuentra únicamente para la zona más alta de la cuenca y con precipitaciones anuales promedio de 2100 mm y temperaturas promedios de 9.5 °C.

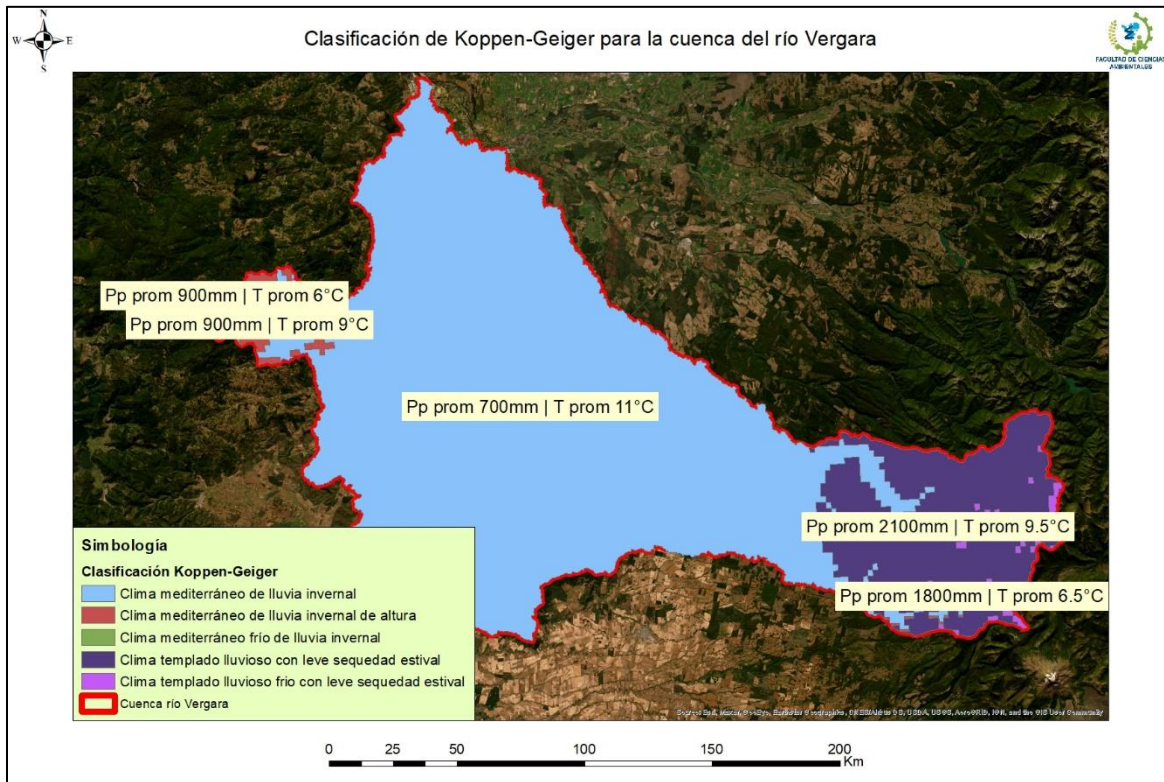


Figura 4. Clasificación de Köppen para la cuenca del río Vergara.
Fuente: Elaboración propia basado en Sarricolea et al. (2017).

3.1.2. Presiones antropogénicas.

La cuenca del río Vergara se encuentra altamente presionada por las actividades antrópicas que se desarrollan en ella, principalmente la silvicultura con especies exóticas como lo son el Pino y el Eucalipto y la agricultura, siendo cultivadas especies como el trigo, maíz, triticale y la papa. En la tabla 2 se detallan los usos de suelo con sus respectivas áreas en hectárea y en porcentaje de uso del territorio para el periodo 2008. En la misma tabla también se puede apreciar los usos y áreas correspondientes para el año 2015. Se destacan de sobremanera el aumento en la presencia de plantaciones y tierras agrícolas para un periodo tan corto de tiempo como lo son 7 años.

Tabla 2. Usos de suelo asociados a la cuenca del río Vergara año 2008 y 2015.

Uso de suelo	2008		2015	
	Área (hectáreas)	Área (%)	Área (hectáreas)	Área (%)
Áreas Sin Vegetación	148.55	0.0%	242.32	0.1%
Áreas Urbanas e Industriales	2040.47	0.5%	2241.67	0.5%
Bosque Mixto	2783.16	0.6%	6051.28	1.4%
Bosque Nativo	97570.82	22.4%	105873.53	24.2%
Cuerpos de Agua	1368.85	0.3%	1413.28	0.3%
Humedales	343.34	0.1%	453.98	0.1%
Plantaciones	188890.40	43.3%	198020.54	45.3%
Praderas y Matorrales	40229.19	9.2%	37698.93	8.6%
Terrenos Agrícolas	102995.86	23.6%	84697.20	19.4%

Fuente: Elaboración propia a partir de la información obtenida de la SIT CONAF.

En la figura 5 se muestra la espacialidad que tienen estos usos de suelo en el territorio, teniendo en la parte zona superior la representación para el año 2008 y en la parte inferior la espacialidad para el año 2015.

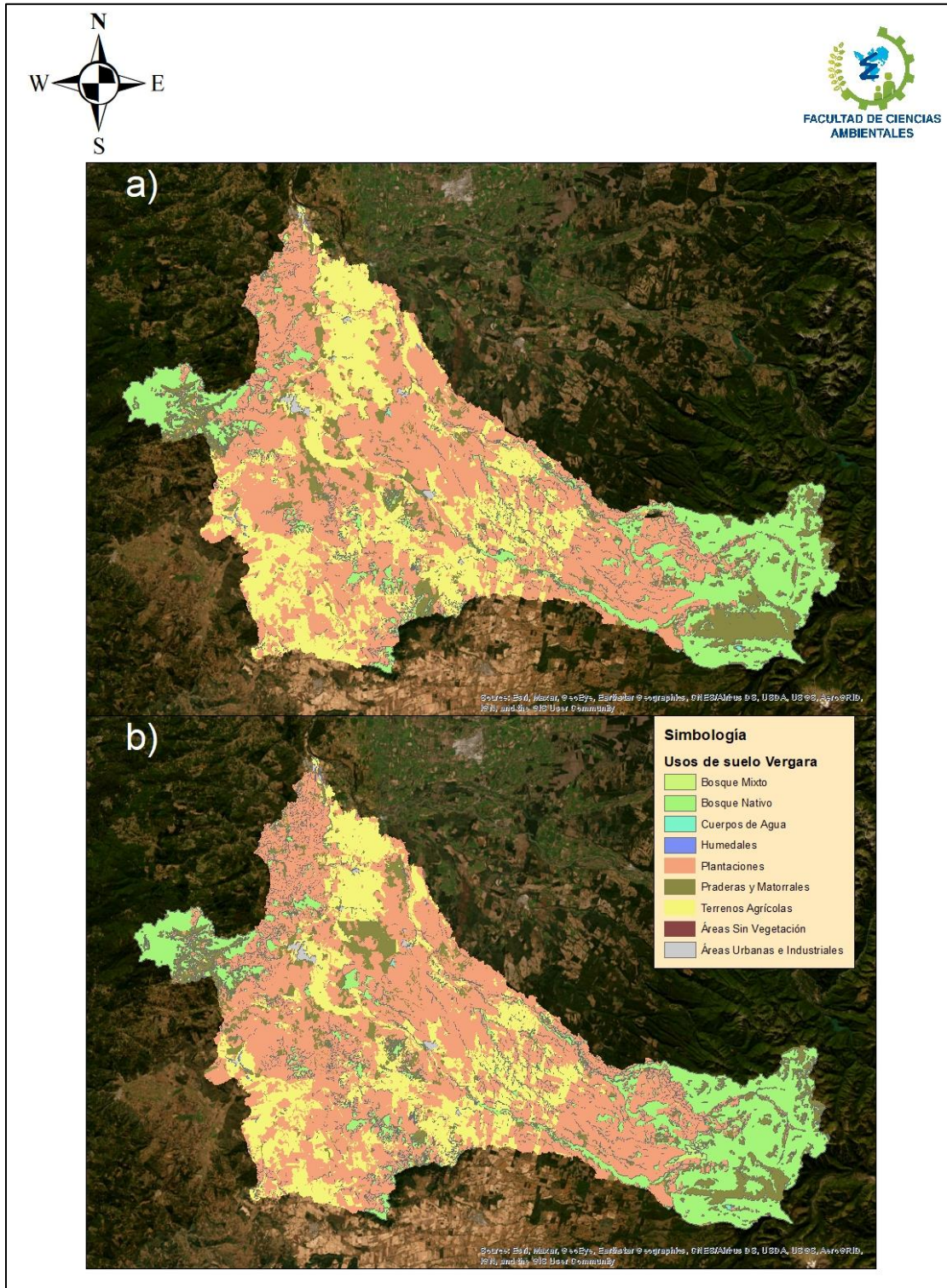


Figura 5. Usos de suelo de la cuenca del río Vergara. a) año 2008; b) año 2015.
Fuente: Elaboración propia a través de ArcGIS con la información obtenida de SIT CONAF.

3.1.3. Información hidrometeorológica.

En la cuenca del río Vergara se encuentran 5 estaciones fluviométricas pertenecientes a la Dirección General de Aguas (DGA), sin embargo, solo 4 fueron utilizadas debido a la disponibilidad de datos para el posterior proceso de calibración. Para la selección de las estaciones el filtro aplicado fue tener información de caudales observados disponibles para el periodo 2002 – 2011, pensando en la calibración del modelo y luego un periodo de al menos 3 años entre el 2012 – 2019 para el proceso de validación. Las estaciones utilizadas se muestran en la figura 5

Según la información proporcionada por el explorador climático del CR2, las estaciones cuentan datos a partir de 1960-1970 hasta el año 2020. En las figuras 6, 7, 8 y 9, a continuación, es posible visualizar de forma gráfica la información fluviométrica de la base de datos para las estaciones seleccionadas bajo los criterios mencionados en el párrafo anterior.

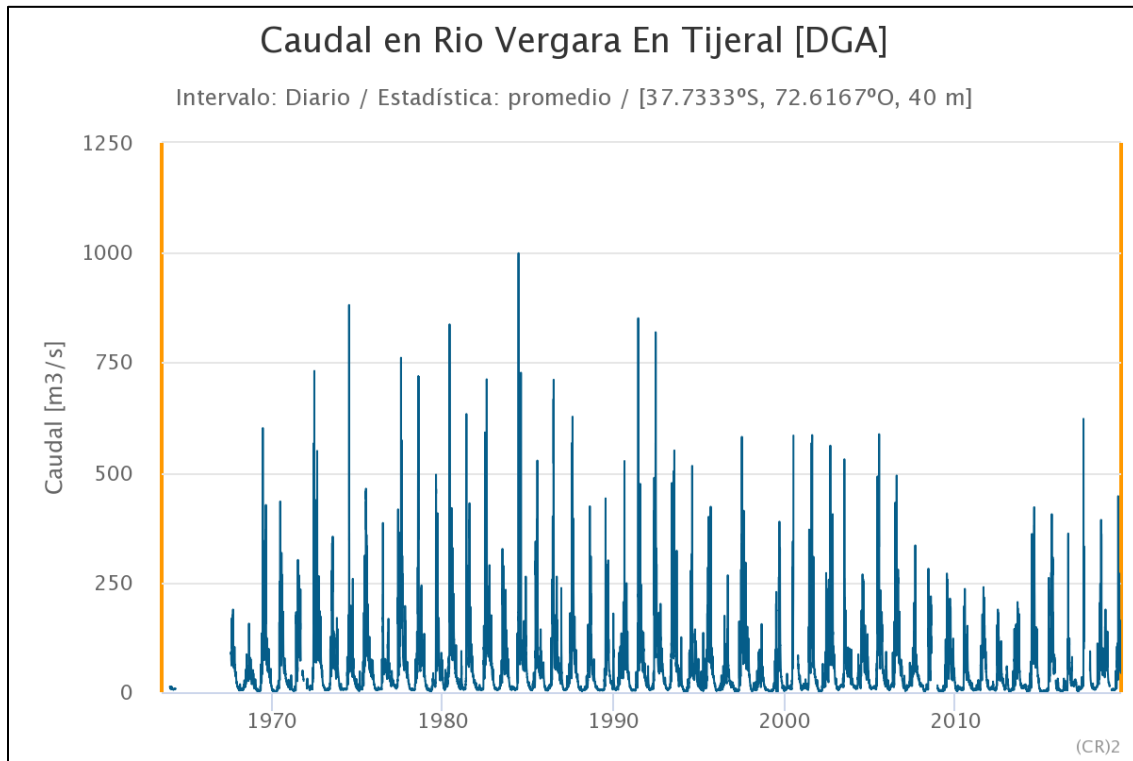


Figura 6. Información fluviométrica disponible en CR2 para la estación Río Vergara en Tijeral.

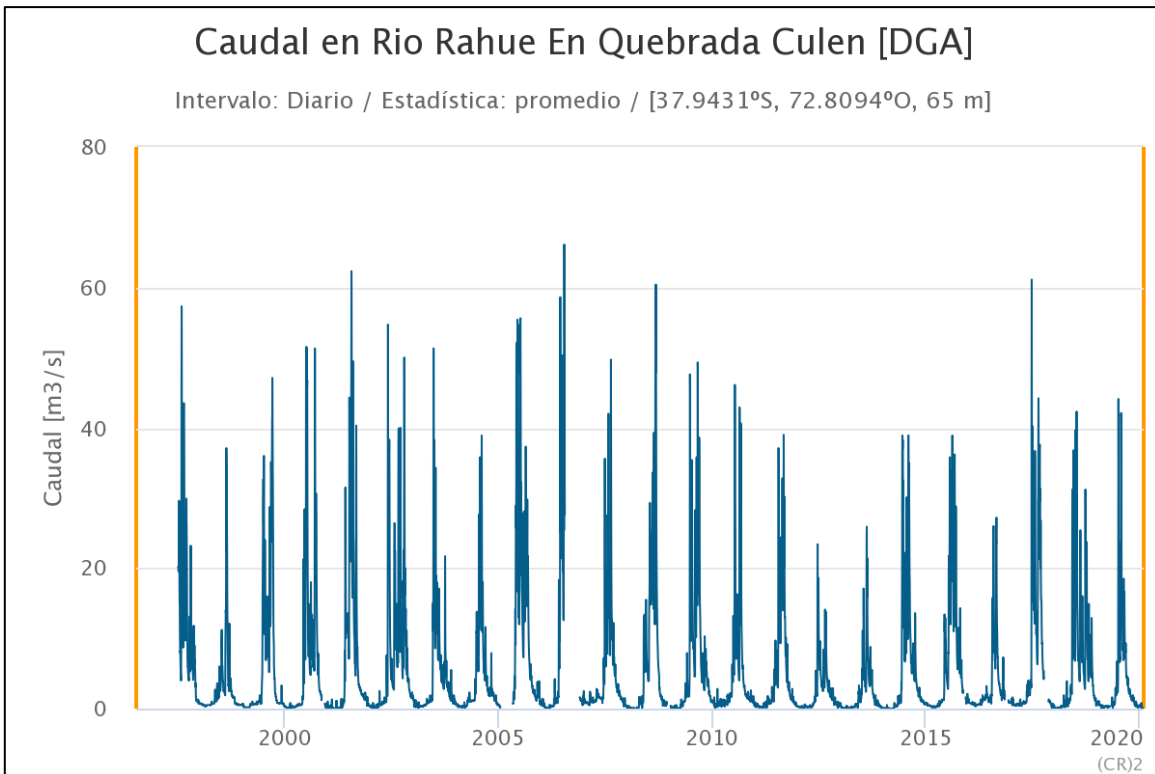


Figura 7. Información fluviométrica disponible en CR2 para la estación Río Rahue En Quebrada

Culen.

