



Universidad de Concepción



Facultad de Ciencias Ambientales
Universidad de Concepción

ANÁLISIS DE DESEMPEÑO DEL MODELO HIDROLÓGICO SWAT PARA REPLICAR TENDENCIAS OBSERVADAS DE CAUDAL

Habilitación presentada para optar al título de
Ingeniera Ambiental

EVELYN SOLANGE FOPPIANO ESCARES

Profesor Guía: Dr. Pedro Arriagada Sanhueza

Concepción (Chile) 2024



“Análisis de desempeño del modelo hidrológico SWAT para replicar tendencias observadas de caudal”

Profesor Guía: Dr. Pedro Arriagada Sanhueza

Profesor Comisión: Dra. Claudia Ulloa Tesser

Profesor Comisión: Dr. Alberto Araneda Castillo

CONCEPTO: APROBADO CON DISTINCIÓN

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, diciembre 2024

ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS	v
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
RESUMEN	viii
1 ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO	1
1.1 El recurso hídrico en Chile	1
1.1.1 Tendencia en la disponibilidad del recurso hídrico	5
1.1.2 Proyección del recurso hídrico.....	8
1.2 Modelación Hidrológica.....	9
1.2.1 Clasificación de los modelos hidrológicos.....	10
1.2.2 SWAT como alternativa para la modelación de Recurso Hídrico.....	13
1.2.3 Indicadores para medir el desempeño de un modelo hidrológico	13
2 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	17
3 OBJETIVOS	17
3.1 Objetivo General	17
3.2 Objetivos Específicos.....	17
4 METODOLOGÍA	19
4.1 Área de estudio.....	19
4.1.1 Clima.....	20
4.1.2 Hidrología	21
4.1.3 Estudio previo en río Laja en Tucapel y río Huaqui en Diuquín	22
4.2 Comparar tendencias anuales presentes en el caudal observado para las cuencas de estudio y simulado por el modelo SWAT.....	24

4.3	Comparar tendencias mensuales presentes en el caudal observado para las cuencas de estudio y simulado por el modelo SWAT.	27
5	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	28
5.1	Comparar tendencias anuales presentes en el caudal observado para las cuencas de estudio y simulado por el modelo SWAT.....	28
5.2	Comparar tendencias mensuales presentes en el caudal observado para las cuencas de estudio y simulado por el modelo SWAT.	33
6	CONCLUSIONES	40
7	REFERENCIAS.....	42
8	ANEXOS	48
8.1	Anexo A	48

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Disponibilidad hídrica por región.	3
Tabla 2. Proyección de caudal para cuencas chilenas.....	8
Tabla 3. Principales características según criterio de agregación espacial.....	10
Tabla 4. Principales características según criterio de distribución espacial.	12
Tabla 5. Indicadores estadísticos.	15
Tabla 6. Estaciones red hidrométrica DGA para las cuencas de estudio.....	21
Tabla 7. Indicadores de desempeño del modelo SWAT para el periodo de calibración.	22
Tabla 8. Indicadores de desempeño del modelo SWAT para el periodo de validación.	22
Tabla 9. Descripción de la significancia del test Mann - Kendall.....	25
Tabla 10. Resultados de la Prueba de Mann-Kendall para Tendencias en Series Temporales de caudal máximo, medio y mínimo anual observado Río Laja en Tucapel (2000-2015).	28
Tabla 11. Resultados de la Prueba de Mann-Kendall para Tendencias en Series Temporales de caudal máximo, medio y mínimo anual simulado Río Laja en Tucapel (2000-2015).	29
Tabla 12. Resultados de la Prueba de Mann-Kendall para Tendencias en Series Temporales de caudal máximo, medio y mínimo anual observado Río Huaqui en Diuquín (1986-2001).	31
Tabla 13. Resultados de la Prueba de Mann-Kendall para Tendencias en Series Temporales de caudal máximo, medio y mínimo anual simulado Río Huaqui en Diuquín (1986-2001).	31
Tabla 14. Resultados de la Prueba de Mann-Kendall para Tendencias en Series Temporales de caudales medios mensuales observados Río Laja en Tucapel (2000-2015).	33

Tabla 15. Resultados de la Prueba de Mann-Kendall para Tendencias en Series Temporales de caudales medios mensuales simulados Río Laja en Tucapel (2000-2015).....	36
Tabla 16. Resultados de la Prueba de Mann-Kendall para Tendencias en Series Temporales de caudales medios mensuales observados Río Huaqui en Diuquín (1986-2001).....	37
Tabla 17. Resultados de la Prueba de Mann-Kendall para Tendencias en Series Temporales de caudales medios mensuales simulados Río Huaqui en Diuquín (1986-2001).....	39

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. a) Caudal superficial medio anual y demanda de agua a nivel regional. b) Zonas declaradas con escasas hídrica y zonas protegidas.	4
Figura 2. a) Precipitación y b) caudal en localidades seleccionadas del centro-sur de Chile.	7
Figura 3. Modelos a escala espacial: a) agrupados, b) semi-distribuidos y c) distribuidos	11
Figura 4. Área de estudio.	20
Figura 5. Validación de caudales mensuales en la cuenca del río Laja.	23
Figura 6. Validación de caudales mensuales en la cuenca del río Huaqui.....	23
Figura 7. Metodología para obtener tendencias observadas y simuladas.....	26
Figura 8. Caudal anual observado "Río Laja en Tucapel"	29
Figura 9. Caudal anual simulado "Río Laja en Tucapel"	30
Figura 10. Caudal anual a) Observado b) Simulado en Rio Huaqui en Diuquín. ..	32
Figura 11. Caudal medio mensual observado dic-ene-feb-mar Rio Laja en Tucapel.	34
Figura 12. Caudal medio mensual observado junio y-julio Rio Laja en Tucapel. ..	34
Figura 13. Caudal medio mensual observado y simulado Río Laja en Tucapel (2000-2015).	35
Figura 14. Caudal a) Marzo y b) Abril con tendencia en Rio Huaqui en Diuquín. .	38

RESUMEN

El presente estudio se realizó en dos cuencas de la zona centro-sur de Chile, generadas a partir de las estaciones fluviométricas “Río Laja en Tucapel” y “Río Huaqui en Diquín”, ubicadas en la región del Biobío.

Se analizaron tendencias en los caudales anuales máximos, medios y mínimos, así como tendencias mensuales. Se compararon las tendencias de caudal observado para ambas cuencas utilizando el test de Mann-Kendall y para estimar la magnitud de las tendencias, se aplicó la pendiente de Sen. Los datos de caudal utilizados provienen del estudio realizado por Eula (2023) para los periodos 2000-2015 en la cuenca del río Laja y 1986-2001 en la cuenca del río Huaqui.

Los resultados para los caudales anuales de Río Laja en Tucapel indica que el modelo SWAT fue capaz de replicar tendencia observada en los caudales máximos anuales, pero no en los caudales medios y mínimos, se concluye que arrojó un falso positivo en los máximos. En cambio, para Río Huaqui en Diquín no se encontraron tendencias significativas en caudales anuales observados ni simulados. Por otro lado, en tendencias mensuales, Río Laja en Tucapel reflejó tendencias decrecientes significativas en algunos caudales medios mensuales observados (enero, febrero, marzo, junio, julio y diciembre), en cambio, no se encontraron tendencias significativas en datos simulados. Para Río Huaqui en Diquín, se obtuvo tendencias decrecientes significativas en caudales medios mensuales observados en marzo y abril y no se encontraron tendencias significativas en datos simulados.

Las tendencias decrecientes en los caudales anuales y mensuales sugieren una disminución en la disponibilidad de agua en dichas cuencas y coincide con lo ocurrido en la última década en la zona central del país que ha experimentado un periodo de sequía considerable.

Para el estudio actual se concluye que el modelo SWAT no logró replicar tendencias observadas de caudal en las cuencas de estudio.

1 ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO

El agua es esencial para la vida y el bienestar humano. Sin embargo, la demanda de agua está aumentando, y un sinnúmero de personas en todo el mundo ya enfrentan escasez de este recurso vital. A medida que la población se concentra cada vez más en las zonas urbanas, la disponibilidad y el suministro de agua se convierten en un desafío global. Es fundamental abordar este problema para garantizar un futuro sostenible. (Stehr et al., 2010).

1.1 El recurso hídrico en Chile

En la actualidad el recurso natural más importante en que descansa la estructura productiva, ambiental y de desarrollo económico y social de Chile, es el agua (Pizarro, 2021). El país posee una disponibilidad hídrica que supera la media mundial, si comparamos la disponibilidad per cápita nacional con el promedio de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), Chile es considerado abundante en agua. En cifras, la disponibilidad hídrica media es de 47.914 m³ por habitante por año, esto supera tanto el promedio de América Latina y El Caribe (28.116 m³hab⁻¹año⁻¹) como el promedio mundial (15.465 m³hab⁻¹año⁻¹; Banco Mundial, 2021).

Según la Dirección General de Aguas (2015), la distribución del recurso se estima:

- Ríos y Cuencas: Chile cuenta con 1.251 ríos distribuidos en 101 cuencas a lo largo de su territorio. Estos ríos desempeñan un papel crucial en el ciclo del agua y biodiversidad.
- Cuerpos de Agua: Además de los ríos, hay 12.784 cuerpos de agua, que incluyen lagos y lagunas. Estos cuerpos de agua son valiosos para la recreación, pesca y conservación.
- Glaciares: Chile alberga 24.114 glaciares. Estos glaciares son importantes para el suministro de agua dulce y también tienen un impacto en el nivel del mar.

Aunque la disponibilidad total es alta, no está uniformemente distribuida a lo largo del territorio, con caudales extremadamente bajos en el norte y muy elevados en el sur (DGA, 2019). Además, la variabilidad interanual de las precipitaciones es sustancialmente mayor hacia el norte del país, de modo que las situaciones de sequía tienen una intensidad y duración mayor en aquellas zonas que presentan una menor disponibilidad hídrica, agravando sus impactos en la actividad económica (Valdés-Pineda et al., 2014). En las regiones del norte los caudales máximos se observan en los meses de verano, como consecuencia de las lluvias estivales del altiplano, mientras que en el Norte Chico y en la Zona Central, el régimen hidrológico refleja la importante acumulación nival que ocurre en la cordillera de los Andes, generándose la mayor parte de la escorrentía anual durante el período de deshielo, entre octubre y marzo (CR², 2015).

Al considerar la disponibilidad hídrica por región, es posible ver en Tabla 1 que la zona comprendida entre las regiones de Arica y Parinacota y la Metropolitana, es la que presenta los valores más bajos a nivel nacional. En ellas, destacan la región de Antofagasta, con $47 \text{ m}^3\text{hab}^{-1}\text{año}^{-1}$, la cual corresponde a la región con menor disponibilidad hídrica de la zona y, por otro lado, la región de Coquimbo, que cuenta con $908 \text{ m}^3\text{hab}^{-1}\text{año}^{-1}$, el valor más alto. Ambos, considerablemente inferior al umbral recomendado de $2.000 \text{ m}^3\text{hab}^{-1}\text{año}^{-1}$. Desde la región de O'Higgins hacia el sur la disponibilidad hídrica aumenta considerablemente, presentándose el mayor valor a nivel nacional en la región de Aysén con $2.993.036 \text{ m}^3\text{hab}^{-1}\text{año}^{-1}$, el cual excede significativamente el umbral propuesto por el Banco Mundial. (DGA, 2015).

Tabla 1. Disponibilidad hídrica por región.

Regiones de Chile	Disponibilidad hídrica (m³hab⁻¹año⁻¹)
Arica y Parinacota	725
Tarapacá	599
Antofagasta	47
Atacama	190
Coquimbo	908
Valparaíso	703
Metropolitana	444
O'Higgins	7.037
Maule	23.191
Biobío	24.432
Araucanía	33.167
Los Ríos	81.563
Los Lagos	154.058
Aysén	2.993.036
Magallanes	1.938.956

Fuente: DGA, 2015.

Al observar la relación entre el caudal superficial medio anual y la demanda hídrica a nivel regional, se puede observar, en la Figura 1 a), que la zona norte del país (Arica y Parinacota, Tarapacá, Antofagasta, Atacama y Coquimbo), posee una mayor demanda a la disponibilidad existente, causado por la creciente actividad minera en la zona, junto con la actividad agrícola. Esta relación negativa se extiende a la zona central en las regiones de Valparaíso y Metropolitana, pero con una diferencia cada vez menor, correspondiente a la actividad agropecuaria que se lleva a cabo en esta zona. Desde la región de O'Higgins se comienza a observar una relación positiva entre la disponibilidad hídrica y la demanda, la cual aumenta considerablemente desde la región de la Araucanía al sur, evidenciándose la mayor diferencia entre disponibilidad y demanda en la región de Aysén (DGA, 2015).

Las relaciones negativas entre la disponibilidad del recurso hídrico y la demanda, que se ve principalmente en el norte del país, sumado al sobre otorgamiento de

derechos de agua para las zonas norte y centro, han generado una disminución en la disponibilidad hídrica, lo que se expresa en zonas del país declaradas como agotadas, las cuales se pueden visualizar de color rojo en la Figura 1 b), donde ya no es posible conceder derechos de agua permanentes. La declaración de agotamiento es un instrumento que dispone la Dirección General de Aguas para señalar que, en la fuente natural de agua superficial respectiva, sea un río, lago, laguna u otro, se agotó la disponibilidad del recurso hídrico para la constitución de nuevos derechos de aprovechamiento de aguas superficiales de tipo consuntivo y ejercicio permanentes. Dada esta medida de protección, entre los años 1952 al 2015 se han dictado un total de 11 declaraciones de agotamiento, cuya área alcanza los 76.131 km². El 82% de esta área corresponde a la Macrozona Norte, siendo la cuenca del Río Loa (la cuenca de mayor tamaño en Chile) la que concentra la mayor área declarada (DGA, 2015).

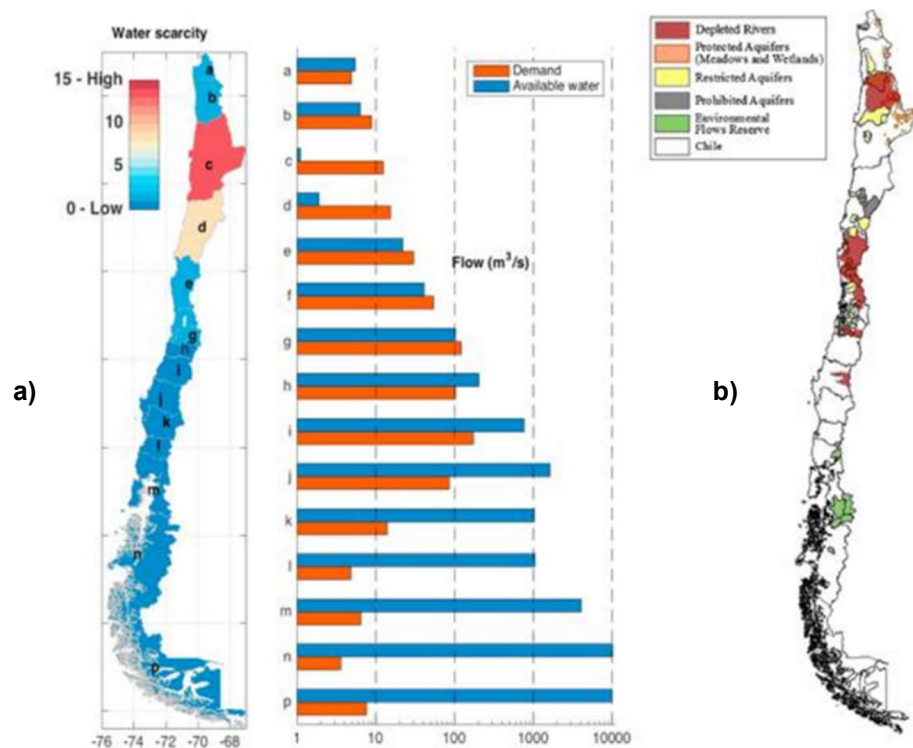


Figura 1. a) Caudal superficial medio anual y demanda de agua a nivel regional. b) Zonas declaradas con escasas hídrica y zonas protegidas.

Fuente: a) Alvez et al., 2020. b) Valdes-Pineda et al., 2014.

1.1.1 Tendencia en la disponibilidad del recurso hídrico

El cambio climático eleva el riesgo hídrico en la medida que acentúa la ocurrencia de daños sociales, ambientales y económicos (UNESCO, 2020).

Dada su forma alargada y a la relativa influencia del Pacífico Sur y la Cordillera de los Andes, Chile continental presenta varias zonas climáticas. Esta heterogeneidad se manifiesta principalmente como un fuerte gradiente de precipitación de norte a sur, formando ambientes contrastantes como el extremadamente árido desierto de Atacama y regiones del sur de Chile que reciben más de 3.000 mm/año en promedio. El efecto orográfico sobre la precipitación inducida por los Andes define otro carácter notable del régimen hidrológico en Chile, en particular en las regiones central y sur del país, donde la precipitación en las laderas de las montañas puede ser de dos a tres veces mayor que en las zonas más bajas. (Viale y Garreaud, 2015).

Debido a la disminución de las precipitaciones en la zona centro-norte, el país experimenta desde hace más de una década una sequía recurrente. Actualmente, las regiones entre Atacama y Ñuble mantienen un déficit de precipitación de casi 100% con respecto al promedio histórico 1981- 2010 y los acuíferos muestran una tendencia a la baja entre la región de Coquimbo y el Maule (DGA, 2020). Además, las temperaturas en las montañas han aumentado cada decenio desde 1976 entre 0,2 y 0,3°C, y los glaciares han experimentado un rápido retroceso (UNESCO, 2018). Esto dificulta el acceso al agua potable en las zonas rurales entre la Región Metropolitana y el Biobío que dependen en un 83% de las aguas subterráneas (DGA, 2015). 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. Si bien Chile está tomando acciones frente al cambio climático, a través de la Estrategia Climática de Largo Plazo y sus instrumentos relacionados, los desafíos persisten.

- Tendencias en las precipitaciones en Chile

Los modelos climáticos actuales simulan un patrón de disminución de las precipitaciones particularmente consistente en el sector del Pacífico sureste en respuesta al forzamiento antropogénico (Collins et al., 2013; Christensen et al., 2013; He y Soden, 2017), y en algunos casos se proyectan déficits de hasta al 40% hacia finales de siglo (Polade et al., 2017). Este efecto regional del cambio climático afectaría directamente al centro-sur de Chile, región que concentra la mayor parte de la población y las actividades económicas del país. Es más, si las emisiones globales de gases de efecto invernadero (GEI) continúan sin disminuir, el clima futuro en Chile podría parecerse a la condición observada desde 2010 hasta el presente. En este período, el centro-sur de Chile experimentó la sequía más larga y extendida desde ca. 1900, con solo uno o dos eventos similares en el último milenio (Garreaud et al., 2017). Estos últimos años se han caracterizado por déficits de precipitaciones anuales que oscilan entre el 15 y el 45%, una reducción equivalente de los recursos hídricos superficiales y subterráneos, impactos perjudiciales sobre la vegetación y temporadas de incendios muy activas (Garreaud et al., 2017; González et al., 2018).

En Boisier et al. (2018), se indica una tendencia predominantemente negativa dentro de los períodos disponibles (1960-2016) se puede observar en los registros de precipitación a) y caudal b) que se muestran en la Figura 2.

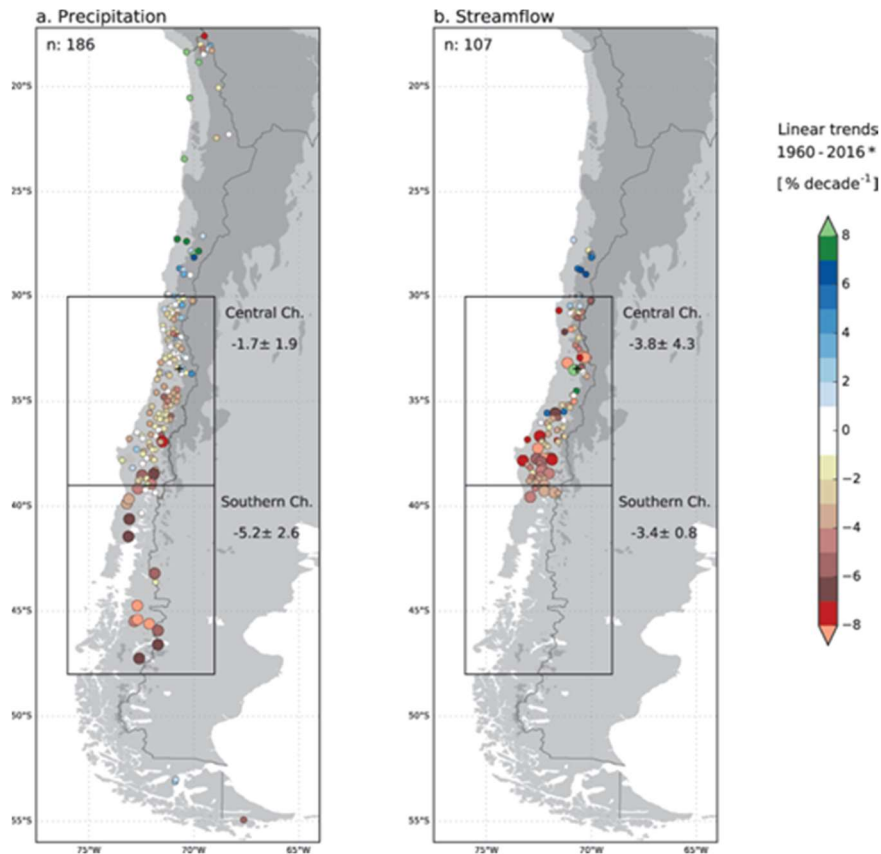


Figura 2. a) Precipitación y b) caudal en localidades seleccionadas del centro-sur de Chile.