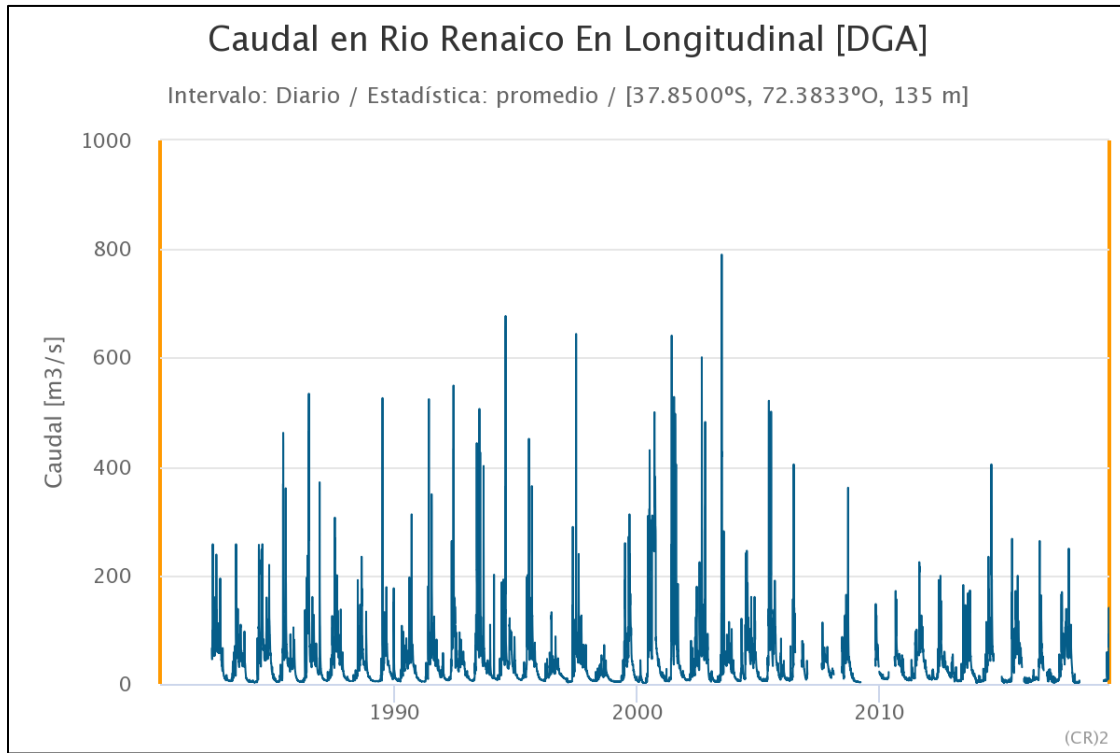


Figura 8. Información fluviométrica disponible en CR2 para la estación Río Renaico en Longitudinal.

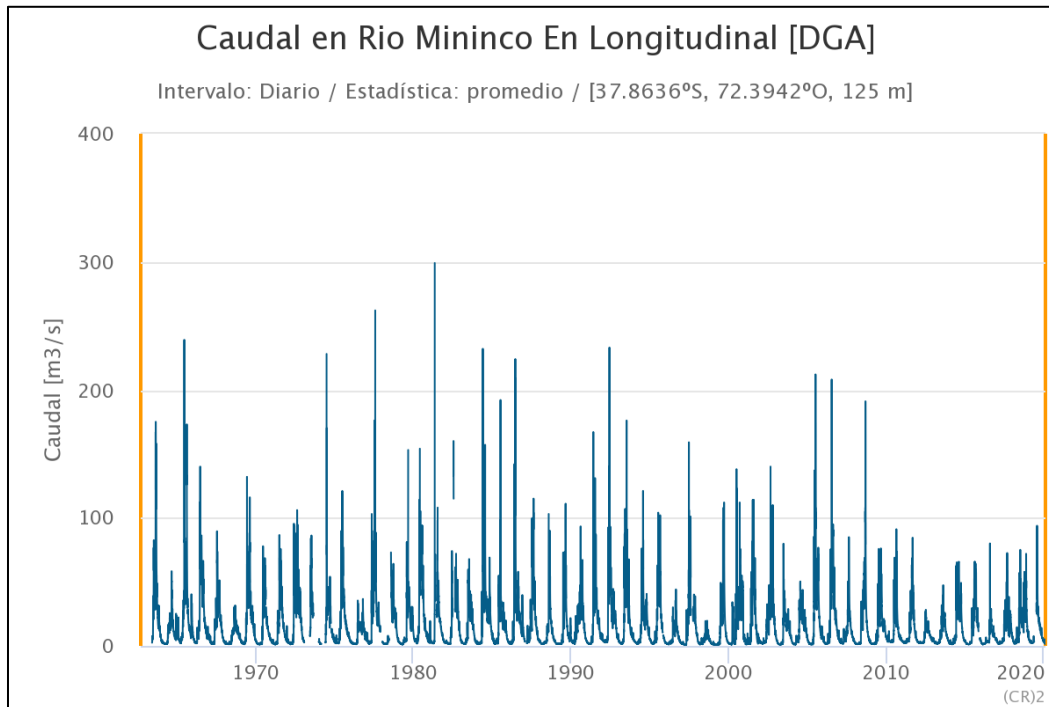


Figura 9. Información fluviométrica disponible en CR2 para la estación Río Mininco en Longitudinal.

3.1.4. Modelo hidrológico

Con respecto al modelo hidrológico, es que se ha escogido el modelo Soil & Water Assessment Tool (SWAT), el cual ha sido ampliamente utilizado en estudios hidrológicos alrededor del mundo. Es un modelo de parámetros semi-distribuidos, que funciona en una escala de tiempo diaria. Fue desarrollado por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos, con el fin de evaluar los impactos de la gestión en la tierra para las cuencas hidrográficas del país. Funciona bajo la secuencia que se visualiza a continuación en la figura 10.

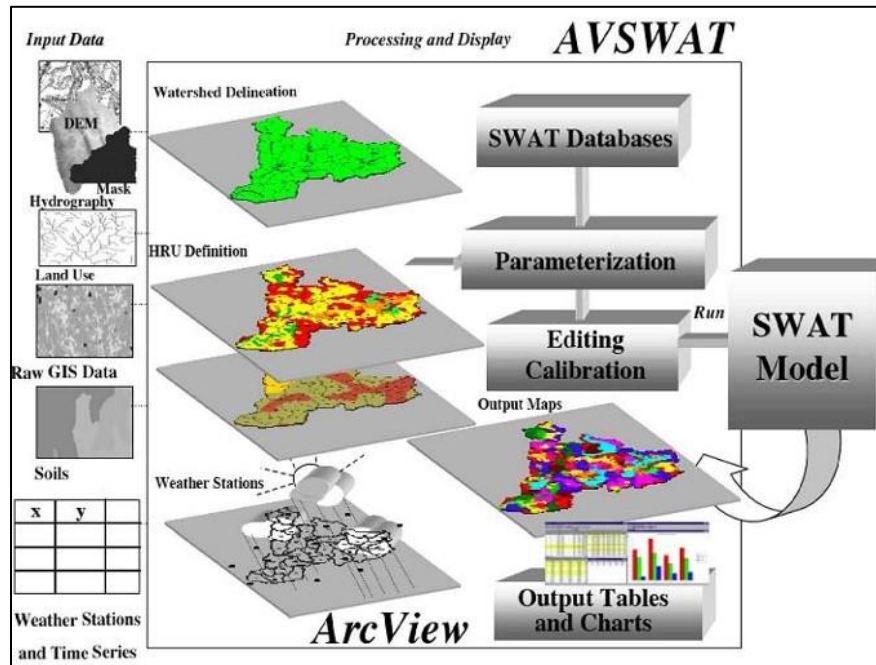


Figura 10. Esquema del proceso de modelación con SWAT.

3.2. OE 1: Elaborar un modelo hidrológico para la cuenca del Río Vergara

Calibración y validación del modelo.

Para la calibración del modelo hidrológico, es que se utilizará el software SWAT CUP, una interfaz desarrollada para el modelo SWAT (Mekonnen & Manderso, 2023). El cual a través del método “muestreo del hipercubo latino”, itera los parámetros que son de interés calibrar (como lo pueden ser parámetros hidrológicos, sedimentológicos o de nutrientes).

Para el proceso de calibración y los parámetros a utilizar se utiliza la metodología de regionalización propuesta por Abbaspour et al. (2015) donde a partir de los gráficos simulados con los valores predeterminados, se modifican los parámetros claves según la necesidad de los gráficos, según indica a continuación en la figura 11.

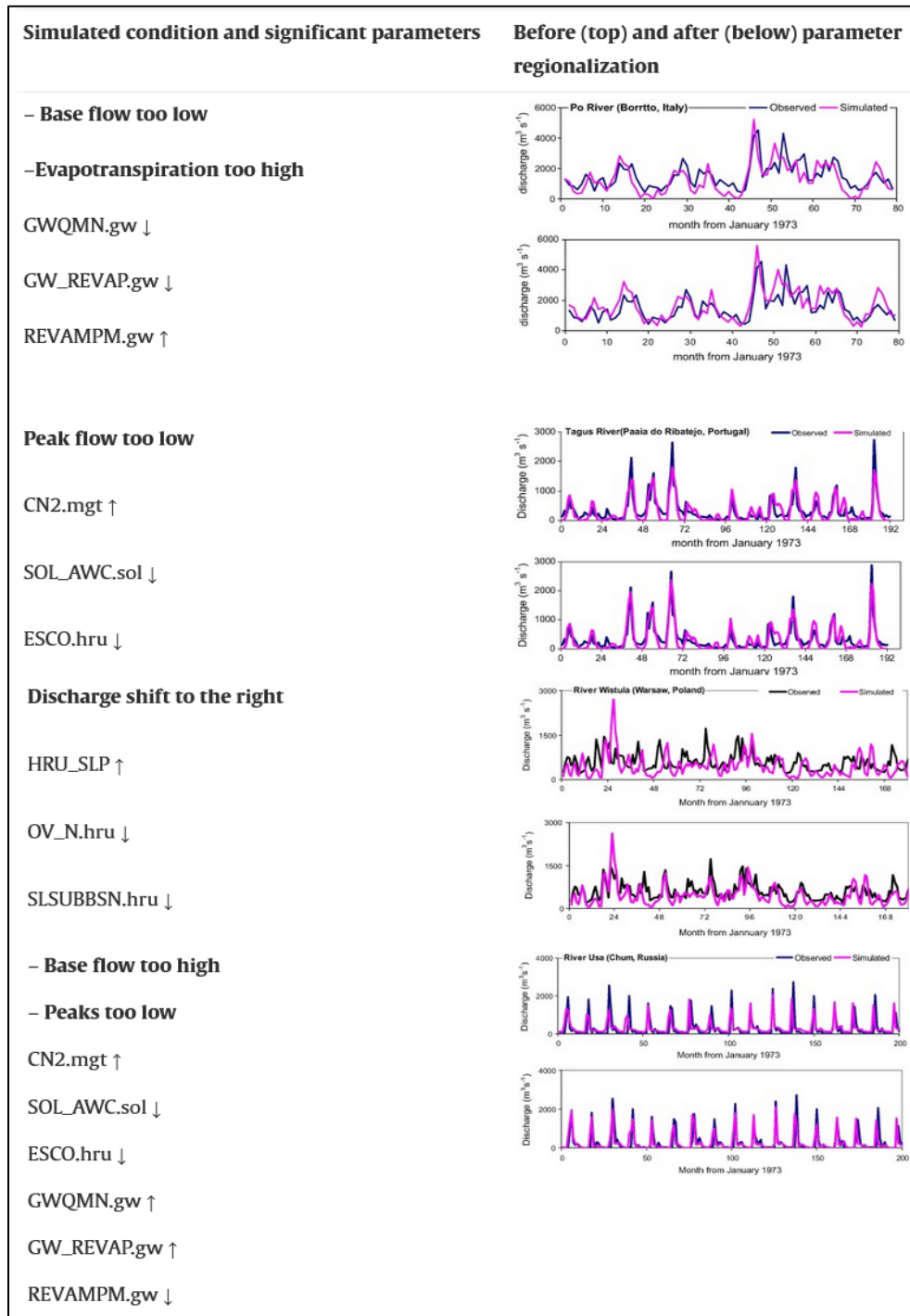


Figura 11. Regionalización propuesta por Abbaspour et al. (2015) para el proceso de calibración.
Fuente: Abbaspour et al. (2015).

El criterio de evaluación para dar por finalizado el proceso, son los indicadores estadísticos (R2, NSE y PBIAS) obtenidos a partir de la calibración, con los cuales se evaluará la precisión, rendimiento y confianza del modelo.

Tabla 3. Índices estadísticos, nombre y fórmula.

Estadístico	Nombre	Fórmula
R2	Coefficiente de determinación	$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \overline{Q_{obs}}) \cdot (Q_{sim,i} - \overline{Q_{sim}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \overline{Q_{obs}})^2 \cdot (Q_{sim,i} - \overline{Q_{sim}})^2}}$
NS	Eficiencia de Nash-Sutcliffe	$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - Q_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \overline{Q})^2}$
PBIAS	Porcentaje Bias	$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i}) \cdot 100}{\sum_{i=1}^n Q_{obs,i}}$

Fuente: elaboración propia.

El coeficiente R^2 es el coeficiente de determinación que corresponde a una medida estadística la cual indica la fiabilidad del modelo según los datos observados, en otras palabras, mide la capacidad explicativa del modelo. Se estima a través de la fórmula en la tabla 3, donde $Q_{obs,i}$ son los valores observados inicialmente, $\overline{Q_{obs}}$ corresponde al promedio de los caudales observados, $Q_{sim,i}$ son los valores de caudales simulados y $\overline{Q_{sim}}$ corresponde al promedio de los caudales simulados. Los valores del coeficiente de determinación van de 0 a 1, donde el 0 indica que el modelo no logra una buena simulación de los caudales observados y el 1 o valores cercanos indican que el modelo predice los caudales de forma perfecta o casi perfecta, dependiendo del caso.

El NSE (Nash-Sutcliffe Efficiency) mide la variabilidad de las observaciones, siendo el valor perfecto $NSE= 1$. Esta dado por la formula en la tabla 3, donde $Q_{Sim,i}$ es el caudal inicial simulado, Q_i es el caudal real observado y \bar{Q} es el valor promedio de los caudales reales observados. Los valores referenciales para el NSE están dados entre 0 y 1, donde para el primero es un valor muy deficiente, mientras que los valores de 0.5 a 1 van de buenos a muy buenos.

El porcentaje de sesgo, también conocido como PBIAS, mide la tendencia de que los valores simulados sobrestimen o subestimen los datos de caudal reales, siendo positivos o negativos, respectivamente. Este coeficiente esta dado bajo la fórmula en la tabla 3, donde $Q_{Sim,i}$ es el caudal inicial simulado, $Q_{Obs,i}$ es el caudal real observado. Los valores de este coeficiente van desde $-\infty < PBIAS < +\infty$, siendo valores aceptables para los modelos hidrológicos desde el -25% al 25%.

En la tabla 4 se presenta la clasificación según los valores obtenidos en los índices estadísticos, los cuales serán utilizados como criterio de evaluación de los resultados obtenidos en la calibración y posterior validación del modelo hidrológico.