Fuente: Boisier, et al., 2018

- Tendencias de caudal en Chile

Un resultado interesante a destacar es que los datos de caudal dentro de la misma región Figura 2 b) indican una disminución mayor en amplitud (-3,8% por década) que se debe mayoritariamente a la precipitación. Sin embargo, este mayor cambio se explica por modificaciones en otras variables del balance hidrológico, como cambios de usos de suelo. La dependencia del caudal de otros procesos, incluida la evapotranspiración, la acumulación de nieve, los cambios de vegetación y el uso de la tierra, puede explicar aún más las distintas respuestas hidrológicas a los cambios de precipitación. Siguiendo esta señal más fuerte, los datos de caudal también muestran una fracción mayor de casos con tendencias estadísticamente diferentes de cero. Sin embargo, también hay una gran variación en las tendencias

de caudal derivadas en esta región (una desviación estándar de 4,3 mm por década), incluyendo varios sitios con valores positivos (Boisier, et al., 2018).

1.1.2 Proyección del recurso hídrico

En Tabla 2 se entrega un resumen realizado por Riquelme (2018) que corresponde al estudio de las proyecciones de caudal para las cuencas del centro – sur de Chile, bajo diferentes escenarios de cambio climático del IPCC (RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5). En todos los estudios se estima una disminución en el caudal, por ejemplo, en las cuencas del río Malleco – Vergara (-80,96%), Illapel (51,8%), la cuenca del río Lonquimay (-65%) y del río Juncal (-60%), estas últimas afectadas por el aumento de la isoterma 0°C.

Tabla 2. Proyección de caudal para cuencas chilenas.

Cuenca	Escenario favorable	Escenario critico
Limarí (Vicuña et al., 2010)	-23,5%	-45,5%
Illapel (RHMA, 2010)	-	-36,1 a -51,8%
Aconcagua (RHMA, 2010)	-	-20,1 a -43,5%
Juncal (Rafettli et al., 2016)	-40%	-60%
Maipo Alto (Migliavacca et al., 2015)	-21%	-10%
Maule Alto (CEPAL, 2012)	-27,9%	-36,6%
Laja (CEPAL, 2012)	-22,2%	-36,6%
Malleco – Vergara (Stehr, 2008)	-	-80,96%
Lonquimay (Stehr, 2008)	-	-65%
Cautín (RHMA, 2010)	-	-12,8 a -29,6%

Fuente: Extraído de Riquelme, 2018.

Por otro lado, recientemente el Servicio de Evaluación Ambiental (SEA, 2023) publicó una guía sobre proyecciones esperadas del Cambio Climático en el recurso hídrico nacional. Esta guía entrega un enfoque general de cómo considerar los efectos adversos del cambio climático en el marco de la evaluación de un proyecto o actividad en el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA). En el caso de los recursos hídricos el cuál el Agua es Objeto de Protección, se tiene que en la evaluación de significancia de impactos se debe considerar el riesgo de sequía hidrológica, para el cual se clasifica la disponibilidad de agua en cinco categorías: fuerte disminución, leve disminución, sin cambio, leve aumento, fuerte aumento. El cálculo y la protección del caudal ambiental es en esta materia un aspecto ineludible, lo que requiere de una adecuada modelación de los flujos hídricos en el escenario climático más desfavorable. Ante ello se deben tener también presentes las declaraciones de escasez hídrica y los índices estandarizados de sequías que dicte la Dirección General de Aguas (SEA 2023).

1.2 Modelación Hidrológica

El territorio y sus procesos no pueden ser descritos en forma exacta, debido a la complejidad del sistema hidrológico. Por lo que es necesario contar con modelos que reproduzcan de la mejor forma posible los procesos naturales y que, por otro lado, satisfagan los requerimientos de información de la sociedad (Stehr, 2010). Los modelos hidrológicos y de calidad de agua son herramientas matemáticas que se utilizan para simular y predecir el comportamiento de los sistemas hídricos y la calidad del agua en ellos (Munar-Samboní et al., 2021). En el caso de un modelo hidrológico el sistema físico representado es por lo general la cuenca, de manera de entender de forma adecuada los procesos físicos e hidrológicos que tiene. El objetivo de una modelación hidrológica es estimar la repuesta y parámetros, para poder predecir y comprender el comportamiento de los sistemas (Stehr, 2010).

1.2.1 Clasificación de los modelos hidrológicos

Los modelos de escorrentía superficial se clasifican en función de los principios físicos aplicados en el modelo, o bien por los datos y parámetros de entrada necesarios para llevar a cabo la modelación.

En términos de los principios físicos aplicados, en (Gayathri et al., 2015) se indica que los modelos hidrológicos se clasifican en tres categorías principales: modelos empíricos, modelos conceptuales y modelos basados en la física. A continuación, la Tabla 3 entrega mayor detalle de las principales características según esta clasificación.

Tabla 3. Principales características según criterio de agregación espacial.

Modelo Empírico	Modelo Conceptual	Modelo Basado en Principios Físicos
Modelo basado en datos o modelo de caja negra	Modelo paramétrico o de caja gris	Modelo mecanicista o de caja blanca
Involucra ecuaciones matemáticas, deriva valor de series temporales disponibles	Basado en modelado de reservorios e incluye ecuaciones semi empíricas con base física	Basado en distribución espacial, evaluación de parámetros que describen características físicas
Poca consideración de características y procesos del sistema	Los parámetros se derivan de datos de campo y calibración	Requieren datos sobre el estado inicial del modelo y la morfología de la cuenca
Alta capacidad predictiva, baja profundidad explicativa	Simple y puede implementarse fácilmente en código de computadora	Modelo complejo, requiere experiencia humana y capacidad computacional
No puede generalizarse a otras cuencas	Requiere grandes datos hidrológicos y meteorológicos	Sufre de problemas relacionados con la escala
ANN, hidrograma unitario	Modelo HBV, TOPMODEL	Modelo SHE o MIKE SHE, SWAT
Válido dentro del límite de un dominio dado	La calibración implica ajuste de curvas, haciendo difícil la interpretación física	Válido para una amplia gama de situaciones

Fuente: Adaptado de Gayathri et al., 2015

De igual forma, los modelos hidrológicos se clasifican de acuerdo con su discretización espacial, en Gayathri et al. (2015), indica que los modelos hidrológicos se dividen en modelos agrupados, semi-distribuidos y distribuidos Figura 3.

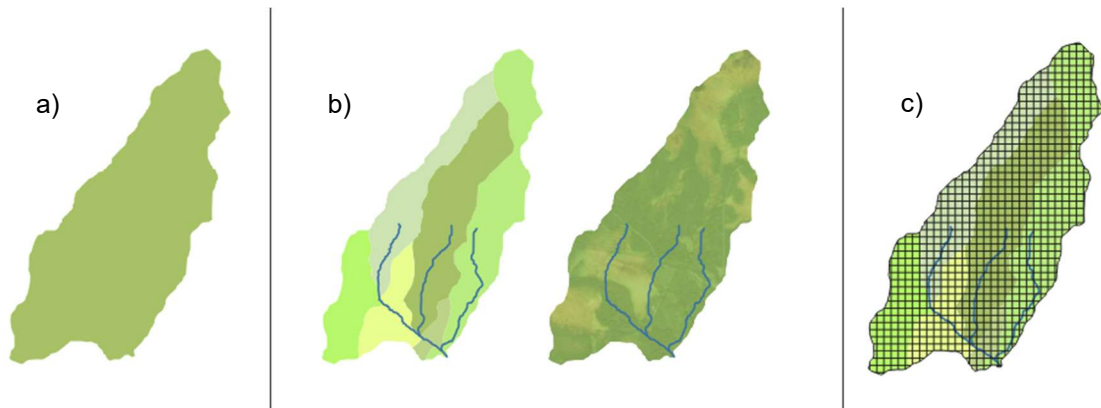


Figura 3. Modelos a escala espacial: a) agrupados, b) semi-distribuidos y c) distribuidos

Fuente: Extraído de Ochoa-Tocachi., et al, 2022.

Las características según el criterio de su discretización espacial, junto a sus ventajas, aplicaciones y limitaciones se pueden visualizar en la Tabla 4, donde influyen los requerimientos de información a diferentes escalas, que van desde información resumida (como el área de la cuenca) hasta información muy detallada (como mapas espaciales de elevación, suelos o cobertura vegetal), y las salidas de los modelos dependerán también de estas escalas (Moradkhani & Sorooshian, 2009).

Es necesario indicar que no hay un tipo de modelo que sea mejor que otro; simplemente, tienen aplicaciones diferentes. A simple vista, los modelos de base física pueden dar la impresión de reproducir de manera más fiel la realidad debido a que se aproximan a las leyes aceptadas por la comunidad científica (Ochoa-Tocachi., et al, 2022). Sin embargo, su alta parametrización y demanda de datos

conlleven problemas de modelación y calibración, como la no linealidad, la equifinalidad y la sobre parametrización (Beven, 2011).

Tabla 4. Principales características según criterio de distribución espacial.