Tabla 4. Clasificación de índices estadísticos.

R2	NS	PBIAS	Clasificación
$0.75 < R2 \leq 1.0$	$0.75 < NS \leq 1.0$	$PBIAS \leq \pm 10$	Muy buena
$0.6 < R2 \leq 0.75$	$0.6 < NS \leq 0.75$	$\pm 10 \leq PBIAS \leq \pm 15$	Buena
$0.5 < R2 \leq 0.6$	$0.5 < NS \leq 0.6$	$\pm 15 \leq PBIAS \leq \pm 25$	Satisfactorio
$0.25 < R2 \leq 0.5$	$0.25 < NS \leq 0.5$	$\pm 25 \leq PBIAS \leq \pm 50$	Malo
$R2 \leq 0.25$	$NS < 0.25$	$\pm 50 \leq PBIAS$	Inapropiado

Fuente: Adaptado de (Liew et al., 2007; N. Moriasi et al., 2007; P. Fernandez et al., 2005)

Para el proceso de validación, es que se volverá a simular los caudales de la cuenca, con los mismo parámetros calibrados, solo con la diferencia del periodo de tiempo, el cual tiene que ser completamente distinto y no necesariamente ser continuo al periodo calibrado. Los periodos de validación fueron propuestos según

la disponibilidad de datos fluviométricos en la base de datos de la DGA, que se listan en la tabla 5 a continuación:

Tabla 5. Estaciones junto al periodo utilizado para el proceso de calibración y validación.

Estación	Periodo calibrado	Periodo validado
Río Vergara en Tijeral	2002 – 2011	2017 – 2019
Río Renaico en Longitudinal	2002 – 2011	2012 – 2014
Río Mininco en Longitudinal	2002 – 2011	2012 – 2017
Río Rahue en Quebrada Culen	2002 – 2011	2012 – 2019

Fuente: Elaboración propia.

3.3.OE 2: Generar un escenario de uso de suelo para el año 2030.

La generación del escenario de uso de suelo se realizará utilizando el software TerrSet, el cual es un sistema de software geoespacial integrado diseñado para la supervisión y modelización del sistema terrestre para el desarrollo sostenible.

La opción de Land Change Modeler (LCM) del software Idrisi TerrSet funciona a partir de un análisis de imágenes cuantitativo para dos fechas diferentes utilizando una matriz de tabulación cruzada, la cual configura arreglos simétricos que permite detectar los cambios, permanencias y las transformaciones de las coberturas (Palacio et al., 2002; Pontius et al., 2004). Este módulo permite la utilización de una de las redes neuronales artificiales (ANNs, Artificial Neural Networks, en inglés) más populares, el Perceptrón multicapa (MLP, Multi-layer perceptrón, en inglés), poderosa herramienta de modelado, que aplica un procedimiento de entrenamiento supervisado a través de la utilización de resultados conocidos, que junto a la generación de un modelo de función no lineal permite la predicción de datos de salida (Eastman & Toledano, 2018).

3.4.OE 3: Determinar la existencia de diferencias significativas

Para la determinación de diferencias significativas es que se utilizará el software estadístico IBM SPSS (<https://www.ibm.com/es-es/products/spss-statistics>), el cual contiene un conjunto solido de características que permiten el análisis de grandes conjuntos de datos rápidamente. Se trabajará con las pruebas estadísticas que se listan en la figura 12, a continuación:

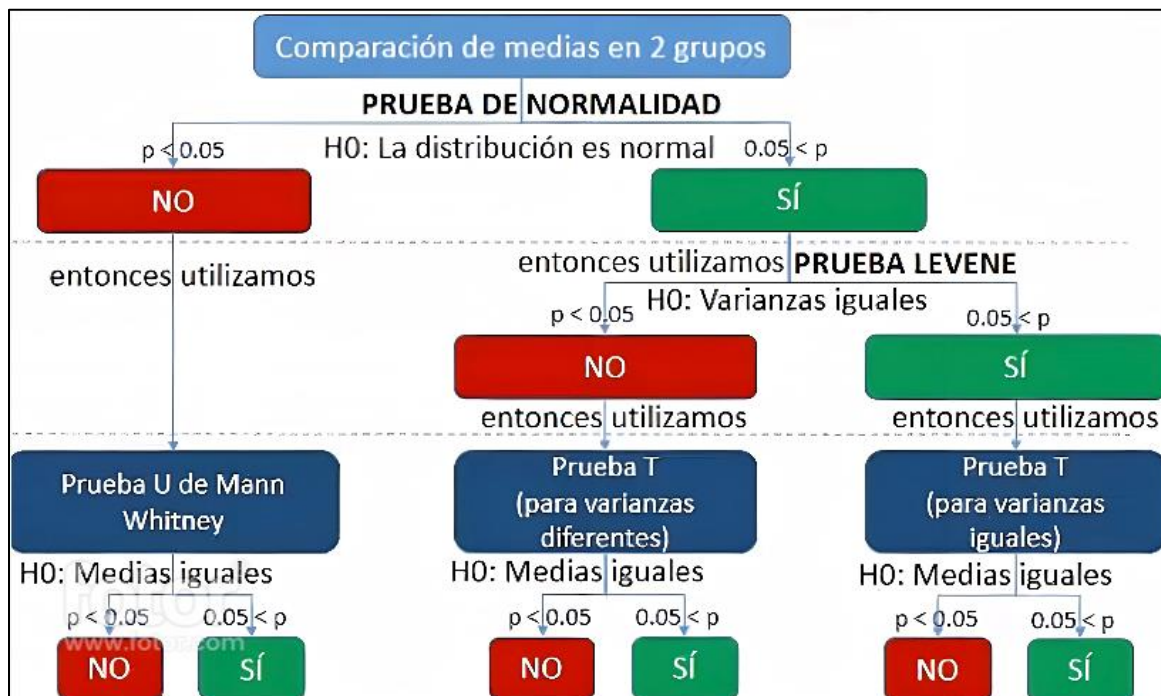


Figura 12. Orden jerárquico para realizar una prueba de significancia en conjuntos de datos.

Los datos por analizar serán los caudales generados por el modelo calibrado y validado para el periodo 1995 – 2019 versus los caudales generados por el mismo modelo anterior, pero en este caso tendrá aplicada la corrección de usos de suelo del escenario generado para el año 2030.

La prueba de normalidad para el conjunto de datos estará dada por la prueba no paramétrica Kolmogorov–Smirnov potenciada con la corrección de Lilliefors, donde la hipótesis nula (H0) indica que la distribución de los datos es normal si $0,05 < p$,

también entrega un valor denominado “estadístico KS”, el cual indica la máxima discrepancia entre la función de distribución acumulativa empírica (ECDF) de los datos observados y la función de distribución acumulativa de la distribución teórica o de la segunda muestra que se está comparando. El estadístico KS se utiliza para evaluar cuán bien se ajustan los datos observados a la distribución teórica o cuán similar es la distribución de dos muestras. Este valor puede variar entre 0 y 1, siendo el 0 la prueba de que no hay discrepancia entre las distribuciones y el 1 indica una discrepancia absoluta en las distribuciones, siendo significativamente diferentes.

Si se rechaza la hipótesis nula, se procede con una prueba U Mann Whitney, la cual es una prueba no paramétrica que busca comparar dos grupos independientes, ayudando a determinar si es que existen diferencias significativas entre los grupos analizados. La hipótesis nula de la prueba indica que no hay diferencias significativas entre los dos sets de datos analizados. Si la significancia $p < 0.05$, se rechaza la hipótesis nula, por lo que en consecuencia se confirma la hipótesis alternativa la cual vendría a ser que el cambio en el uso de suelo afecta de forma significativa los caudales de la cuenca. Para la realización de este análisis es que los caudales generados por el modelo se separaran en dos periodos: cálidos (octubre – marzo) y periodos fríos (abril – septiembre).

En el caso de que los datos llegasen a ser normales, se procede con la prueba estadística de Levene, la cual permite identificar si la varianza de dos grupos analizados es igual. La hipótesis nula indica que las varianzas de los grupos son iguales si $0,05 < p$. De cumplirse la hipótesis nula anterior, se procede con la prueba T de Student, utilizada para comparar la media de dos muestras independientes, obteniendo si existen diferencias significativas en los grupos analizados. La hipótesis nula indica que la media de los dos grupos es igual, por lo que no habría diferencias significativas si $0,05 < p$.

Para la cuantificación de los posibles efectos que llegase a tener el cambio de uso

de suelo en la hidrología de la cuenca, es que se utilizará un análisis de porcentajes a través de la diferencia porcentual de los caudales a partir de la siguiente formula:

$$\Delta Q = \left(\frac{Q_{cal+esc} - Q_{cal}}{Q_{cal}} \right) \cdot 100$$

Ecuación 1. Diferencia porcentual de caudales.

Donde: ΔQ es la diferencia de caudal en porcentaje diaria, $Q_{cal+esc}$ es el caudal diario para el escenario calibrado y el cambio de uso de suelo aplicado y Q_{cal} el caudal diario calibrado.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Calibración y validación.

Inicialmente, se comenzó la calibración con los caudales mensuales medios en todas las estaciones seleccionadas, para tener una aproximación a los parámetros que tenían mayor influencia en la modelación de los caudales. En la figura 13 Se presentan la gráfica inicial de los caudales observados y simulados para las 4 estaciones en estudio, junto a sus respectivos índices estadísticos, los cuales, si bien presentan en su mayoría un R^2 muy bueno, tienen valores deficientes en NS y PBIAS.

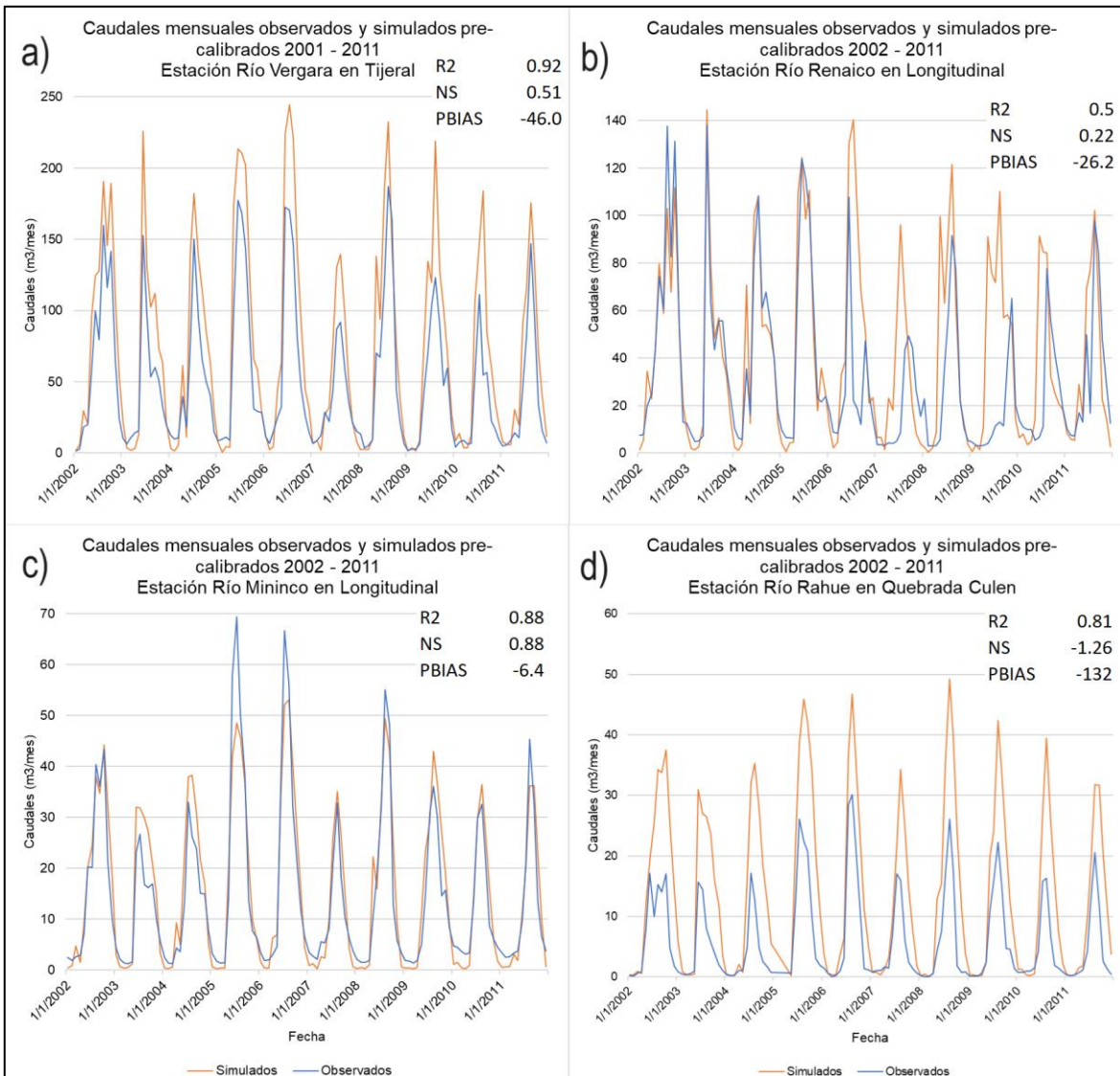


Figura 13. Caudales mensuales observados y simulados pre-calibración 2002 – 2011. A) Estación río Vergara en Tijeral; b) Estación río Renaico en Longitudinal; c) Estación río Mininco en Longitudinal; d) Estación río Rahue en Quebrada Culen.

Fuente: Elaboración propia.

Por los valores anteriores es que se hace necesaria la calibración del modelo y lograr que los índices estadísticos tomen valores aceptables, con la finalidad de que el modelo represente la variabilidad natural observada de buena manera. En la tabla 6 se muestran los parámetros calibrados en cada subcuenca del modelo, siendo la primera de cada una la subcuenca donde se encuentra la estación de monitoreo. También se observa el método utilizado, que en el caso de los parámetros en el que

la variabilidad espacial es importante se utiliza el método “Relative” y en los que se necesitan valores específicos se utiliza el método “Replace”. En las últimas tres columnas se entrega el valor ajustado del parámetro, y el valor mínimo – máximo para el cual fue calibrado.

Tabla 6. Parámetros calibrados en SWAT CUP para los caudales mensuales modelados

Nombre parametro	Subcuencas	Método	Valor ajustado	Valor minimo	Valor maximo
CN2.mgt	15, 16, 17,	Relative	-0.21025	-0.5	0
SOL_AWC(..).sol	19, 20, 21, 22, 23, 27,	Relative	0.5931	0	0.6
ESCO.hru	28, 29, 30, 32, 33, 34, 35, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 44, 45, 49, 50, 51, 52, 54, 57, 58, 59, 61, 62, 63, 64, 65, 70, 71, 72, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 90, 92, 93, 95, 96, 97, 98, 100, 101, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113	Replace	0.70375	0.7	1
CN2.mgt	43, 66, 69,	Relative	-0.24652	-0.477335	-0.225765
SOL_AWC(..).sol	73, 82, 83,	Relative	-0.2415	-0.263393	0.178893
HRU_SLP.hru	84, 85, 86,	Relative	-0.062087	-0.246893	0.184393

OV_N.hru	87, 89, 91,	Relative	0.468067	0.048608	0.545892
SLSUBBSN.hru	94, 99	Relative	0.827716	0.473727	1.021273
CN2.mgt	46, 47, 48,	Relative	0.022504	-0.033104	0.059808
SOL_AWC(..).sol	53, 55, 60,	Relative	0.094052	0.009445	0.125583
ESCO.hru	68, 74, 75,	Replace	0.269257	0.242089	0.286301
GW_REVAP.gw	88, 102	Replace	0.068409	0.048722	0.068518
REVAPMN.gw		Replace	327.886749	304.605713	333.401062
CN2.mgt	64, 65, 70,	Relative	0.040607	0.020561	0.053723
SOL_AWC(..).sol	71, 76, 77,	Relative	1.066692	1.033281	1.085691
ESCO.hru	78, 79, 80,	Replace	0.331158	0.313043	0.345077
GW_REVAP.gw	81, 95, 100,	Replace	0.34749	0.307615	0.359773
REVAPMN.gw	101, 103,	Replace	261.26358	237.179367	293.648834
HRU_SLP.hru	104, 105,	Relative	-0.10093	-0.236367	0.032625
OV_N.hru	108, 109,	Relative	0.270799	0.240553	0.345755
GWQMN.gw	112	Replace	7383.60498	4976.635742	7935.417969

Fuente: Elaboración propia

Para finalizar con la calibración mensual, se corre nuevamente el modelo para cada una de las estaciones, obteniendo los valores de caudales modelados que se ven a continuación. En la figura 14 esta la representación grafica de los caudales modelados para las cuatro estaciones en estudio.

La estación Río Vergara en Tijeral (figura 14^a), presenta índices estadísticos perfectos, siendo estos: $R^2=0.93$, $NS=0.87$ y $PBIAS=-17.2$, indicando que el modelo responde de forma exitosa tanto en precisión como en desempeño para la variable hidrológica.

En la figura 14b se visualizan los caudales simulados para la estación Río Renaico en Longitudinal, los cuales presentan unos índices estadísticos perfectos, $R^2=0.9$, $NS=0.9$ y $PBIAS=0.7$, indicando que tiene un gran desempeño y precisión, a diferencia del anterior, el valor de $PBIAS$ es casi 0, lo que indica que los valores simulados son muy parecidos a los observados.

En la figura 14c se tienen los caudales simulados y calibrados para la estación Río Mininco en Longitudinal, donde presenta índices estadísticos con valores muy

buenos, siendo muy parecidos a los de la estación anteriormente analizada, indicando un gran desempeño y precisión.

Y finalmente en la figura 14d se tienen los caudales modelados para la cuenca del río Rahue en Quebrada Culen. Sus índices estadísticos presentan valores muy buenos. Es con esto que la calibración mensual se da por finalizada con muy buenos valores estadísticos para las cuatro estaciones y un acercamiento a los parámetros que tienen mayor influencia en la modelación de los caudales para este estudio.

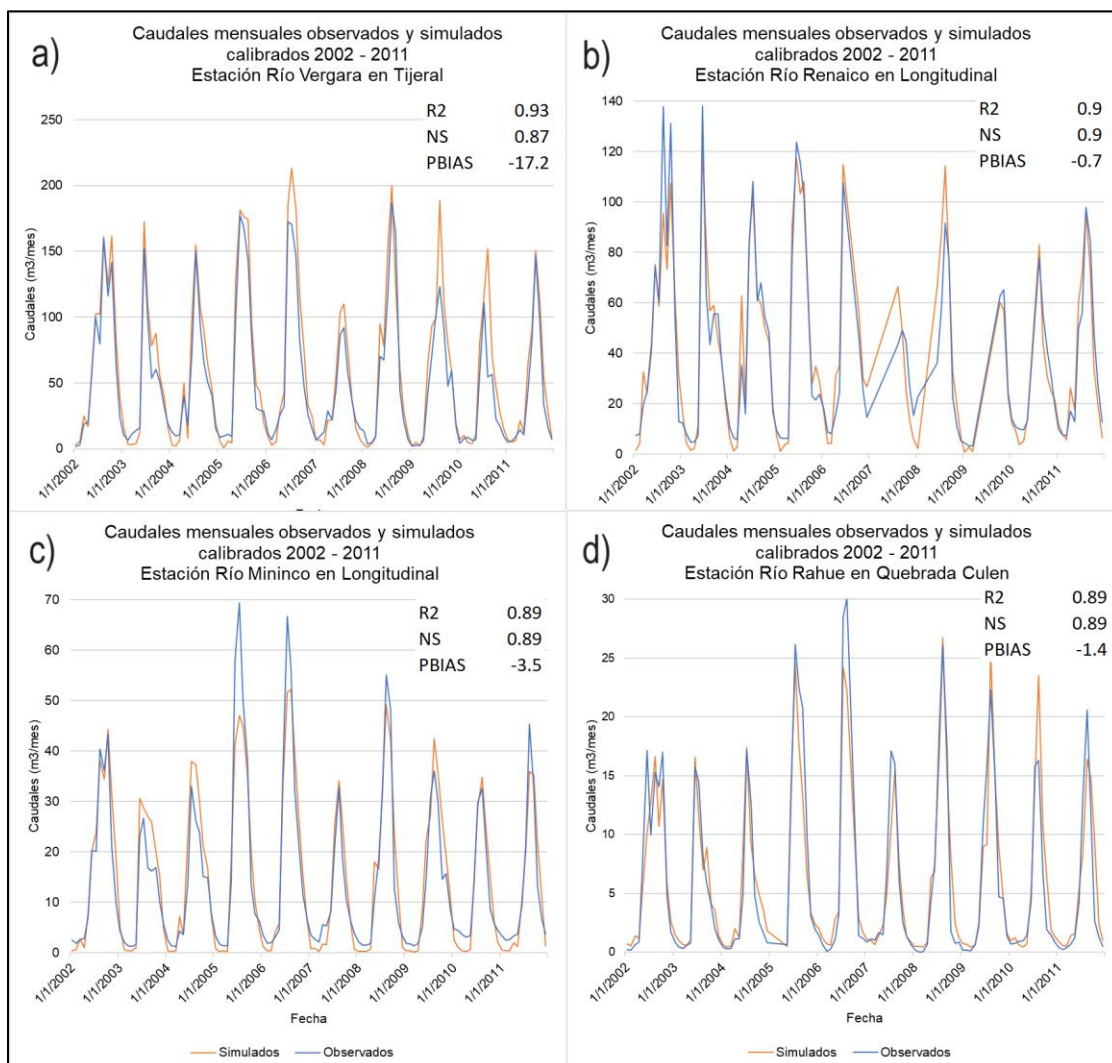


Figura 14. Caudales mensuales observados y simulados calibrados 2002 – 2011. A) Estación río Vergara en Tijeral; b) Estación río Renaico en Longitudinal; c) Estación río Mininco en Longitudinal; d) Estación río Rahue en Quebrada Culen.

Fuente: Elaboración propia

Es con lo anterior que se da inicio al proceso de calibración de forma diaria, partiendo con los parámetros calibrados para el proceso mensual. En un inicio las estaciones seleccionadas presentan resultados deficientes en los resultados diarios (figura 15). Se presentan los valores de los índices estadísticos pre-calibración para las cuatro estaciones.

Para la estación río Vergara en Tijeral (figura 15^a) se puede tener valores de R², NS y PBIAS muy por debajo de lo aceptable.

En la figura 15b se observan los caudales diarios para la estación Río Renaico en Longitudinal, junto a sus parámetros estadísticos, los cuales están en un rango aceptable, pero que de igual forma si se trabajan pueden mejorar considerablemente, dándole así mayor solidez a la posterior validación.

Para los caudales diarios modelados para la estación Río Mininco en Longitudinal (figura 15c), presentan valores estadísticos R² y NS por debajo de lo que se espera que tenga un modelo hidrológico, con valores de 0.5 y 0.37 respectivamente.

La última estación (figura 15d) es la que presenta los parámetros estadísticos más lejos del rango recomendado, con índices que están cerca del mínimo valor que es posible tomar, en este caso R²=0.18 cuando su valor mínimo es 0 y NS= -1.3, cuando sus valores deben ir de 0 a 1, siendo los cercanos a 1 los necesarios para una óptima representación de la realidad.

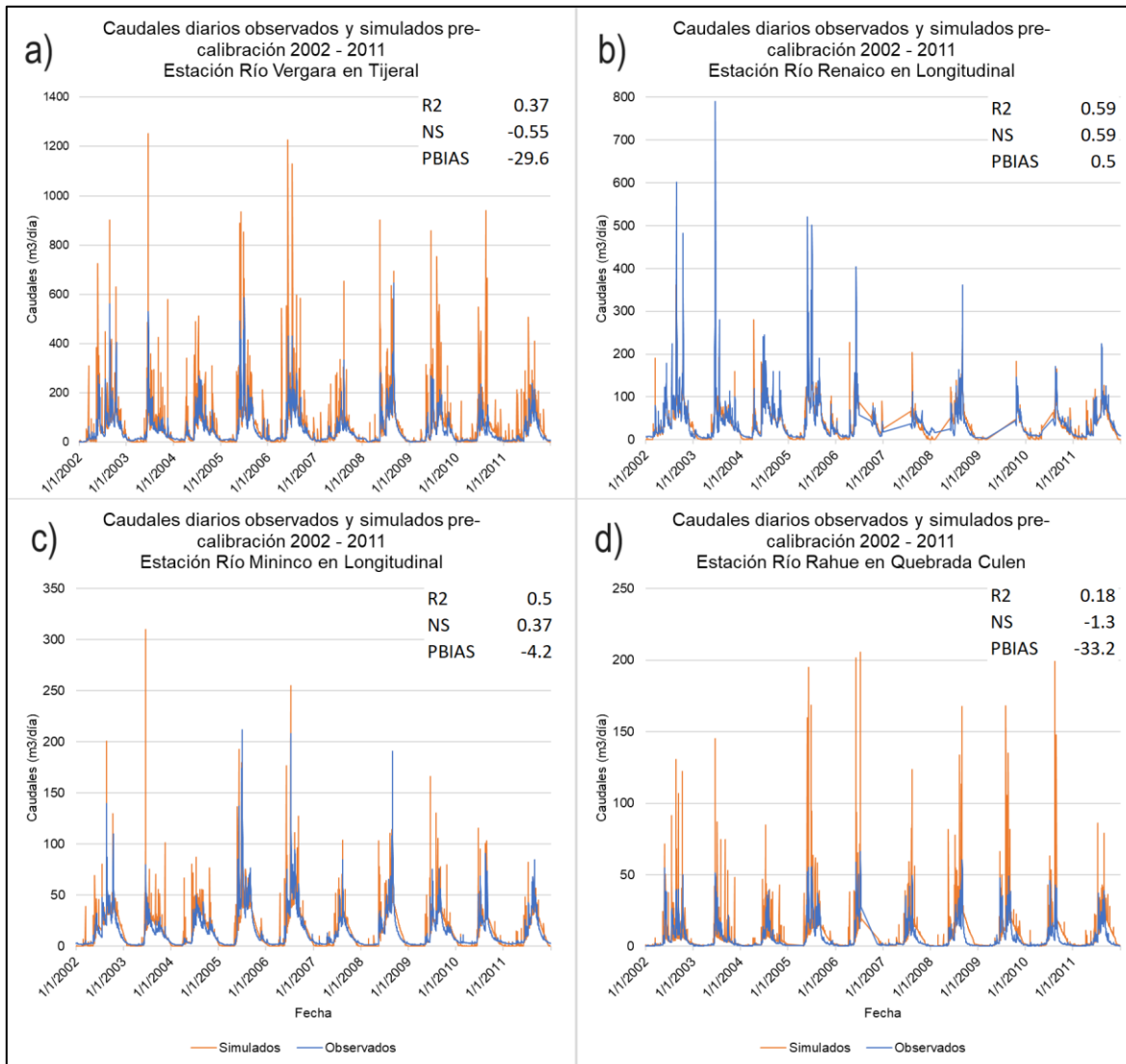


Figura 15. Caudales diarios observados y simulados pre-calibración 2002 – 2011. A) Estación río Vergara en Tijeral; b) Estación río Renaico en Longitudinal; c) Estación río Mininco en Longitudinal; d) Estación río Rahue en Quebrada Culen.

Fuente: Elaboración propia

Para que el modelo sea utilizable es necesario proceder a la calibración de caudales diarios, por lo que a partir de lo visualizado en los gráficos proporcionados por el software de calibración SWAT-CUP, se han seleccionado los parámetros para lograr que el modelo se convierta en una herramienta precisa y confiable para la finalidad del estudio. En la tabla 7 que se presenta a continuación están tabulados los

parámetros que se utilizaron para cada grupo de subcuencas que drenan hacia las estaciones fluviométricas. Además, se tiene el método y el valor ajustado final, además de los valores máximos y mínimos del parámetro mismo.

Tabla 7. Parámetros calibrados en SWAT CUP para los caudales mensuales modelados.

Nombre parámetro	Subcuencas	Método	Valor ajustado	Valor mínimo	Valor máximo
CN2.mgt	15, 16, 17, 19,	Relative	-0.739264	-0.919261	-0.661939
SOL_AWC(..).sol	20, 21, 22, 23,	Relative	0.96226	0.962155	0.963171
ESCO.hru	27, 28, 29, 30,	Replace	0.640932	0.640884	0.640934
GW_DELAY.gw	32, 33, 34, 35,	Replace	133.602234	133.313126	163.745621
HRU_SLP.hru	37, 38, 39, 40,	Relative	1.245544	0.753876	1.319988
OV_N.hru	41, 42, 44, 45,	Relative	0.356052	0.147956	0.475924
SLSUBBSN.hru	49, 50, 51, 52,	Relative	0.855931	0.724029	1.124337
GWQMN.gw	54, 57, 58, 59,	Replace	6111.723145	4382.251465	6290.10791
REVAPMN.gw	61, 62, 63, 64,	Replace	566.593567	329.47348	588.762817
	65, 70, 71, 72,				
	76, 77, 78, 79,				
	80, 81, 90, 92,				
	93, 95, 96, 97,				
	98, 100, 101,				
	103, 104, 105,				
	106, 107, 108,				
	109, 110, 111,				
	112, 113				
CN2.mgt		Relative	-0.52104	-0.521108	-0.521024
SOL_AWC(..).sol	43, 66, 69, 73,	Relative	0.540426	0.539984	0.540446
HRU_SLP.hru	82, 83, 84, 85,	Relative	-0.551513	-0.551846	-0.55103
OV_N.hru	86, 87, 89, 91,	Relative	-0.153002	-0.153292	-0.152978
SLSUBBSN.hru	94, 99	Relative	0.632764	0.632743	0.633057
GW_DELAY.gw		Replace	50.057114	36.443687	67.070068
CN2.mgt		Relative	-0.195937	-0.196043	-0.192573
SOL_AWC(..).sol	46, 47, 48, 53,	Relative	0.208312	0.208263	0.208405
ESCO.hru	55, 60, 68, 74,	Replace	0.259463	0.259451	0.259499
GW_REVAP.gw	75, 88, 102	Replace	0.045158	0.045151	0.045187
GW_DELAY.gw		Replace	3.360444	-5.74299	12.265781
CN2.mgt		Relative	-0.462565	-0.464446	-0.459852
SOL_AWC(..).sol	64, 65, 70, 71,	Relative	1.107678	1.107634	1.107678
ESCO.hru	76, 77, 78, 79,	Replace	0.290065	0.290054	0.290152
GW_REVAP.gw	80, 81, 95,	Replace	0.275692	0.275686	0.27571
REVAPMN.gw	100, 101, 103,	Replace	183.792267	183.753174	183.836426
HRU_SLP.hru	104, 105, 108,	Relative	0.49978	0.49935	0.499958
OV_N.hru	109, 112	Relative	0.169534	0.169534	0.169546
GWQMN.gw		Replace	6144.328125	6143.671875	6144.864258

SLSUBBSN.hru		Relative	-0.902863	-0.909167	-0.887467
GW_DELAY.gw		Replace	-108.435562	-177.05217	-88.342911

Fuente: Elaboración propia

La figura 17 muestra los caudales modelados con los parámetros de la tabla anteriormente mencionada ya aplicados. Se presentan los estadísticos para el periodo de calibración, lográndose buen ajuste de sus índices estadísticos, con valores que demuestran que el modelo se encuentra en un gran estado para ser utilizado.