Tipo de Modelo	Modelos Agrupados	Modelos Semi-distribuidos	Modelos Distribuidos
Descripción	Tratan la cuenca como una unidad única sin tener en cuenta la variabilidad espacial dentro de la cuenca.	Dividen la cuenca en subcuencas o unidades de respuesta hidrológica (HRUs), considerando alguna variabilidad espacial.	Representan la cuenca en una rejilla o malla, considerando la variabilidad espacial en detalle.
Aplicaciones	Útiles para cuencas pequeñas donde la variabilidad espacial es mínima.	Adecuados para cuencas de tamaño mediano a grande.	Útiles para cuencas grandes y complejas con alta variabilidad espacial.
Ventajas	Simplicidad y menor necesidad de datos detallados.	Balance entre detalle espacial y simplicidad computacional.	Alta precisión y capacidad para capturar procesos espaciales detallados.
Limitaciones	Menor precisión en áreas con alta variabilidad espacial.	Requieren más datos que los modelos agrupados, pero menos que los distribuidos.	Altos requerimientos de datos y capacidad computacional.

Elaborado en base a Moradkhani & Sorooshian (2009).

1.2.2 SWAT como alternativa para la modelación de Recurso Hídrico

El modelo SWAT (Herramienta para la Evaluación del Suelo y el Agua) es un modelo hidrológico y de calidad de agua, físicamente basado, elaborado por el Servicio de Investigación Agrícola (Agricultural Research Service; ARS), perteneciente al Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) durante la década de 1990 (Uribe et al., 2010).

SWAT es un modelo continuo de tiempo, es decir un modelo conformado a largo plazo, que no está diseñado para simular un solo-acontecimiento de flujo detallado (Uribe et al., 2010). Fue diseñado para modelar el transporte de agua, sedimentos y contaminantes generados y exportados desde cuencas individuales. Stehr (2008) señala que el modelo puede ser utilizado para predecir los impactos producidos por las prácticas de manejo del suelo sobre los balances de agua, sedimentos y calidad del agua en cuencas grandes y complejas con diferentes tipos y usos de suelo, en largos periodos de tiempo.

SWAT requiere información hidro-meteorológica, propiedades de suelos, topografía, vegetación y prácticas de manejo de la tierra que se desarrollan en las cuencas para utilizar estas como datos de entrada. Los procesos físicos asociados con el movimiento del agua (flujos superficial, subterráneo y nival), movimiento de sedimento, desarrollo de cosecha, ciclo de nutrientes, cambios de usos de suelo, etc., pueden ser modelados directamente por SWAT (Uribe et al., 2010).

1.2.3 Indicadores para medir el desempeño de un modelo hidrológico

El desempeño de las simulaciones de un modelo hidrológico se puede estimar mediante una evaluación cualitativa, que implica el análisis gráfico de series temporales observadas y simuladas. De forma cuantitativa, utilizando tres indicadores estadísticos según lo recomendado por Moriasi et al. (2015): la eficiencia de Nash y Sutcliffe (NSE), el sesgo porcentual (PBIAS) y el coeficiente de determinación (R^2).

- **Coefficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE):**

El NSE (Ec.1) muestra la capacidad predictiva de valores simulados y observados según un ajuste a una recta de pendiente 45°, oscila entre $-\infty$ y 1 (Moriasi et al., 2007), donde 1 indica un acuerdo perfecto entre los valores observados y simulados. Un valor de $NSE = 1,0$ indica una predicción perfecta, mientras que los valores de $NSE \leq 0$ indican que la media de los datos observados es un predictor más preciso que la salida simulada.

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

Fuente: Moriasi et al., 2015

Donde, O_i , P_i , \bar{O} corresponden a los valores observados, simulados y promedio observado respectivamente, en el instante i , y siendo n el número de observaciones.

- **Porcentaje de sesgo (PBIAS)**

El PBIAS (Ec.2) mide la tendencia media de los datos simulados a ser mayores o menores que los observados y oscila entre $-\infty$ y $+\infty$ (Gupta et al., 1999). El valor óptimo de PBIAS es 0,0 y los valores bajos indican una simulación precisa del modelo; siendo los valores negativos un indicador de subestimación del modelo, mientras que valores positivos indican sobrestimación.

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - P_i}{\sum_{i=1}^n O_i} * 100 \quad (\text{Ec.2})$$

Fuente: Moriasi et al., 2015

Donde, O_i , P_i corresponden a los valores observados y simulados respectivamente en el instante i , y siendo n el número de observaciones.

- **Coefficiente de determinación (R^2)**

El coeficiente de determinación, denotado como R^2 (Ec.3), es otro estadístico ampliamente utilizado que estima la dispersión de los datos observados y simulados. En otras palabras, es una medida para mostrar una relación lineal entre los datos observados y simulados. Varía de 0 a 1, donde 1 es el valor óptimo que significa el ajuste ideal entre los valores observados y simulados (Malik et al., 2020).

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right]^2 \quad (\text{Ec.3})$$

Fuente: Moriasi et al., 2015

Donde, O_i , P_i , \bar{O} , \bar{P} corresponden a los valores observados, simulados, promedio observado y promedio simulado respectivamente, en el instante i , y siendo n el número de observaciones.

Tabla 5 muestra los diferentes indicadores de desempeño para un modelo hidrológico según lo recomendado por Moriasi et al. 2015, (mayor detalle en Anexo A).

Tabla 5. Indicadores estadísticos.

Indicador	Muy bueno	Bueno	Satisfactorio	No Satisfactorio
R^2	$> 0,85$	$0,75 \leq R^2 \leq 0,85$	$0,60 \leq R^2 \leq 0,75$	$\leq 0,60$
NSE	$> 0,80$	$0,70 \leq \text{NSE} \leq 0,80$	$0,50 \leq \text{NSE} \leq 0,70$	$\leq 0,50$
PBIAS (%)	$\leq \pm 5$	$\pm 5 \leq \text{PBIAS} \leq \pm 10$	$\pm 10 \leq \text{PBIAS} \leq \pm 15$	$> \pm 15$

Fuente: Moriasi et al., 2015

La modelación hidrológica se constituye en una valiosa herramienta para mejorar el conocimiento de los sistemas hídricos con el propósito de dar soporte a la toma de decisiones sobre las acciones de gestión integral del recurso hídrico. Estudios como Moriasi et al., 2015 se centran en evaluar el desempeño del modelo en base a indicadores (R^2 , NSE, PBIAS) que ponderan los errores de la simulación. Sin embargo, no establece requerimiento en cuanto a la capacidad del modelo para reproducir tendencias observadas en las series de datos.

2 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

Los actuales criterios para evaluar el desempeño de una modelación hidrológica se centran principalmente en estimar la capacidad predictiva del modelo, limitando los errores admisibles que se pueden realizar en una modelación. Sin embargo, sólo existen sugerencias en que se debe evaluar la capacidad del modelo para replicar tendencias observadas en los datos históricos, lo cual es relevante para evaluar la disponibilidad hídrica de una cuenca. Es por ello por lo que se plantea la siguiente pregunta de investigación: ¿El modelo hidrológico SWAT puede reproducir una tendencia observada en el registro de caudales de una cuenca?

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo General

- Analizar tendencias en datos de caudales observados y simulados con el modelo hidrológico SWAT en dos cuencas de Chile central-sur.

3.2 Objetivos Específicos

- Comparar tendencias anuales presentes en el caudal observado para las cuencas de estudio y simulado por el modelo SWAT.
- Comparar tendencias mensuales presentes en el caudal observado para las cuencas de estudio y simulado por el modelo SWAT.

Aporte al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) son una iniciativa constituida en el año 2015 por la Organización de Naciones Unidas (ONU), en conjunto con ONGs y representantes de la sociedad civil, donde se propuso la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible enfocada en el ámbito económico, social y ambiental, compuesto por 17 objetivos y 169 metas (MMA, 2021). El presente estudio aporta al ODS 6 el cual es Garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos. Con especial énfasis en la meta 6.5 la cual enfoca que de aquí a 2030, implementar la gestión integrada de los recursos hídricos a todos los niveles, incluso mediante la cooperación transfronteriza, según proceda (ONU, 2023).

Conocer la tendencia en los caudales hidrológicos es esencial para una gestión eficiente y sostenible de los recursos hídricos, así como para la protección del medio ambiente y la planificación a largo plazo.

4 METODOLOGÍA

4.1 Área de estudio

El área de estudio comprende dos cuencas en la zona centro-sur de Chile, las cuales fueron generadas a partir de las estaciones fluviométricas “Río Laja en Tucapel” y “Río Huaqui en Diuquín” (Tabla 6) ubicadas en la región del Biobío. Dichas cuencas fueron analizadas en el centro de ciencias ambientales Eula (2023), “Estudio de disponibilidad hídrica para la cuenca del río Laja”.

La cuenca río Laja en Tucapel (Figura 4, línea rosada) se origina a partir de la estación homónima y corresponde a una subcuenca del río Laja, el afluente septentrional más importante del Biobío (DGA, 2004). La cuenca consta de una superficie de 2767 km² (Alvarez-Garreton, et al., 2018) y su cabecera se emplaza en la cordillera Andina, al este del volcán Antuco y al sur de los Nevados de Chillán, abarcando parte de las regiones del Ñuble y Biobío, drenando la laguna de La Laja, para confluir en la comuna de Tucapel. La superficie abarcada por esta cuenca coincide íntegramente con el Sector Hidrogeológico de Aprovechamiento Común (SHAC) “Laguna del Laja”, tratándose, en esencia, del mismo espacio geográfico, bajo una denominación diferente.

La cuenca del río Huaqui en Diuquín (Figura 4, línea azul) se origina a partir de la estación “Río Guaqui en Diuquín” y corresponde a una subcuenca del río Biobío. La cuenca consta de una superficie de 1005 km² (DGA, 2023) y nace en el Llano Central, a partir de afloramientos subterráneos en dirección este - oeste (DGA, 2004) y confluye en el río Biobío al sur de la Estación Diuquín.

Respecto a los aportes subterráneos, Arumí et al (2012) describe que, el sistema acuífero formado por las Arenas del Laja es drenado por cauces ubicados al poniente de la cuenca que se desarrollan en la unión entre los depósitos de arenas y la Cordillera de la Costa, como es el caso de los ríos Claro y Huaqui, especificando que este último drena directamente el límite sur de las Arenas del Laja.

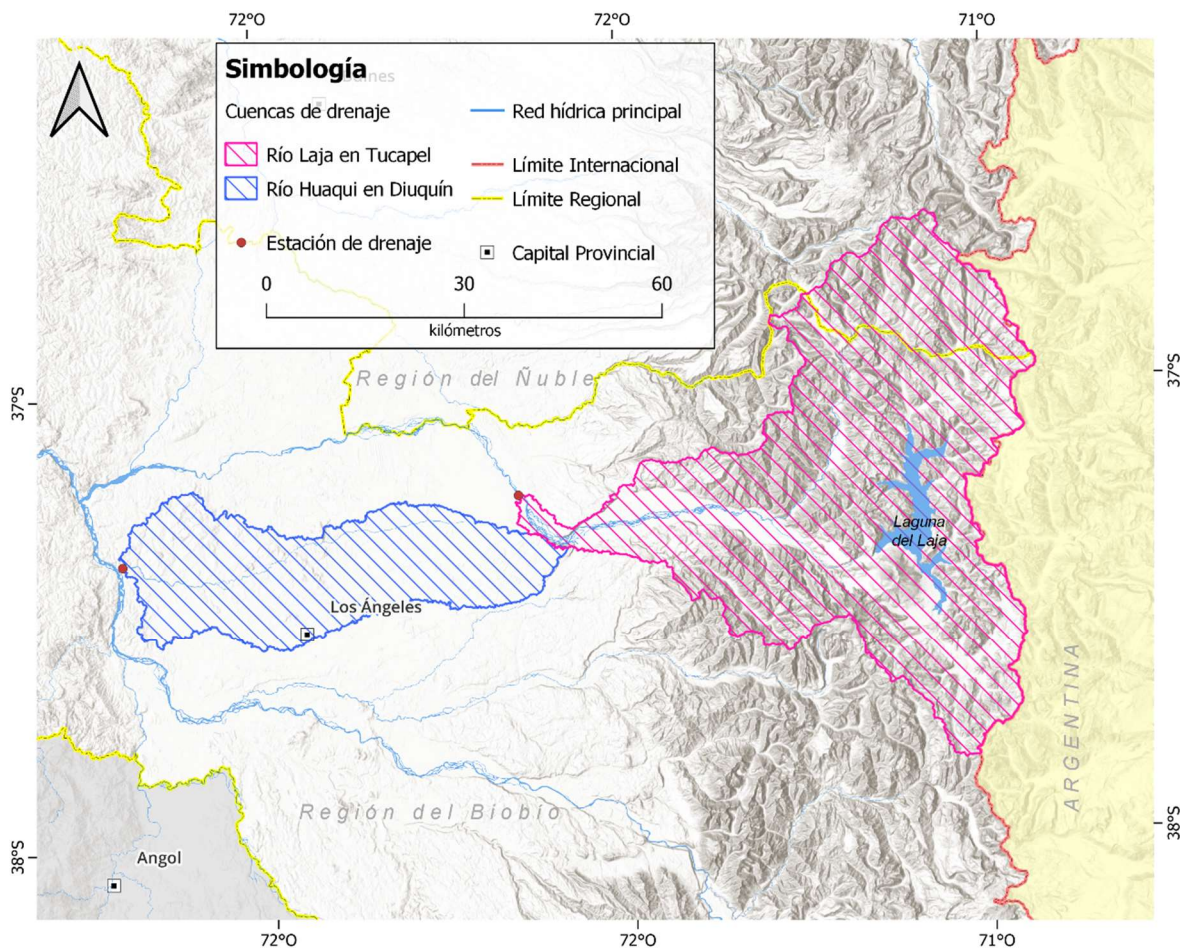


Figura 4. Área de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

4.1.1 Clima

Las cuencas de estudio presentan un clima clasificado según Köppen como **Csb**: Templado cálido con lluvias invernales (Beck et al., 2018). Este tipo de clima se caracteriza por tener temperaturas moderadas y lluvias que se concentran principalmente en el invierno. Además, en la zona alta de la Laguna del Laja posee un clima **Csc** mediterráneo subalpino, considerado clima de montaña. Según la clasificación de Köppen, entre 1 y 4 meses con promedio igual o mayor a 10 °C, es un clima subalpino, frío, situado en latitudes medias casi subpolares y encontrado en pequeñas áreas de los Andes australes, en Chile y Argentina. Está ubicado a una altura intermedia entre el clima mediterráneo Csb y el alpino ETH.

4.1.2 Hidrología

Las cuencas se encuentran monitoreadas por dos estaciones fluviométricas, pertenecientes a la red hidrométrica de la Dirección General de Aguas (DGA). La información relativa a estas estaciones se detalla en Tabla 6.

Tabla 6. Estaciones red hidrométrica DGA para las cuencas de estudio.

Código BNA	Nombre estación	Tipo medición	UTM Este	UTM Norte
8342001-1	Río Laja en Tucapel	Fluviométrica	235.685	5.869.259
8366001-5	Río Huaqui en Diuquín	Fluviométrica	176.794	5.857.933

Fuente: Elaborado a partir de Red Hidrométrica-Chile DGA. Datum WGS84 - Huso 19.

Estación fluviométrica río Laja en Tucapel: La característica pluvial de la cuenca se manifiesta en los importantes caudales registrados en invierno, principalmente debido a las precipitaciones orográficas producidas por la cordillera. Seguido de grandes caudales que se manifiestan en los meses de septiembre a diciembre como consecuencia de los deshielos Andinos. Tanto para años secos como húmedos, los caudales producidos en los meses de invierno por precipitaciones son mayores que los producidos en periodo de deshielos, por lo que la cuenca queda claramente definida como de régimen nivo pluvial. La escorrentía superficial en río Laja en Tucapel alcanza valores de 1.975 mm/año (DGA, 2004).

Estación fluviométrica río Huaqui en Diuquín: Huaqui es un río de origen en el Llano Central a partir de afloramientos subterráneos en dirección este – oeste, (DGA, 2004). Pertenece a la subcuenca de Río Bio-Bio entre Río Vergara y Río Laja, tiene un caudal casi constante que es originado del drenaje de las aguas subterráneas de las Arenas del Laja y que posee un alto valor de caudal por unidad de área (Arumí, et al, 2012). De régimen pluvial, el período de estiaje es común en toda la cuenca y ocurre en el trimestre enero-marzo, debido a las bajas precipitaciones y al uso intensivo de agua para riego. La escorrentía superficial en río Huaqui en Diuquín tiene valores de 815,9 mm/año (DGA, 2023).

4.1.3 Estudio previo en río Laja en Tucapel y río Huaqui en Diuquín

Dichas cuencas fueron estudiadas y analizadas en el centro de ciencias ambientales Eula (2023), “Estudio de disponibilidad hídrica para la cuenca del río Laja”. Se calibró y validó con el modelo SWAT para ambas cuencas, en sus respectivos periodos, cabe destacar que dichas simulaciones fueron para aguas superficiales y no se consideró el efecto nival de cuencas. La calibración entrega valores de NSE que indica que el modelo pudo reproducir de buena manera la variabilidad de la serie de caudales para el río Laja y satisfactoriamente para río Huaqui, mientras que el R^2 indica que los datos simulados por el modelo poseen una buena y satisfactoria capacidad predictiva respectivamente. En el caso del PBIAS, para ambas cuencas se sobrestima la escorrentía. El detalle de los indicadores de calibración se aprecia en Tabla 7 y los de validación en Tabla 8 respectivamente.

Tabla 7. Indicadores de desempeño del modelo SWAT para el periodo de calibración.

Cuenca	R²	NSE	PBIAS
Río Laja	0.78	0.78	2.4
Categoría	Good	Good	Very Good
Río Huaqui	0.65	0.57	5.7
Categoría	Satisfactory	Satisfactory	Good

Fuente: Adaptado de Eula (2023)

Tabla 8. Indicadores de desempeño del modelo SWAT para el periodo de validación.

Cuenca	R²	NSE	PBIAS
Río Laja	0.71	0.71	-3.5
Categoría	Satisfactory	Good	Very Good
Río Huaqui	0.70	0.71	4.4
Categoría	Satisfactory	Good	Very Good

Fuente: Adaptado de Eula (2023)

En las Figuras 5 y 6 se tiene el resultado de la validación de caudales mensuales en sus respectivos periodos de estudio. Se aprecia que el modelo al igual que para el periodo de calibración pudo reproducir satisfactoriamente los caudales base.

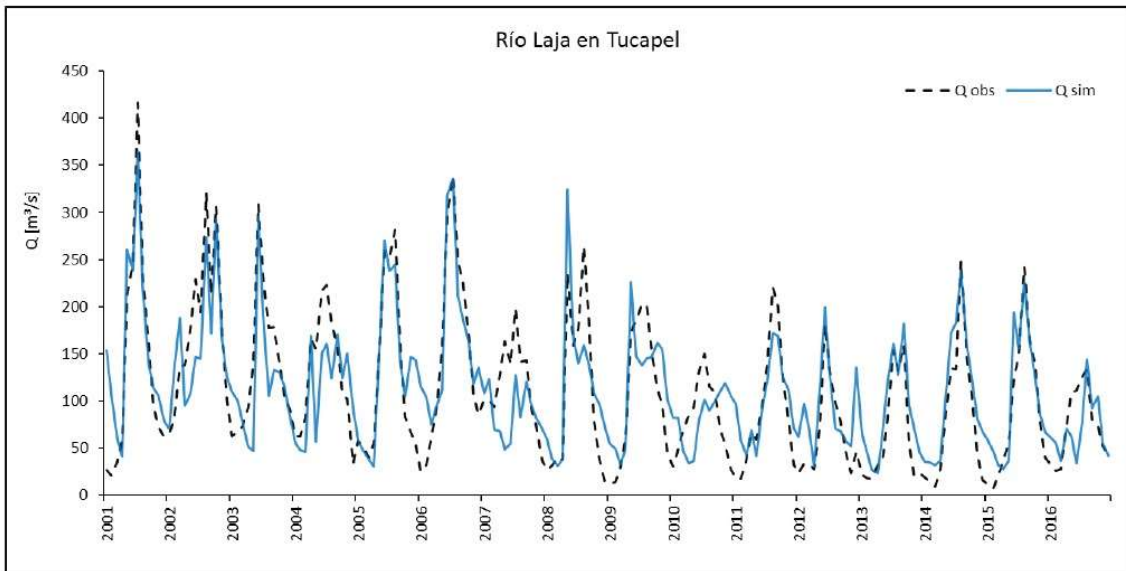


Figura 5. Validación de caudales mensuales en la cuenca del río Laja.