Para el proceso de validación de la estación río Vergara en Tijeral (figura 17^a) se utiliza el periodo 2016 – 2019 por la disponibilidad de datos presentes en la estación, como lo fue explicado en la metodología. Los índices estadísticos para el proceso de validación están en la categoría de “buenos” para el R2 y NS, mientras que para el PBIAS está en “muy bueno”, esto de acuerdo con la tabla 4 de los criterios de clasificación de los índices.

Para la estación Río Renaico en Longitudinal y sus caudales diarios modelados se tienen índices estadísticos buenos y muy buenos (figura 17b), según la clasificación antes mencionada, sin embargo, para su proceso de validación en el periodo de tiempo 2012 – 2017 ocurre que para los tres índices estadísticos solo presentan valores muy buenos, por lo que se supone una gran capacidad predictiva, particularmente en esta estación.

En el caso de la figura 17c, estación Río Mininco en Longitudinal, se tiene que para el periodo calibrado presenta índices estadísticos muy buenos para R2 y PBIAS, mientras que el índice NS es bueno. Por otro lado, para la validación es donde los valores se encuentran más abajo, en especial NS y PBIAS con 0.51 y -22.4, respectivamente, ambos valores siendo satisfactorios. Esta gran diferencia puede deberse a la falencia de datos con al cual se validó, ya que solo había datos

continuos y con la gran mayoría de datos para el periodo 2012 – 2014, mientras que la calibración se realizó para el periodo 2002 – 2011. Se piensa que este factor puede jugar un rol fundamental en como el modelo logra representar los fenómenos asociados al periodo de tiempo.

Y para finalizar, la estación Río Rahue en Quebrada Culen, figura 17d a continuación, presenta la mayor cantidad de disponibilidad de información asociada a caudales, ya que cuenta con datos para la gran mayoría del tiempo comprendido en el periodo 2002 – 2019, por lo que la calibración se realizó con 10 años y 8 años respectivamente. Se obtuvieron valores buenos y satisfactorios para el primer y segundo periodo, por lo que se infiere que la modelación a futuro de esta estación mantenga estos valores.

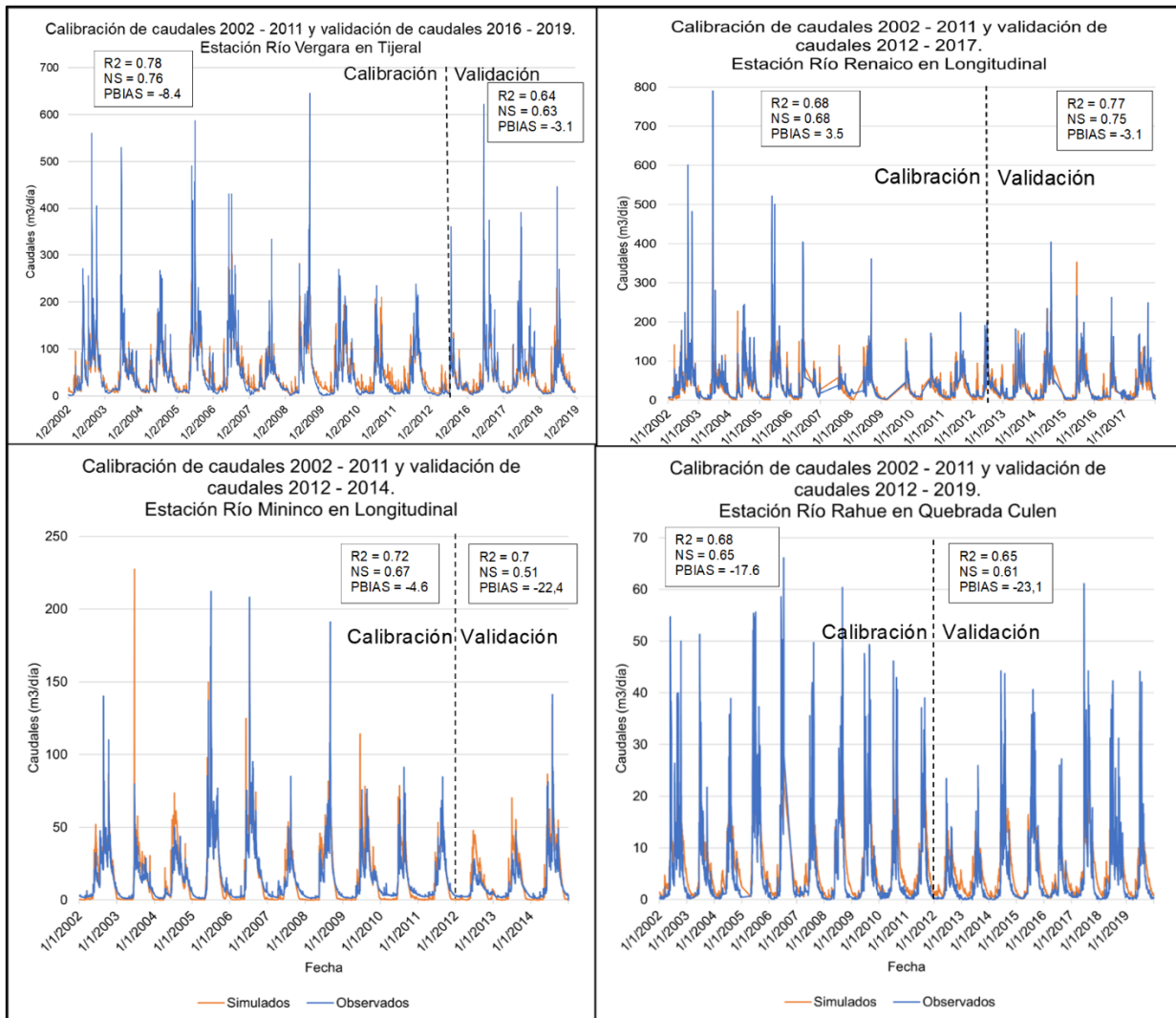


Figura 16. Índices estadísticos para el proceso de calibración y validación de caudales diarios. A) Estación río Vergara en Tijeral; b) Estación río Renaico en Longitudinal; c) Estación río Mininco en Longitudinal; d) Estación río Rahue en Quebrada Culen. Fuente: Elaboración propia.

4.2. Resumen de índices estadísticos para la calibración y validación.

Como una forma de simplificar el entendimiento de los resultados obtenidos a partir de las figuras anteriormente descritas, es que se crea la tabla 8, 9 y 10, en las cuales se resumen los índices estadísticos obtenidos para el periodo de calibración mensual, diario y periodo de validación, respectivamente. Las tablas se presentan a continuación:

Tabla 8. Coeficientes estadísticos iniciales y finales para el proceso de calibración mensual

Caudales	Estación	Calibración					
		R2		NS		PBIAS	
		Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
Mensuales	Río Vergara en Tijeral	0.92	0.93	0.51	0.87	-46	-17.2
	Río Renaico en Longitudinal	0.5	0.9	0.22	0.9	-26.2	0.7
	Río Mininco en Longitudinal	0.88	0.89	0.88	0.89	-6.4	-3.5
	Río Rahue en Quebrada Culen	0.81	0.89	-1.26	0.89	-132	-1.4

Fuente: Elaboración propia

Tabla 9. Coeficientes estadísticos iniciales y finales para el proceso de calibración diaria

Caudales	Estación	Calibración					
		R2		NS		PBIAS	
		Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
Diarios	Río Vergara en Tijeral	0.37	0.78	-0.55	0.76	-29.6	-8.4
	Río Renaico en Longitudinal	0.59	0.68	0.59	0.68	0.5	3.5
	Río Mininco en Longitudinal	0.5	0.72	0.37	0.67	-4.2	-4.6
	Río Rahue en Quebrada Culen	0.18	0.68	-1.3	0.65	-33.2	-17.2

Fuente: Elaboración propia

Tabla 10. Coeficientes estadísticos finales para el proceso de validación diaria.

Caudales	Estación	Validación
----------	----------	------------

		R2	NS	PBIAS
Diarios	Río Vergara en Tijeral	0.64	0.63	-3.1
	Río Renaico en Longitudinal	0.77	0.75	-3.1
	Río Mininco en Longitudinal	0.7	0.51	-22.4
	Río Rahue en Quebrada Culen	0.65	0.61	-23.1

Fuente: Elaboración propia

Los valores presentados por el modelo en el proceso de calibración – validación, indican que presenta un buen desempeño para esta área de estudio, pudiendo reproducir de gran manera los caudales observados por las estaciones fluviométricas estudiadas, por lo que es posible utilizarlo para analizar la respuesta hidrológica bajo el escenario de uso de suelo que se describirá en el siguiente objetivo.

4.3. Análisis de cambio 2008 – 2015

Si bien en la tabla 2 se expresan los cambios de uso de suelo de forma cuantitativa, en la figura 18 se aprecia la forma gráfica los cambios netos asociados al periodo 2008 – 2015 para la Cuenca del Río Vergara. Se puede apreciar la disminución en gran cantidad de los terrenos agrícolas al 2015 junto con las praderas y matorrales; mientras que por el otro lado crecen de forma no menor las plantaciones, bosque mixto y, sorpresivamente, el bosque nativo.

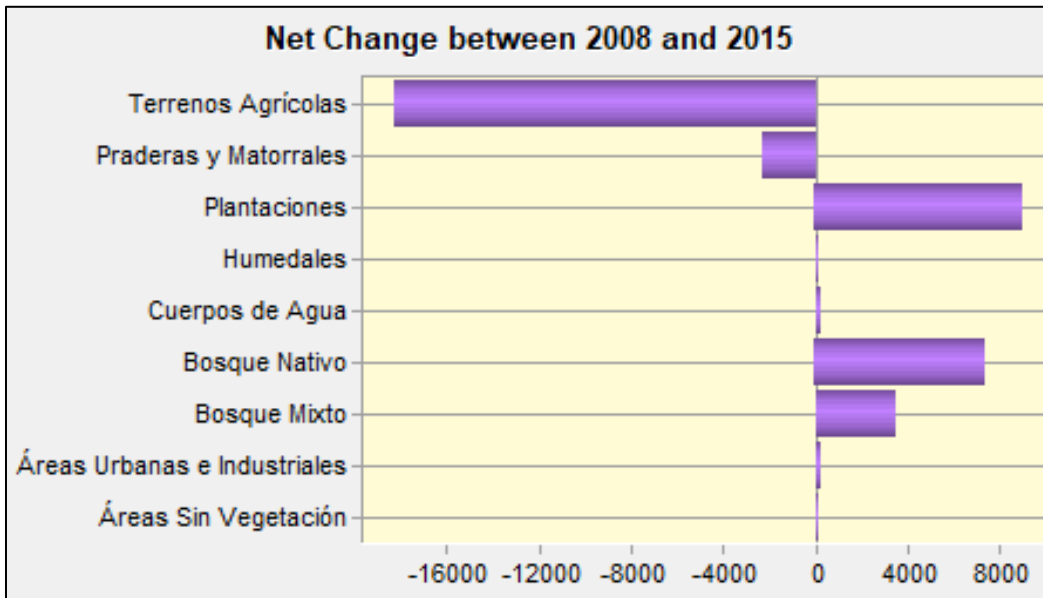


Figura 17. Cambio neto de uso de suelo entre el año 2008 y 2015 en la cuenca del río Vergara.
Fuente: Elaborado a partir de la información de la SIT CONAF con el software TerrSet

4.4. Escenario uso de suelo año 2030 para la cuenca del Río Vergara

En la figura 19 se tienen las pérdidas y ganancias desde el uso de suelo presente en el 2015 al uso de suelo generado por el modelo LCM para el año 2030 y en la figura 20 se tiene una cartografía sobre el uso de suelo modelado al año 2030. En la figura 19 se observa que existen relocalizaciones en menor cantidad de los usos asociados a terrenos agrícolas, praderas y matorrales y plantaciones agrícolas en la zona central de la cuenca; como también se tiene en gran parte la reforestación de la cuenca con bosque nativo, llegando a un aumento aproximado de 40.000 hectáreas, principalmente en la zona sur de la cuenca

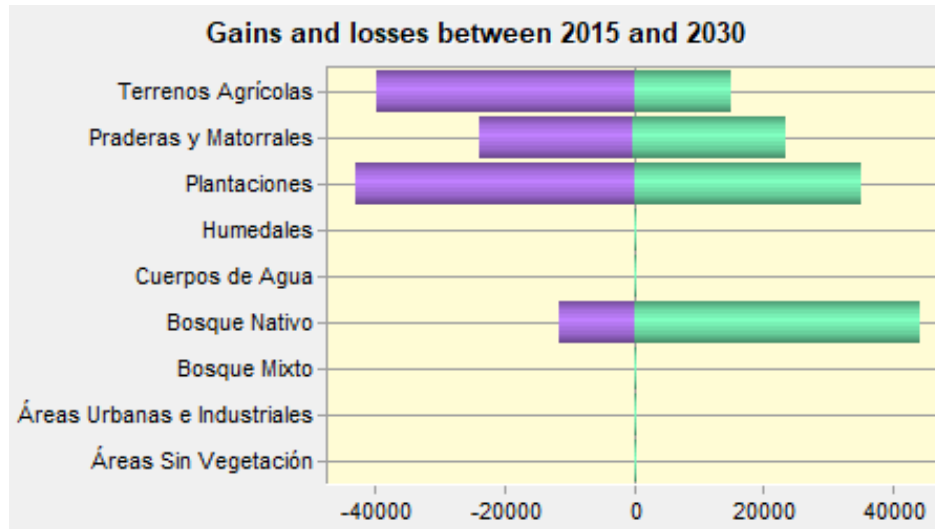


Figura 18. Perdidas (morado) y ganancias (verdes) de los usos de suelo entre el año 2015 y 2030. Fuente: Obtenido del software TerrSet

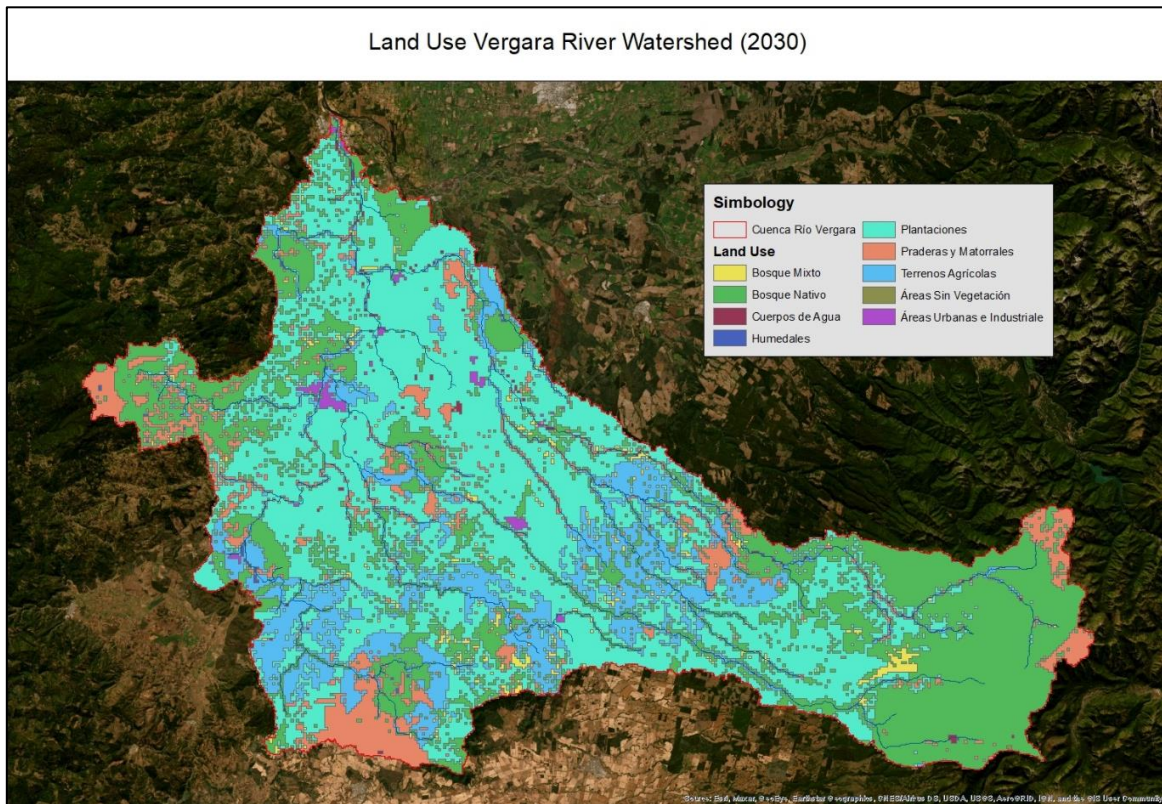


Figura 19. Especialización de los usos de suelo en la cuenca del río Vergara para el año 2030. Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos por el software TerrSet

En la tabla 11 se tienen las diferencias entre los usos de suelo en hectáreas y porcentajes, que como se vio en la figura 19, las grandes pérdidas de uso las tiene

ellos terrenos agrícolas y plantaciones forestales principalmente, con 5.6% y 1.8%, respectivamente; por el otro lado, el bosque nativo crece 7.48%; mientras que los usos de suelo restantes no cambian de forma significativa.

Tabla 11. Áreas de los usos de suelo para el año 2015 y 2030.

Uso de suelo	2015		2030	
	Área (hectáreas)	Área (%)	Área (hectáreas)	Área (%)
Áreas Sin Vegetación	242.32	0.06%	152.46	0.03%
Áreas Urbanas e Industriales	2241.67	0.51%	2265.12	0.52%
Bosque Mixto	6051.28	1.39%	6327.09	1.45%
Bosque Nativo	105873.53	24.24%	138485	31.72%
Cuerpos de Agua	1413.28	0.32%	1448.37	0.33%
Humedales	453.98	0.10%	424.71	0.10%
Plantaciones	198020.54	45.35%	190118	43.55%
Praderas y Matorrales	37698.93	8.63%	37450.7	8.58%
Terrenos Agrícolas	84697.20	19.40%	59884.1	13.72%

Fuente: Elaboración propia.

4.5. Modelación hidrológica

Las figura 21, representan los caudales calibrados y los caudales calibrados con el escenario de cambio de uso de suelo aplicado para las estaciones Río Vergara en Tijeral (a), Río Renaico en Longitudinal (b), Río Mininco en Longitudinal (c) y Río Rahue en Quebrada Culen (d), respectivamente. En todas las estaciones se puede ver que los caudales si bien se ven similares gráficamente, en algunos puntos resalta el color naranja por sobre el azul, indicando que los valores de caudales calibrados + uso de suelo son mayores en ese punto. Si bien las diferencias no se ven visualmente importantes, es necesaria la evaluación estadística para conocer si realmente el uso de suelo conlleva a cambios significativos en los caudales.

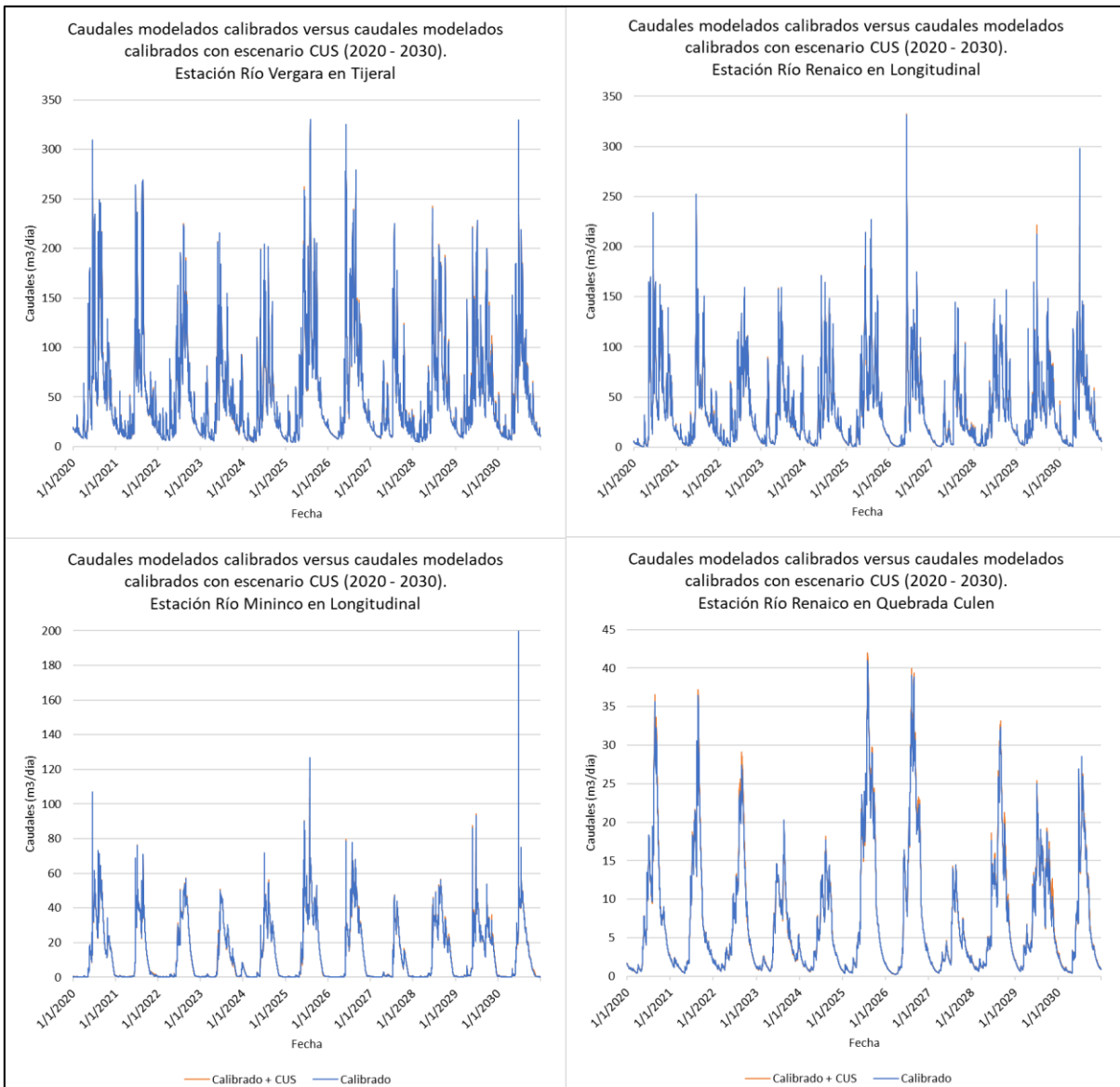


Figura 20. Caudales modelados al año 2030 versus caudales modelados bajo escenario de cambio de uso de suelo 2030. A) Estación río Vergara en Tijeral; b) Estación río Renaico en Longitudinal; c) Estación río Mininco en Longitudinal; d) Estación río Rahue en Quebrada Culen.

Fuente: Elaboración propia

4.5.1. Normalidad de los datos

Para las estaciones en estudio, se realiza el análisis de normalidad a través de la prueba Kolmogorov-Smirnov con el fin de analizar el conjunto de datos de caudales obtenidos a partir de la simulación, esperando así discernir si es necesario proseguir con una prueba de tipo paramétrica o no paramétrica en el análisis de significancia

del cambio de uso de suelo en los caudales de la cuenca, los resultados se presentan a continuación. Los resultados se encuentran tabulados en las tablas 12, 13, 14 y 15, donde se representan a partir del estadístico KS, el cual cuantifica la máxima discrepancia entre la función de distribución acumulativa empírica (ECDF) de los datos y la distribución de referencia, en este caso la distribución normal. La segunda columna (gl) tabula los grados de libertad de las muestras, que en definitiva es el tamaño de la muestra que se está analizando y la tercera columna tabula la Significancia (también utilizado como “p” en otras pruebas), la cual nos permite interpretar la significancia estadística de la prueba.

4.5.1.1. Estación Río Vergara en Tijeral

Para la primera estación, como se muestra en la tabla 12, los resultados indican un valor de $KS=0.180$, $gl=9131$ y $p<0.001$, por lo que hay evidencia significativa para rechazar la hipótesis nula de normalidad. En consecuencia, los datos no se ajustan a una distribución normal.

Tabla 12. Prueba de normalidad Kolmogorov – Smirnov para los datos modelados con y sin escenario CUS para la estación Río Vergara en Tijeral.

Pruebas de normalidad			
	Kolmogorov-Smirnov ^a		
	Estadístico KS	gl	Sig.
Calibrados Sin CUS	0.180	9131	<0.001
Calibrados con CUS	0.180	9131	<0.001
a. Corrección de significación de Lilliefors			

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados de SPSS.

4.5.1.2. Estación Río Renaico en Longitudinal

Para la segunda estación, según la tabla 13, se tiene valores de 0.190 para el estadístico KS, un grado de libertad de 9131 y $p<0.001$, rechazándose la hipótesis nula. Por lo que para esta estación los datos tampoco se ajustan a una distribución

normal.

Tabla 13. Prueba de normalidad Kolmogorov – Smirnov para los datos modelados con y sin escenario CUS para la estación Río Renaico en Longitudinal.

Pruebas de normalidad			
	Kolmogorov-Smirnov ^a		
	Estadístico KS	gl	Sig.
Calibrados sin CUS	0.190	9131	<0.001
Calibrados con CUS	0.190	9131	<0.001
a. Corrección de significación de Lilliefors			

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados de SPSS.

4.5.1.3. Estación Río Mininco en Longitudinal

En la tabla 14 se presentan los datos obtenidos de la prueba de normalidad para la tercera estación. Esta presenta valores de estadístico 0.236 y 0.235 para los diferentes escenarios, 9131 grados de libertad y $p < 0.001$, por lo que los datos de esta estación al igual que para las dos anteriores no se ajusta a una distribución normal.

Tabla 14. Prueba de normalidad Kolmogorov - Smirnov para los datos modelados con y sin escenario CUS para la estación Río Mininco en Longitudinal.

Pruebas de normalidad			
	Kolmogorov-Smirnov ^a		
	Estadístico KS	gl	Sig.
Calibrados sin CUS	0.236	9131	<0.001
Calibrados con CUS	0.235	9131	<0.001
a. Corrección de significación de Lilliefors			

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados de SPSS.

4.5.1.4. Estación Río Rahue en Quebrada Culen

Finalmente, para la última estación, Río Rahue en Quebrada Culen, como se visualiza en la tabla 15, se tiene un valor para el estadístico KS de 0.186 y 0.194

para los dos escenarios, grados de libertad igual a 9131 y $p < 0.001$, indicando que los datos tampoco se ajustan a una distribución normal.

Tabla 15. Prueba de normalidad Kolmogorov - Smirnov para los datos modelados con y sin escenario CUS para la estación Río Rahue en Quebrada Culen.

Pruebas de normalidad			
	Kolmogorov-Smirnov ^a		
	Estadístico KS	gl	Sig.
Calibrados sin CUS	0.186	9131	<0.001
Calibrados con CUS	0.194	9131	<0.001

a. Corrección de significación de Lilliefors

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados de SPSS.

4.5.1.5. Resumen de resultados de normalidad

Tabla 16. Resumen resultados de la prueba de normalidad Kolmogorov-Smirnov.

Estación	Escenarios	Estadístico KS	gl	Sig. (p)
Río Vergara en Tijeral	Sin CUS	0.180	9131	<0.001
	Con CUS	0.180	9131	<0.001
Río Renaico en Longitudinal	Sin CUS	0.190	9131	<0.001
	Con CUS	0.190	9131	<0.001
Río Mininco en Longitudinal	Sin CUS	0.236	9131	<0.001
	Con CUS	0.235	9131	<0.001
Río Rahue en Quebrada Culen	Sin CUS	0.186	9131	<0.001
	Con CUS	0.194	9131	<0.001

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados de SPSS.

Con las 4 estaciones con valores para el estadístico KS alejados de 0 y $p < 0.001$, se tiene que ninguna de las estaciones analizadas presenta un ajuste a la distribución normal, por lo que para conocer si el cambio de uso de suelo impacta los caudales de forma significativa es que se utiliza una prueba estadística no paramétrica, como lo es la prueba U de Mann Whitney.

4.5.2. Significancia de los resultados

4.5.2.1. Estación Río Vergara en Tijeral

En la tabla 17 es posible ver los resultados para la prueba de significancia U de Mann Whitney para ambos escenarios analizados. Los dos escenarios muestran obtienen un resultado de Sig. Asin. (bilateral) de <0.001 , por lo que la hipótesis nula de la prueba de significancia U, teniendo así que el cambio en el uso de suelo presenta efectos significativos para los caudales diarios.

Tabla 17. Prueba de significancia U de Mann – Whitney para los datos modelados con y sin escenario CUS para la estación Río Vergara en Tijeral

Estadísticos de prueba^a		
	Calibrados sin CUS	Calibrados con CUS
U de Mann-Whitney	4371738.000	4375417.000
W de Wilcoxon	14752584.000	14756263.000
Z	-48.038	-48.009
Sig. asin. (bilateral)	<.001	<.001
a. Variable de agrupación: periodo		

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados de SPSS.

4.5.2.2. Estación Río Renaico en Longitudinal

Para la estación Río Renaico en Longitudinal, tabla 18, al igual que el caso anterior, presenta un valor de significancia asintótica bilateral <0.001 , teniendo como resultado que el cambio en el uso de suelo también tiene un impacto significativo en los caudales diarios que drenan a la estación.

Tabla 18. Prueba de significancia U de Mann – Whitney para los datos modelados con y sin escenario CUS para la estación Río Renaico en Longitudinal.

Estadísticos de prueba^a		
	Calibrados sin CUS	Calibrados con CUS
U de Mann-Whitney	4426563.500	4416078.000
W de Wilcoxon	14807409.500	14796924.000
Z	-47.603	-47.686

Sig. asin. (bilateral)	<.001	<.001
a. Variable de agrupación: periodo		

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados de SPSS.

4.5.2.3. Estación Río Mininco en Longitudinal

La tabla 19 indica los resultados para la estación Río Mininco en Longitudinal. Con los valores de significancia presentados, es posible confirmar que los caudales diarios que drenan en la estación se ven afectados por el cambio de uso de suelo producido en la zona circundante.