Fuente: Extraído de Eula (2023)

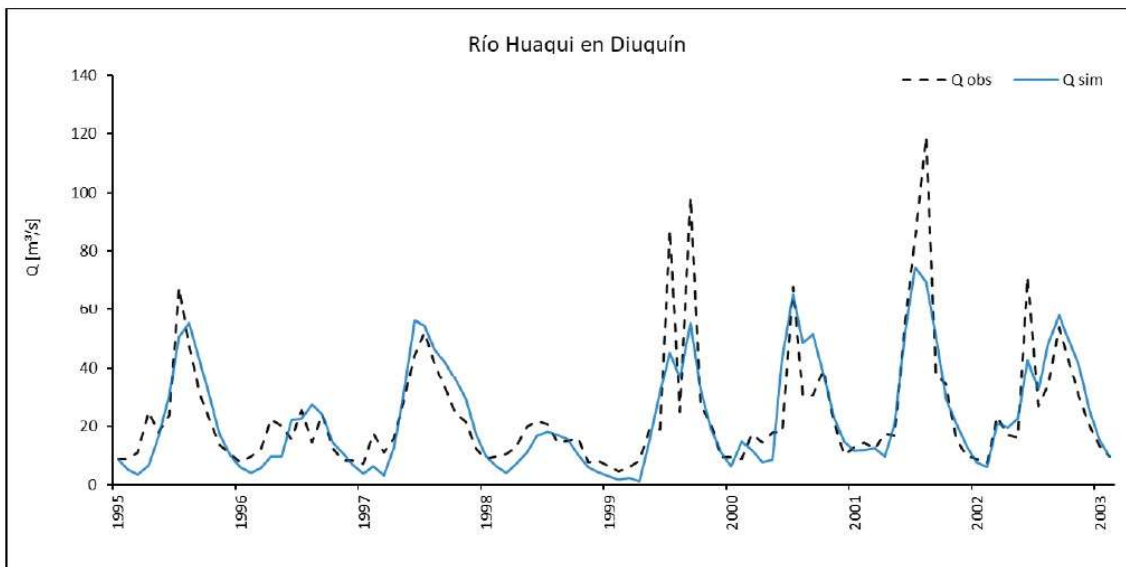


Figura 6. Validación de caudales mensuales en la cuenca del río Huaqui.

Fuente: Extraído de Eula (2023)

4.2 Comparar tendencias anuales presentes en el caudal observado para las cuencas de estudio y simulado por el modelo SWAT.

Se compararon las tendencias anuales presentes de caudal observado para ambas cuencas, para ello se obtuvo en primera instancia las tendencias de “Río Laja en Tucapel” y “Río Huaqui en Diuquín, respectivamente.

Para estimar las tendencias, se empleó el test de Mann-Kendall, un método no paramétrico (Kendall, 1975; Mann, 1945) recomendado para evaluar tendencias en series de datos ambientales (Yu et al., 2007). Esta prueba se basa fundamentalmente en comparar los valores de una serie temporal en orden secuencial (Silva, 2007).

En una serie temporal de observaciones x_1, x_2, x_n , Mann (1945) propone que para que la hipótesis nula (H_0) sea la verdadera los datos que componen la serie temporal deben ser variables aleatorias, independientes e igualmente distribuidas. Para que la hipótesis alternativa (H_1) sea la verdadera los datos de la serie temporal deben seguir una tendencia monótona. La ecuación (Ec.5) representa la estadística del test Mann-Kendall:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad (\text{Ec.5})$$

$$\text{Donde: } \text{sgn}(x) = \begin{cases} +1 & x > 0 \\ 0 & x = 0 \\ -1 & x < 0 \end{cases}$$

x_j representa los datos estimados de la secuencia de valores, n representa el tamaño de la serie temporal. Reciben valor 0 si $(x_j - x_k) = 0$; 1 si $(x_j - x_k) > 0$ y -1 si $(x_j - x_k) < 0$. La hipótesis H_0 sea verdadera, S debe presentar una distribución aproximadamente normal con media cero y variancia (Ec.6)

$$\text{Var}(S) = \frac{1}{18} [n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^q t_p(t_p-1)(2t_p+5)] \quad (\text{Ec.6})$$

El resultado de S indica la posible existencia de tendencias, desde que el valor de S sea significativamente diferente de cero. Siendo S diferente de cero, la hipótesis nula H_0 puede ser rechazada, y la hipótesis alternativa H_1 sería aceptada (Mann, 1945). El valor estadístico del test es representado por Z, se expresa en (Ec.7):

$$Z = \begin{cases} \frac{S - 1}{\sqrt{Var(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S + 1}{\sqrt{Var(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad (\text{Ec.7})$$

La existencia de una tendencia estadísticamente significativa es evaluada por el valor de Z, el valor positivo de Z indica cuando hay aumento en la tendencia y el valor negativo indica disminución en la tendencia. El valor Z es el parámetro de salida del test Mann-Kendall, cuya significancia fue evaluada utilizando el test Z con valores mayores o igual a $|1,96|$, el valor-P de significancia con valores entre 1% y 5% ($\alpha=0.05$) para verificar tendencia, y un valor menor o igual a 1% para tendencias fuertes (Miró Pérez et al., 2009). Siendo así, cuando el valor absoluto de Z sea igual que 0 la hipótesis nula al nivel de 5% será aceptada, sin tendencia. Siendo el resultado de Z igual o mayor que 1,96 representa valor positivo, lo que indica existencia de tendencia significativa creciente; siendo el resultado de Z menor que 1,96 demuestra tendencia no significativa creciente; cuando el resultado de Z es igual o menor que -1,96 indica valor negativo y tendencia significativa decreciente, y cuando Z presenta resultado mayor que -1,96 indica tendencia no significativa decreciente (Tabla 9, Alves et al., 2015).

Tabla 9. Descripción de la significancia del test Mann - Kendall

Significancia P = 0.05	Z
Sin tendencia	0
Tendencia significativa creciente	> + 1.96
Tendencia significativa decreciente	< + 1.96
Tendencia no significativa creciente	< + 1.96
Tendencia no significativa decreciente	> - 1.96

Fuente: Alves et al., 2015

Seguido, se obtuvo la magnitud de las tendencias, aplicando la pendiente de Sen (ec.8), el cual es una prueba no paramétrica que estima la pendiente o tasa lineal de cambio en una serie de tiempo (Sen, 1968).

$$Q_i = \frac{x_j - x_k}{j - k} \quad (\text{Ec.8})$$

Donde: $i = 1, \dots, n$; x_j y x_k son datos en los tiempos j y k ($j > k$, respectivamente). La mediana de los n -valores de Q_i es el estimador de pendiente de Sen.

Para determinar las tendencias se utilizaron los datos de caudal obtenidos en Eula (2023), "Estudio de disponibilidad hídrica para la cuenca del río Laja", para los mismos periodos, en el caso de la cuenca del río Laja en Tucapel del 2000 - 2015 y para el río Huaqui en Diuquín desde 1986 – 2001. Se analizaron tendencias en los caudales anuales máximos, medios y mínimos, en ambas cuencas.

Como herramienta se utilizó el programa estadístico RStudio® y es así, como mediante los test de Mann Kendall y la Pendiente de Sen se determinó la existencia y magnitud de las tendencias para el registro fluviométrico de las cuencas.

El diagrama de la Figura 7 presenta el flujo de la metodología para este objetivo específico.

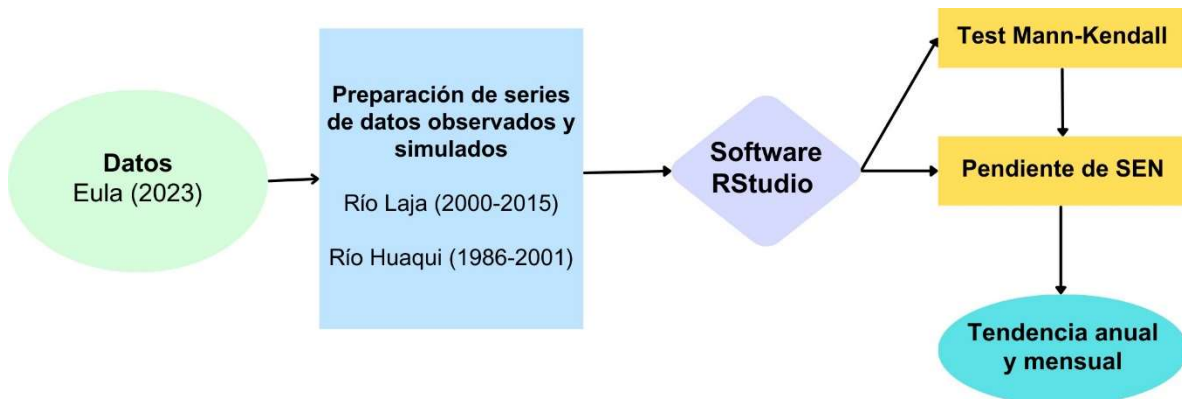


Figura 7. Metodología para obtener tendencias observadas y simuladas.

Con las tendencias obtenidas se realizó la comparación de estas en la escala temporal anual, observadas y simuladas por SWAT.

4.3 Comparar tendencias mensuales presentes en el caudal observado para las cuencas de estudio y simulado por el modelo SWAT.

Para este objetivo específico el procedimiento es similar al objetivo anterior, en el apartado 4.2. Para determinar las tendencias mensuales la metodología con la cual se obtuvo la tendencia de las cuencas se plantea en la Figura 7. Se estimó la tendencia para cada mes del año en las cuencas del río Laja en Tucapel del 2000 al 2015 y para el río Huaqui en Diuquín desde 1986 al 2001, para los datos recolectados del estudio realizado por Eula (2023).

Una vez obtenidas las magnitudes se realizó comparación de tendencias observadas y simuladas mensuales con SWAT en ambas cuencas.

5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Comparar tendencias anuales presentes en el caudal observado para las cuencas de estudio y simulado por el modelo SWAT.

- Río Laja en Tucapel

La Tabla 7 muestra los resultados obtenidos para la prueba de Mann-Kendall como la prueba de Sen, en la estación río Laja en Tucapel. Los resultados indican que hay una tendencia decreciente significativa en los datos de caudal anual en el periodo.

Tabla 10. Resultados de la Prueba de Mann-Kendall para Tendencias en Series Temporales de caudal máximo, medio y mínimo anual observado Río Laja en Tucapel (2000-2015).