Tabla 19. Prueba de significancia U de Mann – Whitney para los datos modelados con y sin escenario CUS para la estación Río Mininco en Longitudinal

Estadísticos de prueba^a		
	Calibrados sin CUS	Calibrados con CUS
U de Mann-Whitney	4171196.500	4152657.500
W de Wilcoxon	14552042.500	14533503.500
Z	-49.630	-49.777
Sig. asin. (bilateral)	<.001	<.001
a. Variable de agrupación: periodo		

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados de SPSS.

4.5.2.4. Estación Río Rahue en Quebrada Culen

En la tabla 20 es posible visualizar que, para la última estación, Río Rahue en Quebrada Culen, se presentan los mismos resultados que para las estaciones anteriores, con valores de significancia <0.001.

Tabla 20. Prueba de significancia U de Mann – Whitney para los datos modelados con y sin escenario CUS para la estación Río Rahue en Quebrada Culen

Estadísticos de prueba^a		
	Calibrados sin CUS	Calibrados con CUS
U de Mann-Whitney	4452571.000	4472099.500
W de Wilcoxon	14833417.000	14852945.500

Z	-47.396	-47.241
Sig. asin. (bilateral)	<.001	<.001
a. Variable de agrupación: periodo		

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados de SPSS.

A partir de los resultados obtenidos es posible destacar que el uso de suelo tiene un impacto significativo en los caudales diarios para todas las estaciones de la cuenca del Río Vergara.

4.5.3. Cuantificación de los impactos

A partir de los índices estadísticos se obtiene que los caudales se ven afectados de forma significativa por los cambios en el uso de suelo de la cuenca para todos los meses del año, sin embargo, no entregan la cuantificación de la afectación.

En la figura 22 es posible visualizar los cambios medios en los caudales para el año 2030 bajo el escenario de uso de suelo propuesto. Empezando por la estación en Tijeral, tenemos que se ve disminuido su caudal en la temporada de invierno (jun - ago), llegando hasta un déficit aproximado 0.5%, sin embargo, aumenta su caudal en todos los otros meses, llegando a un aumento de hasta un 1%. Para la estación Renaico en Longitudinal se tiene una disminución de caudal desde el mes de julio a enero, muy menor al 1%, mientras que para los meses de febrero – mayo, aumenta considerablemente, llegando en abril a un aumento de hasta un 4% en sus caudales. En el caso de la estación Mininco en Longitudinal, sus aumentos de caudales se ven reflejados en los meses de primavera - verano, llegando a sobrepasar el 5% con respecto al escenario sin el cambio de uso de suelo. Para finalizar, la estación en Quebrada Culen es la que se ve más beneficiada, ya que aumenta sus caudales en todos los meses del año, llegando a su máximo en la temporada de invierno, con una diferencia de aproximada de 7.5% en sus caudales con respecto al escenario anterior.

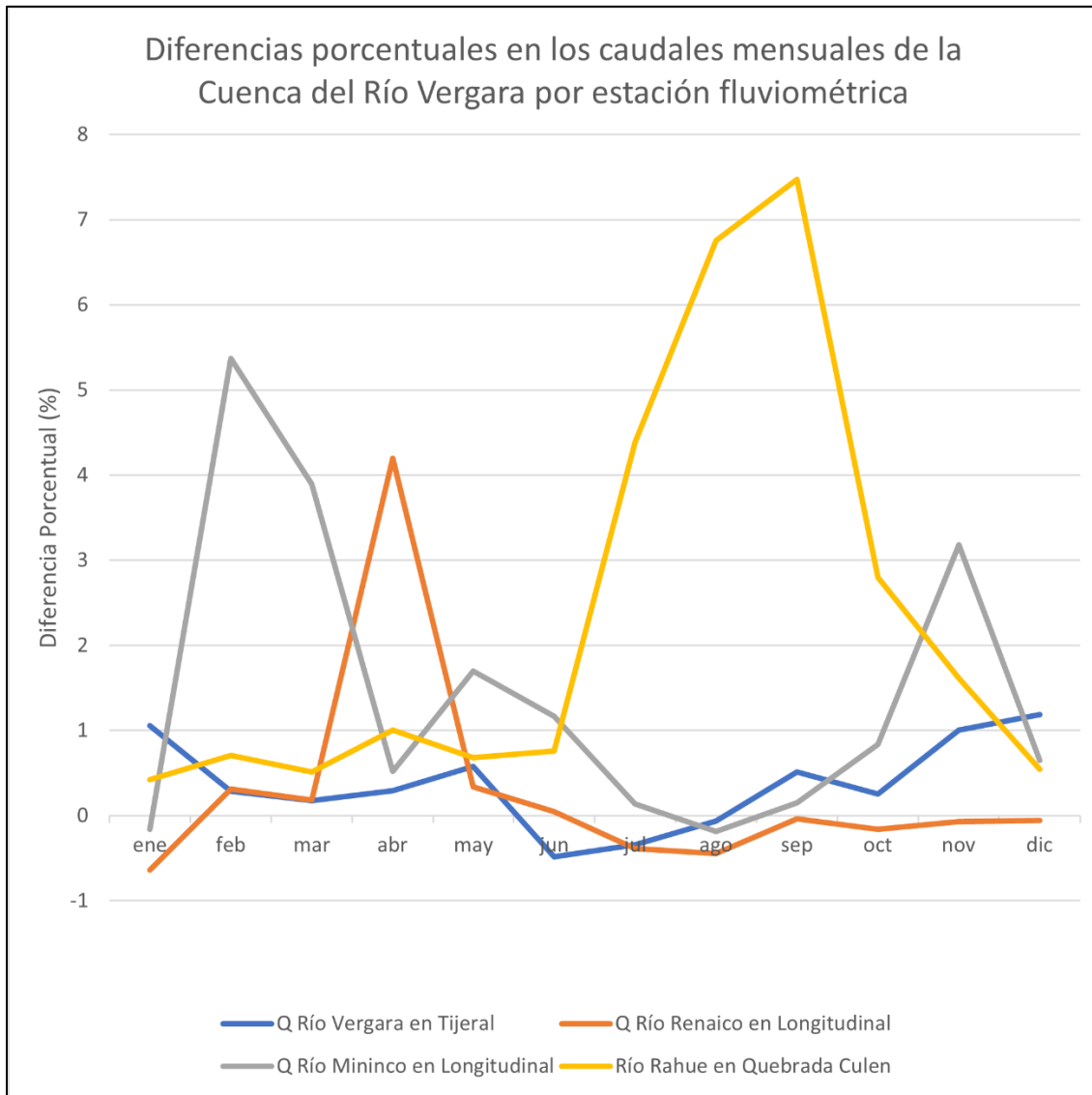


Figura 21. Efectos del cambio de uso de suelo en los caudales del río Vergara. Cuantificados en porcentaje de cambio.

Fuente: Elaboración propia

Estos resultados que coinciden con el escenario de uso de suelo modelado, en el cual aumenta el uso del bosque nativo considerablemente en algunas zonas de la cuenca y la relocalización de una porción de las plantaciones forestales, como se puede ver en la figura 23. En la zona de la estación Río Rahue en Quebrada Culen, se aprecia que sólo existe cambio desde “plantación” a “bosque nativo”, lo que ayuda al incremento de los caudales en esta zona, por encima de los valores de las otras estaciones.

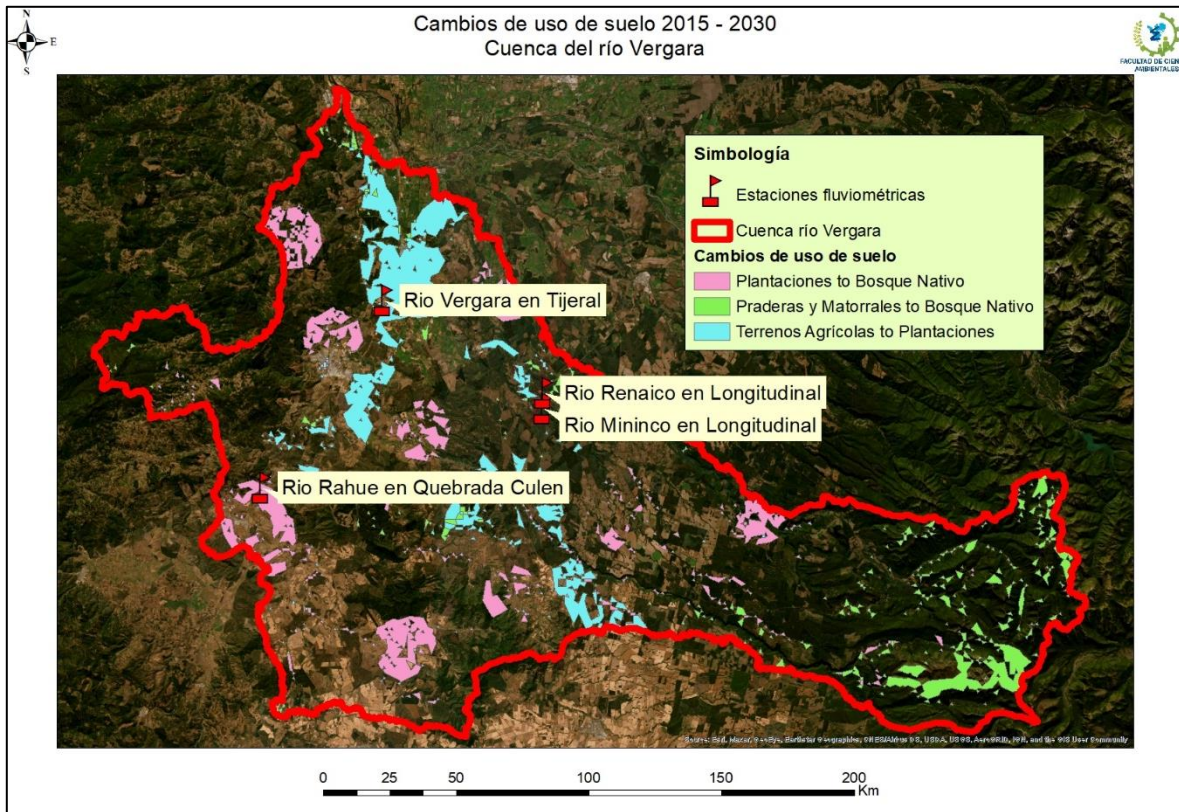


Figura 22. Cambios de usos de suelo en el espacio.

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos por el software TerrSet.

En investigaciones anteriores se ha dejado en evidencia que la reforestación con bosque nativo en las cuencas aumentan la disponibilidad hídrica de la misma, siendo el caso estudiado por Siqueira et al. (2021), donde la reforestación resultó en un incremento de un 7% hasta un 15%, para 3 diferentes cuencas en Brasil.

En la misma figura para la estación Río Vergara en Tijeral, al predominar un cambio de terrenos agrícolas hacia plantaciones forestales se ve disminuido su caudal en las temporadas frías, mientras que para el verano el caudal llegaría a aumentar sobre un 1%. La forestación con especies exóticas en las cuencas impacta los caudales de los ríos, ya que aumenta la escorrentía superficial del suelo, haciendo que se infiltre menos agua hacia los acuíferos y ésta escurra hacia los cuerpos de agua superficiales, aumentando los caudales en consecuencia (Dibaba et al., 2020; Gashaw et al., 2018; Shawul et al., 2019). Los aumentos de caudales coinciden con lo estudiado en Vietnam por Khoi and Suetsugi (2014b), donde para un escenario

donde las plantaciones aumentan de forma significativa, los caudales aumentan de un 0.2% a un 0.4%.

5. CONCLUSIONES

El modelo SWAT es una herramienta útil, potente y confiable para estudios hidrológicos en cuencas de meso-escala, esto a partir de los resultados obtenidos en los procesos de calibración y validación de los datos, junto con la simulación final.

El modelo Land Change Modeler es una herramienta útil que puede predecir con una gran precisión los cambios a futuro en los usos de suelo en las cuencas del país, incluso con poca información territorial.

El cambio de uso de suelo presenta efectos significativos en los caudales de la cuenca del río Vergara, que, si bien están presente durante todo el año, se ven incrementados durante los últimos 3 meses de la época fría (julio – agosto – septiembre). Lo que puede aumentar la probabilidad de desastres naturales en el territorio nacional.

Los modelos territoriales e hidrológicos se posicionan como una herramienta potente para una gestión sostenible del territorio, que debiesen, sin duda, ser utilizados por las autoridades y tomadores de decisiones. Además, se tiene que los cambios de suelo pueden alterar la escorrentía superficial de una cuenca, disminuir la recarga de los acuíferos y, en consecuencia, aumentar el caudal de los ríos. Esto nos lleva a que las cuencas pueden presentar una mayor erosión a la que normalmente tendrían, incrementando las posibilidades de catástrofes naturales como deslizamientos de tierra e inundaciones repentinas, que cada vez son más frecuentes en nuestro territorio.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbaspour, K. C., Rouholahnejad, E., Vaghefi, S., Srinivasan, R., Yang, H., & Kløve, B. (2015). A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. *Journal of Hydrology*, 524, 733-752. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.027>
- Aguayo, M., PAUCHARD, A., AZÓCAR, G., & PARRA, O. (2009). Cambio del uso del suelo en el centro sur de Chile a fines del siglo XX: Entendiendo la dinámica espacial y temporal del paisaje. *Revista chilena de historia natural*, 82, 361-374. http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0716-078X2009000300004&nrm=iso
- Aguayo, M., Stehr, A., & Link, O. (2016). Hydrologic response of a meso-scale basin to future forest expansion scenarios. *Revista de geografía Norte Grande*(65), 197-214. <https://doi.org/10.4067/s0718-34022016000300010>
- Alemu, A. M., Seleshi, Y., & Meshesha, T. W. (2022). Modeling the spatial and temporal availability of water resources potential over Abbay river basin, Ethiopia. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 44, 101280. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101280>
- AQUASTAT. (2010). *Global Water Withdrawal*. Sitio de internet de AQUASTAT. Roma, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO).
- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., & Williams, J. R. (1998). LARGE AREA HYDROLOGIC MODELING AND ASSESSMENT PART I: MODEL DEVELOPMENT1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 34(1), 73-89. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x>
- Carroll, S., Liu, A., Dawes, L., Hargreaves, M., & Goonetilleke, A. (2013). Role of land use and seasonal factors in water quality degradations. *Water resources management*, 27, 3433-3440.
- Connor, R. (2015). *The United Nations world water development report 2015: water for a sustainable world* (Vol. 1). UNESCO publishing.
- DGA. (2020). Boletín DGA marzo 2020. <https://doi.org/https://dga.mop.gob.cl/productosyservicios/informacionhidrologica/Informacin%20Mensual/Boletin%2003%20Marzo%202020.pdf>
- Dibaba, W. T., Demissie, T. A., & Miegel, K. (2020). Watershed Hydrological Response to Combined Land Use/Land Cover and Climate Change in Highland Ethiopia: Finchaa Catchment. *Water*, 12(6), 1801. <https://www.mdpi.com/2073-4441/12/6/1801>
- Douglas-Mankin, K., Srinivasan, R., & Arnold, J. (2010). Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model: Current developments and applications. *Transactions of the ASABE*, 53(5), 1423-1431.
- Eastman, J. R. (2012). Idrisi selva tutorial, manual version 17. *Clark Labs. Clark University. Massachusetts, USA*.