Serie temporal	Test Z	Valor P	Tendencia	Pendiente de Sen (m^3s^{-1})
Máximo	-2,206	0,027	significativa	-8,568
Medio	-3,286	0,001	significativa	-5,306
Mínimo	-2,746	0,006	significativa	-2,386

En Figura 8 se aprecia el caudal con tendencia decreciente para la cuenca “Río Laja en Tucapel.

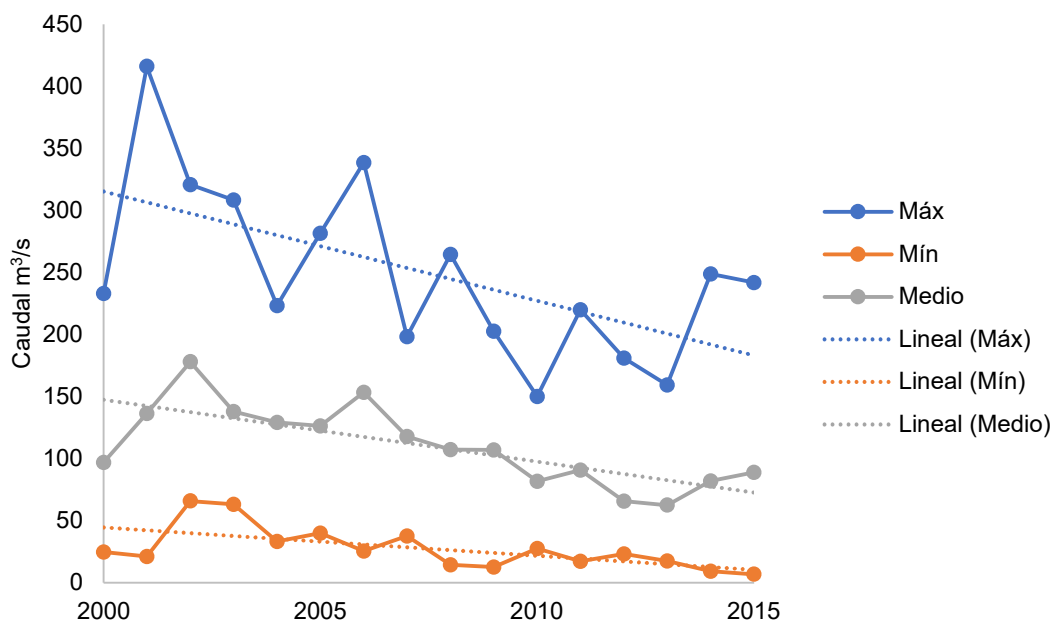


Figura 8. Caudal anual observado "Río Laja en Tucapel"

Por otro lado, se aplica la prueba de Mann-Kendall y de Sen para los datos simulados en la misma serie de tiempo (Tabla 11).

Tabla 11. Resultados de la Prueba de Mann-Kendall para Tendencias en Series Temporales de caudal máximo, medio y mínimo anual simulado Río Laja en Tucapel (2000-2015).

Serie temporal	Test Z	Valor P	Tendencia	Pendiente de Sen (m^3s^{-1})
Máximo	-2,026	0,042	significativa	-16,350
Medio	-1,575	0,115	no significativa	-
Mínimo	0,225	0,821	no significativa	-

Para los datos simulados de caudal solo logra reproducir tendencia en los máximos y ésta es decreciente, con una significancia de 0,05. Sin embargo, el modelo tiende

a sobre estimar la pendiente de la tendencia duplicando el valor de esta. En la Figura 9 se aprecia el caudal simulado y su tendencia negativa.

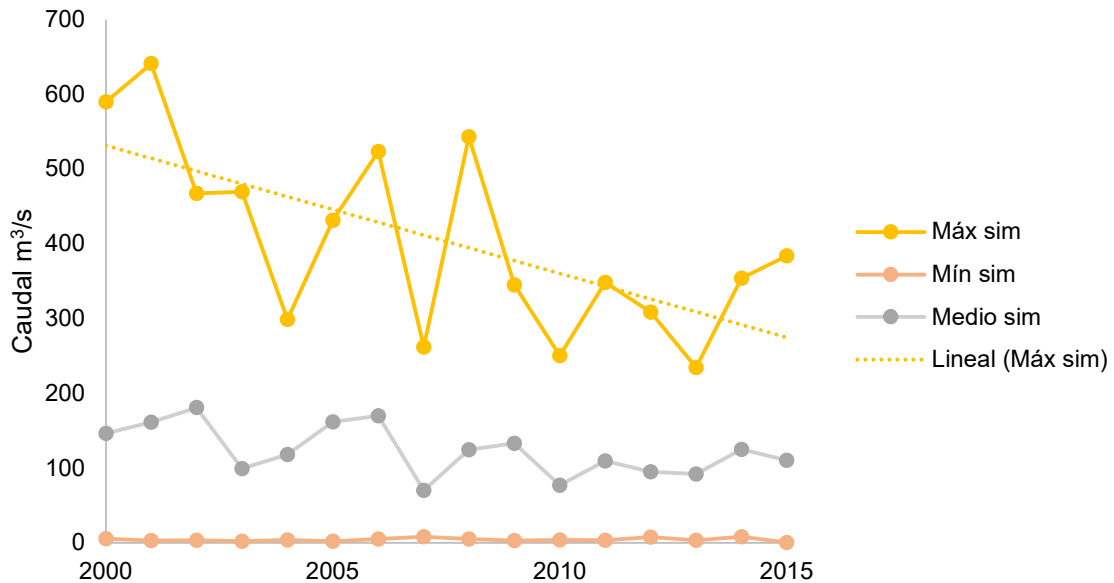


Figura 9. Caudal anual simulado "Río Laja en Tucapel"

El modelo SWAT ha sido capaz de replicar sólo una de las tendencias observadas, la de datos máximos simulados de caudal en la cuenca de estudio, en este caso el modelo presenta una pendiente dos veces mayor ($-16,350 \text{ m}^3/\text{s}$). La simulación en algunas oportunidades se pudo acercar a los valores máximos, pero fue más frecuente el no reproducir el máximo real medido. Como subestimo los máximos nos entrega una pendiente mayor. Para los valores medios y mínimos anuales, no fue capaz de replicar las tendencias presentes en el periodo de estudio.

- Río Huaqui en Diuquín

En el caso de Río Huaqui en Diuquín la tendencia anual observada y simulada se muestran en las Tablas 12 y 13 respectivamente.

Tabla 12. Resultados de la Prueba de Mann-Kendall para Tendencias en Series Temporales de caudal máximo, medio y mínimo anual observado Río Huaqui en Diuquín (1986-2001).

Serie temporal	Test Z	Valor P	Tendencia	Pendiente de Sen (m³s⁻¹)
Máx	-0,585	0,558	no significativa	-
Medio	-0,405	0,685	no significativa	-
Mín	-0,045	0,964	no significativa	-

Tabla 13. Resultados de la Prueba de Mann-Kendall para Tendencias en Series Temporales de caudal máximo, medio y mínimo anual simulado Río Huaqui en Diuquín (1986-2001).

Serie temporal	Test Z	Valor P	Tendencia	Pendiente de Sen (m³s⁻¹)
Máx	0,135	0,892	no significativa	-
Medio	0,135	0,892	no significativa	-
Mín	-0,405	0,685	no significativa	-

La prueba de Mann-Kendall no muestra tendencia en los caudales máximos, medios y mínimos anuales observados, lo cual es consistente en los caudales simulados. Sin embargo, esto no es evidencia suficiente para afirmar que el modelo puede replicar una tendencia. La Figura 10 presenta los caudales en Río Huaqui en Diuquín.

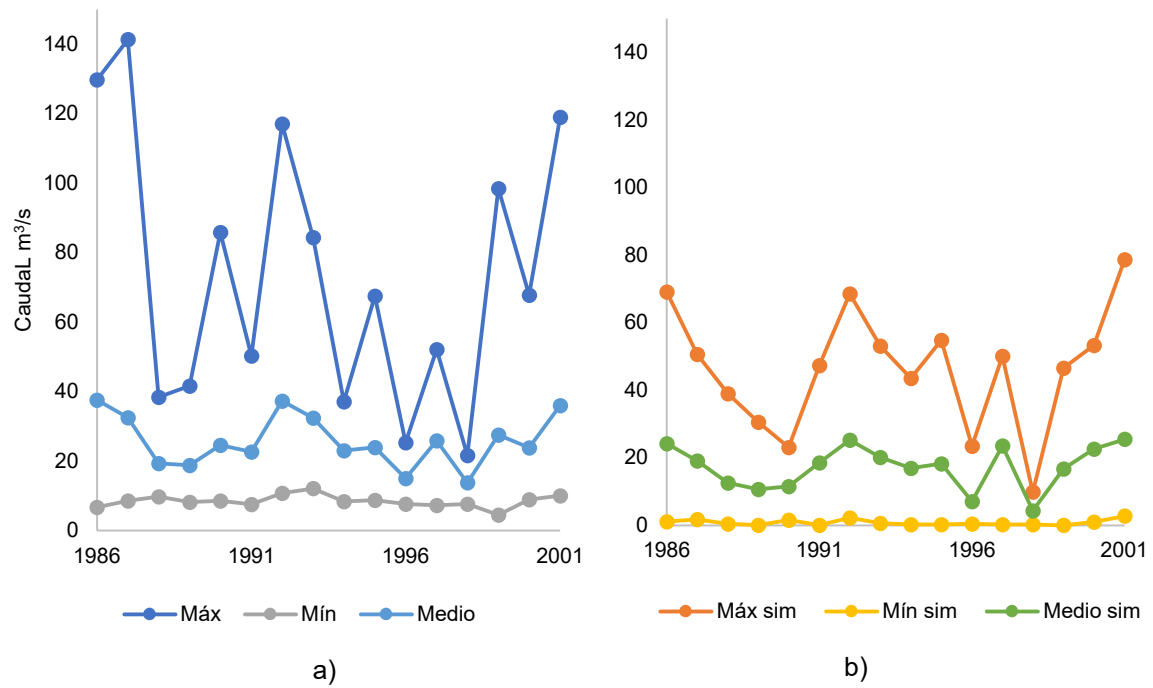


Figura 10. Caudal anual a) Observado b) Simulado en Rio Huaqui en Diquín.

5.2 Comparar tendencias mensuales presentes en el caudal observado para las cuencas de estudio y simulado por el modelo SWAT.

- Río Laja en Tucapel

La tabla 14 muestra el resultado de la aplicación de las pruebas de Mann-Kendall y pendiente SEN para los caudales simulados en cada mes del periodo de estudio.