- Eastman, J. R., & Toledano, J. (2018). A Short Presentation of the Land Change Modeler (LCM). In M. T. Camacho Olmedo, M. Paegelow, J.-F. Mas, & F. Escobar (Eds.), *Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios* (pp. 499-505). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-60801-3_36
- Esse, C., Ríos, N., Saavedra, P., Fonseca, D., Encina-Montoya, F., Santander-Massa, R., De los Ríos-Escalante, P., Figueroa-Muñoz, G., López-Pérez, A., & Correa-Araneda, F. (2021). Effects of land use change on water availability and water efficiency in the temperate basins of south-central Chile. *Journal of King Saud University - Science*, 33(8), 101650. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jksus.2021.101650>
- Fierro, P., Bertrán, C., Tapia, J., Hauenstein, E., Peña-Cortés, F., Vergara, C., Cerna, C., & Vargas-Chacoff, L. (2017). Effects of local land-use on riparian vegetation, water quality, and the functional organization of macroinvertebrate assemblages. *Science of The Total Environment*, 609, 724-734. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.197>
- Foley, J. A., DeFries, R., Asner, G. P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S. R., Chapin, F. S., Coe, M. T., Daily, G. C., Gibbs, H. K., Helkowski, J. H., Holloway, T., Howard, E. A., Kucharik, C. J., Monfreda, C., Patz, J. A., Prentice, I. C., Ramankutty, N., & Snyder, P. K. (2005). Global Consequences of Land Use. *Science*, 309(5734), 570-574. <https://doi.org/10.1126/science.1111772>
- Galleguillos, M., Gimeno, F., Puelma, C., Zambrano-Bigiarini, M., Lara, A., & Rojas, M. (2021). Disentangling the effect of future land use strategies and climate change on streamflow in a Mediterranean catchment dominated by tree plantations. *Journal of Hydrology*, 595. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126047>
- Gashaw, T., Tulu, T., Argaw, M., & Worqlul, A. W. (2018). Modeling the hydrological impacts of land use/land cover changes in the Andassa watershed, Blue Nile Basin, Ethiopia. *Science of The Total Environment*, 619-620, 1394-1408. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.191>
- Gilboa, Y., Gal, G., Markel, D., Rimmer, A., Evans, B. M., & Friedler, E. (2015). Effect of Land-use Change Scenarios on Nutrients and TSS Loads. *Environmental Processes*, 2(4), 593-607. <https://doi.org/10.1007/s40710-015-0109-z>
- Gleick, P. H., Pacific Institute for Studies in Development, E., Security, & Institute, S. E. (1993). *Water in Crisis: A Guide to the World's Fresh Water Resources*. Oxford University Press. <https://books.google.cl/books?id=NigDkxQOkSAC>
- Goonetilleke, A., Liu, A., & Gardner, T. (2016). Urban stormwater reuse: An agenda for sustainable development. *Global Sustainable Development Report*, 1-4.
- Goonetilleke, A., & Vithanage, M. (2017). Water Resources Management: Innovation and Challenges in a Changing World. *Water*, 9(4), 281. <https://www.mdpi.com/2073-4441/9/4/281>
- Heilmayr, R., Echeverría, C., & Lambin, E. F. (2020). Impacts of Chilean forest subsidies on forest cover, carbon and biodiversity. *Nature Sustainability*, 3(9), 701-709. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0547-0>

- Khoi, D. N., & Suetsugi, T. (2014a). Impact of climate and land-use changes on hydrological processes and sediment yield—a case study of the Be River catchment, Vietnam. *Hydrological Sciences Journal*, 59(5), 1095-1108. <https://doi.org/10.1080/02626667.2013.819433>
- Khoi, D. N., & Suetsugi, T. (2014b). The responses of hydrological processes and sediment yield to land-use and climate change in the Be River Catchment, Vietnam. *Hydrological Processes*, 28(3), 640-652.
- Lajaunie, M.-L., Scheierling, S., Zuleta, J., Chinarro, L., & Vazquez, V. (2011). *Chile-Diagnóstico de la gestión de los recursos hídricos*.
- Liew, M. W. V., Veith, T. L., Bosch, D. D., & Arnold, J. G. (2007). Suitability of SWAT for the Conservation Effects Assessment Project: Comparison on USDA Agricultural Research Service Watersheds. *Journal of Hydrologic Engineering*, 12(2), 173-189. [https://doi.org/doi:10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2007\)12:2\(173\)](https://doi.org/doi:10.1061/(ASCE)1084-0699(2007)12:2(173))
- Liu, Y. Y., Zhang, X. N., Xia, D. Z., You, J. S., Rong, Y. S., & Bakir, M. (2013). Impacts of Land-Use and Climate Changes on Hydrologic Processes in the Qingyi River Watershed, China. *Journal of Hydrologic Engineering*, 18(11), 1495-1512. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)he.1943-5584.0000485](https://doi.org/10.1061/(asce)he.1943-5584.0000485)
- Manuschevich, D., & Beier, C. M. (2016). Simulating land use changes under alternative policy scenarios for conservation of native forests in south-central Chile. *Land Use Policy*, 51, 350-362. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.08.032>
- Martinez-Retureta, R., Aguayo, M., Abreu, N. J., Stehr, A., Duran-Llacer, I., Rodriguez-Lopez, L., Sauvage, S., & Sanchez-Perez, J. M. (2021). Estimation of the Climate Change Impact on the Hydrological Balance in Basins of South-Central Chile. *Water*, 13(6), Article 794. <https://doi.org/10.3390/w13060794>
- Martinez-Retureta, R., Aguayo, M., Abreu, N. J., Urrutia, R., Echeverria, C., Lagos, O., Rodriguez-Lopez, L., Duran-Llacer, I., & Barra, R. O. (2022). Influence of Climate and Land Cover/Use Change on Water Balance: An Approach to Individual and Combined Effects. *Water*, 14(15), Article 2304. <https://doi.org/10.3390/w14152304>
- 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://www.mdpi.com/2073-4441/12/1/302>
- Martinez-Retureta, R., Aguayo, M., Stehr, A., Sauvage, S., Echeverria, C., & Sanchez-Perez, J. M. (2020). Effect of Land Use/Cover Change on the Hydrological Response of a Southern Center Basin of Chile. *Water*, 12(1), Article 302. <https://doi.org/10.3390/w12010302>
- McDonald, R. I., Weber, K., Padowski, J., Flörke, M., Schneider, C., Green, P. A., Gleeson, T., Eckman, S., Lehner, B., & Balk, D. (2014). Water on an urban planet: Urbanization and the reach of urban water infrastructure. *Global environmental change*, 27, 96-105.
- Mekonnen, Y. A., & Manderso, T. M. (2023). Land use/land cover change impact on

- streamflow using Arc-SWAT model, in case of Fetam watershed, Abbay Basin, Ethiopia. *Applied Water Science*, 13(5), 111. <https://doi.org/10.1007/s13201-023-01914-5>
- Mekonnen, Y. A., Mengistu, T. D., Asitatie, A. N., & Kumilachew, Y. W. (2022). Evaluation of reservoir sedimentation using bathymetry survey: a case study on Adebra night storage reservoir, Ethiopia. *Applied Water Science*, 12(12), 269. <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01787-0>
- Morales, C., Parada, S., America, U. N. E. C. f. L., Caribbean, t., & Zusammenarbeit, D. G. f. T. (2005). *Pobreza, desertificación y degradación de los recursos naturales*. Naciones Unidas, Comisión Económica para América Latina y el Caribe. <https://books.google.cl/books?id=EeBqzQEACAAJ>
- Moriasi, D., Arnold, J., Van Liew, M., Bingner, R., Harmel, R. D., & Veith, T. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE*, 50. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- Moya, H., Althoff, I., Huenchuleo, C., & Reggiani, P. (2022). Influence of Land Use Changes on the Longavi Catchment Hydrology in South-Center Chile. *Hydrology*, 9(10), Article 169. <https://doi.org/10.3390/hydrology9100169>
- N. Moriasi, D., G. Arnold, J., W. Van Liew, M., L. Bingner, R., D. Harmel, R., & L. Veith, T. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900. <https://doi.org/https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- Ni, X., Parajuli, P. B., Ouyang, Y., Dash, P., & Siegert, C. (2021). Assessing land use change impact on stream discharge and stream water quality in an agricultural watershed. *CATENA*, 198, 105055. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.105055>
- Oki, T., & Kanae, S. (2006). Global Hydrological Cycles and World Water Resources. *Science*, 313(5790), 1068-1072. <https://doi.org/10.1126/science.1128845>
- P. Fernandez, G., M. Chescheir, G., W. Skaggs, R., & M. Amatya, D. (2005). DEVELOPMENT AND TESTING OF WATERSHED-SCALE MODELS FOR POORLY DRAINED SOILS. *Transactions of the ASAE*, 48(2), 639-652. <https://doi.org/https://doi.org/10.13031/2013.18323>
- Paegelow, M., Camacho Olmedo, M. T., & Toribio, J. (2003). Cadenas de Markov, evaluación multicriterio y evaluación multiobjetivo para la modelización prospectiva del paisaje. *Geofocus: Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, ISSN 1578-5157, Nº. 3, 2003.
- Palacio, J. L., Velázquez, A., Mas, J. F., Díaz Gallegos, J. R., Mayorga Saucedo, R., Alcántara, P. C., Castro, R., Fernández, T., Bocco, G., & Ezcurra, E. (2002). Patrones y tasas de cambio de uso del suelo en México. *Gaceta Ecológica*(62), 21-37. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=53906202> (IN FILE)
- Parker, T., Berger, S., Manson, W., McConnell, d'Aquino, P., August, P., Balman, A., Berger, T., Bousquet, F., Brondízio, E., Brown, D., Couclélis, H., Deadman, P., Goodchild, M., Gotts, N., Gumerman, G., Hoffmann, M., Huigen, M., Irwin, E., & Warren, K. (2001). Agent-Based Models of Land-Use

- and Land-Cover Change.
- Paul, B., & Rashid, H. (2017). Land Use Change and Coastal Management. In (pp. 183-207). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805276-1.00006-5>
- Pereira, C. O., Escanilla-Minchel, R., Gonzalez, A. C., Alcayaga, H., Aguayo, M., Arias, M. A., & Flores, A. N. (2022). Assessment of Future Land Use/Land Cover Scenarios on the Hydrology of a Coastal Basin in South-Central Chile. *Sustainability*, 14(24), Article 16363. <https://doi.org/10.3390/su142416363>
- Pimentel, D., Berger, B., Filiberto, D., Newton, M., Wolfe, B., Karabinakis, E., Clark, S., Poon, E., Abbett, E., & Nandagopal, S. (2004). Water resources: agricultural and environmental issues. *BioScience*, 54(10), 909-918.
- Pontius, R. G., Huffaker, D., & Denman, K. (2004). Useful techniques of validation for spatially explicit land-change models. *Ecological Modelling*, 179(4), 445-461. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2004.05.010>
- Qacami, M., Khattabi, A., Lahssini, S., Rifai, N., & Meliho, M. (2023). Land-cover/land-use change dynamics modeling based on land change modeler. *The Annals of Regional Science*, 70(1), 237-258. <https://doi.org/10.1007/s00168-022-01169-z>
- Reynoso Santos, R., Valdez Lazalde, J. R., Escalona Maurice, M. J., de los Santos Posadas, H. M., & Pérez Hernández, M. J. (2016). Cadenas de Markov y autómatas celulares para la modelación de cambio de uso de suelo. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 37, 72-81. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382016000100006&nrm=iso
- Rojas, A. (2018). Evaluación de los efectos del cambio de uso de suelo sobre las tasas de sedimentación en la laguna grande de San Pedro de la Pan (Chile) durante los últimos 30 años. [Thesis]. <https://doi.org/http://repositorio.udec.cl/bitstream/11594/3386/4/TESIS%20EVALUACION%20DE%20LOS%20EFECTOS%20DEL%20CAMBIO%20DE%20USO%20DE%20SUELO.Image.Marked.pdf>
- Sahin, V., & Hall, M. J. (1996). The effects of afforestation and deforestation on water yields. *Journal of Hydrology*, 178(1), 293-309. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0022-1694\(95\)02825-0](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0022-1694(95)02825-0)
- Sarricolea, P., Herrera-Ossandon, M., & Meseguer-Ruiz, Ó. (2017). Climatic regionalisation of continental Chile. *Journal of Maps*, 13(2), 66-73. <https://doi.org/10.1080/17445647.2016.1259592>
- Shawul, A. A., Chakma, S., & Melesse, A. M. (2019). The response of water balance components to land cover change based on hydrologic modeling and partial least squares regression (PLSR) analysis in the Upper Awash Basin. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 26, 100640. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2019.100640>
- Shiklomanov, I. A. (1998). World water resources: a new appraisal and assessment for the 21st century. In.
- Shooshtarian, M. R., Dehghani, M., Margherita, F., Gea, O. C., & Mortezaazadeh, S. (2018). Land use change and conversion effects on ground water quality trends: An integration of land change modeler in GIS and a new Ground

- Water Quality Index developed by fuzzy multi-criteria group decision-making models. *Food and Chemical Toxicology*, 114, 204-214. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fct.2018.02.025>
- Siqueira, P. P., Oliveira, P. T. S., Bressiani, D., Meira Neto, A. A., & Rodrigues, D. B. B. (2021). Effects of climate and land cover changes on water availability in a Brazilian Cerrado basin. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 37, 100931. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100931>
- Tapia, R. P. M. (2004). *Mapa de reconocimiento de suelos de la VIII Región del Bío-Bío (Sector sur)*. Universidad de Chile. <https://books.google.cl/books?id=PyeeHAAACAAJ>
- Teklay, A., Dile, Y. T., Asfaw, D. H., Bayabil, H. K., & Sisay, K. (2021). Impacts of Climate and Land Use Change on Hydrological Response in Gumara Watershed, Ethiopia. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 21(2), 315-332. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2020.12.001>
- Trang, N. T. T., Shrestha, S., Shrestha, M., Datta, A., & Kawasaki, A. (2017). Evaluating the impacts of climate and land-use change on the hydrology and nutrient yield in a transboundary river basin: A case study in the 3S River Basin (Sekong, Sesan, and Srepok). *Science of The Total Environment*, 576, 586-598. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.138>
- Valdés-Pineda, R., Pizarro, R., García-Chevesich, P., Valdés, J. B., Olivares, C., Vera, M., Balocchi, F., Pérez, F., Vallejos, C., Fuentes, R., Abarza, A., & Helwig, B. (2014). Water governance in Chile: Availability, management and climate change. *Journal of Hydrology*, 519, 2538-2567. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.04.016>
- Veldkamp, A., & Lambin, E. F. (2001). Predicting land-use change. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 85(1), 1-6. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00199-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00199-2)
- Verburg, P. H., Schot, P. P., Dijst, M. J., & Veldkamp, A. (2004). Land use change modelling: current practice and research priorities. *GeoJournal*, 61(4), 309-324. <https://doi.org/10.1007/s10708-004-4946-y>
- WWAP, U. W. W. A. P. (2018). Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2018: soluciones basadas en la naturaleza para la gestión del agua. In.
- Xiang, W.-N., & Clarke, K. C. (2003). The Use of Scenarios in Land-Use Planning. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 30(6), 885-909. <https://doi.org/10.1068/b2945>
- Yan, B., Fang, N. F., Zhang, P. C., & Shi, Z. H. (2013). Impacts of land use change on watershed streamflow and sediment yield: An assessment using hydrologic modelling and partial least squares regression. *Journal of Hydrology*, 484, 26-37. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.01.008>
- Yevenes, M. A., & Mannaerts, C. M. (2011). Seasonal and land use impacts on the nitrate budget and export of a mesoscale catchment in Southern Portugal. *Fuel and Energy Abstracts*, 102. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.10.006>