Tabla 14. Resultados de la Prueba de Mann-Kendall para Tendencias en Series Temporales de caudales medios mensuales observados Río Laja en Tucapel (2000-2015).

Serie temporal	Test Z	Valor P	Tendencia	Pendiente de Sen (m^3s^{-1})
Enero	-2,836	0,004	significativa	-2,760
Febrero	-2,746	0,006	significativa	-3,760
Marzo	-2,116	0,034	significativa	-4,178
Abril	-1,755	0,079	no significativa	-
Mayo	-1,755	0,079	no significativa	-
Junio	-3,106	0,001	significativa	-10,890
Julio	-2,836	0,004	significativa	-7,815
Agosto	-0,585	0,558	no significativa	-
Septiembre	-1,395	0,162	no significativa	-
Octubre	-1,215	0,224	no significativa	-
Noviembre	-1,755	0,079	no significativa	-
Diciembre	-2,026	0,042	significativa	-2,719

Luego de aplicada la prueba de Mann-Kendall, gracias a la prueba de Sen se obtuvieron las magnitudes de dicha tendencia y los resultados observados de

caudal medio mensual de “Rio Laja en Tucapel”, reveló una tendencia significativa decreciente en los datos observados para los meses de enero, febrero, marzo, junio, julio y diciembre. Estos resultados sugieren que hay una relación estacional en las tendencias, con patrones distintivos durante los meses de verano de diciembre a marzo (Figura 11) y de invierno, junio y julio (Figura 12), lo cual puede estar ligado a la disminución considerable de las precipitaciones en la zona centro del país.

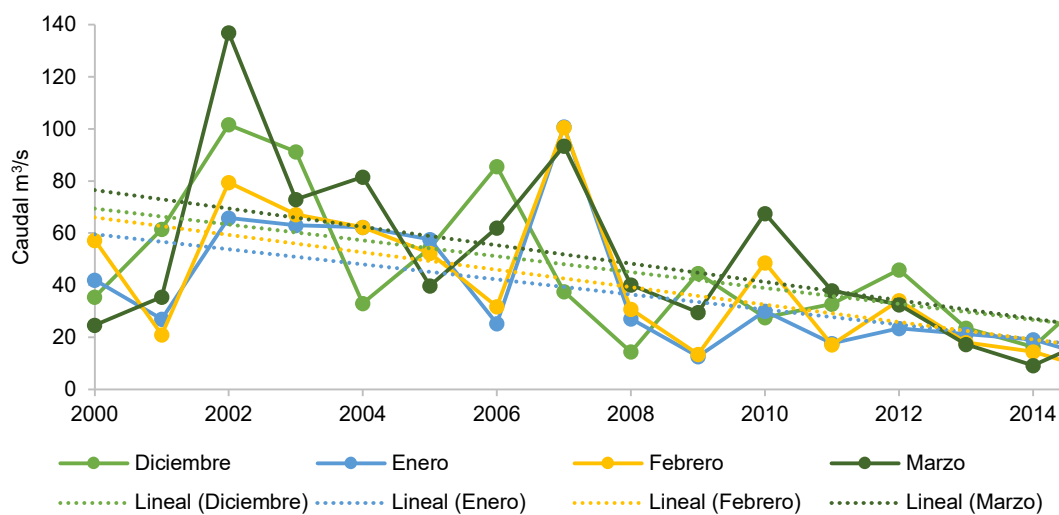


Figura 11. Caudal medio mensual observado dic-ene-feb-mar Rio Laja en Tucapel.

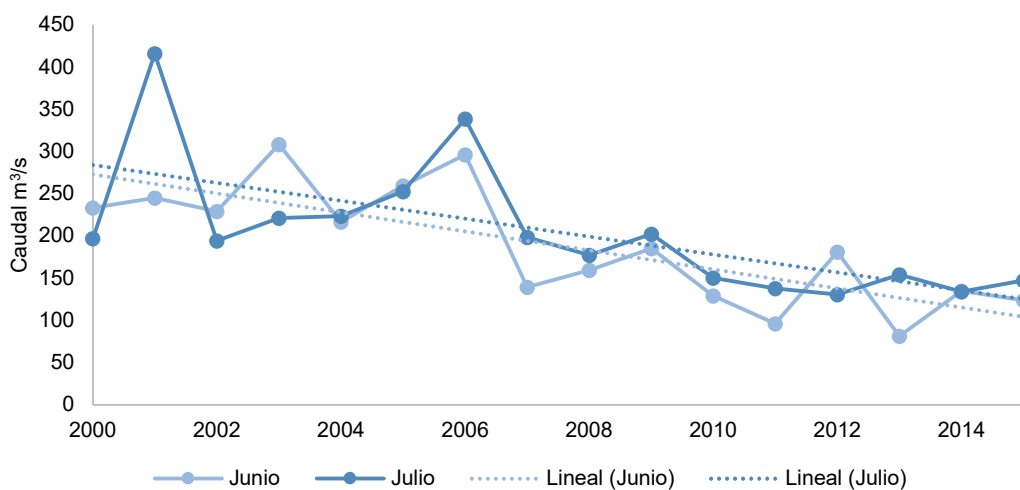


Figura 12. Caudal medio mensual observado junio y-julio Rio Laja en Tucapel.

En el caso de la serie de datos simulados para la misma cuenca no se presenta tendencia en ninguno de los meses (Tabla 15). En contraste con las tendencias significativas observadas en los datos de caudal del río Laja en Tucapel para los meses de enero, febrero, marzo, junio, julio y diciembre, las series simuladas no mostraron tendencias significativas durante el mismo período. Estos resultados indican una discrepancia entre las tendencias observadas y las simuladas.

En Figura 13 se presenta los caudales observado y simulado medio mensual en la cuenca y se puede apreciar que el modelo en los meses de diciembre a marzo sobreestima el caudal medio mensual, en cambio en los meses de junio y julio lo subestima.

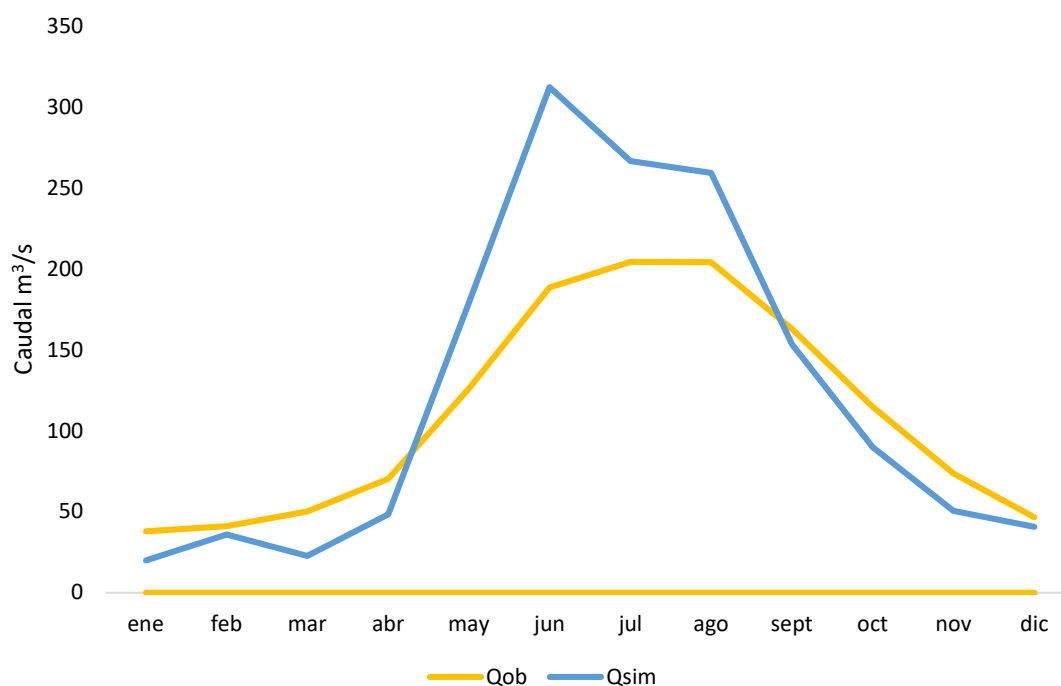


Figura 13. Caudal medio mensual observado y simulado Río Laja en Tucapel (2000-2015).

Tabla 15. Resultados de la Prueba de Mann-Kendall para Tendencias en Series Temporales de caudales medios mensuales simulados Río Laja en Tucapel (2000-2015).

Serie temporal	Test Z	Valor P	Tendencia	Pendiente de Sen (m³s⁻¹)
Enero	-0,045	0,964	no significativa	-
Febrero	-0,045	0,964	no significativa	-
Marzo	-0,585	0,558	no significativa	-
Abril	-0,495	0,620	no significativa	-
Mayo	-0,225	0,821	no significativa	-
Junio	-0,855	0,392	no significativa	-
Julio	-0,405	0,685	no significativa	-
Agosto	0,135	0,892	no significativa	-
Septiembre	-0,135	0,892	no significativa	-
Octubre	0,225	0,821	no significativa	-
Noviembre	-1,485	0,137	no significativa	-
Diciembre	-0,585	0,558	no significativa	-

- Río Huaqui en Diquín

Para la cuenca Río Huaqui en Diquín la tendencia mensual observada y simulada se evidencia en las Tablas 13 y 14 respectivamente.

Tabla 16. Resultados de la Prueba de Mann-Kendall para Tendencias en Series Temporales de caudales medios mensuales observados Río Huaqui en Diquín (1986-2001).

Serie temporal	Test Z	Valor P	Tendencia	Pendiente de Sen (m^3s^{-1})
Enero	0,045	0,964	no significativa	-
Febrero	0,180	0,856	no significativa	-
Marzo	-2,116	0,034	significativa	-0,533
Abril	-2,476	0,013	significativa	-1,314
Mayo	-1,035	0,300	no significativa	-
Junio	0,045	0,964	no significativa	-
Julio	1,845	0,064	no significativa	-
Agosto	-1,845	0,064	no significativa	-
Septiembre	0,405	0,685	no significativa	-
Octubre	1,665	0,095	no significativa	-
Noviembre	0,315	0,752	no significativa	-
Diciembre	-1,215	0,224	no significativa	-

Solo para los meses de marzo y abril se presenta tendencia significativa (Figura 13) en la serie de datos reales mensuales de la cuenca.

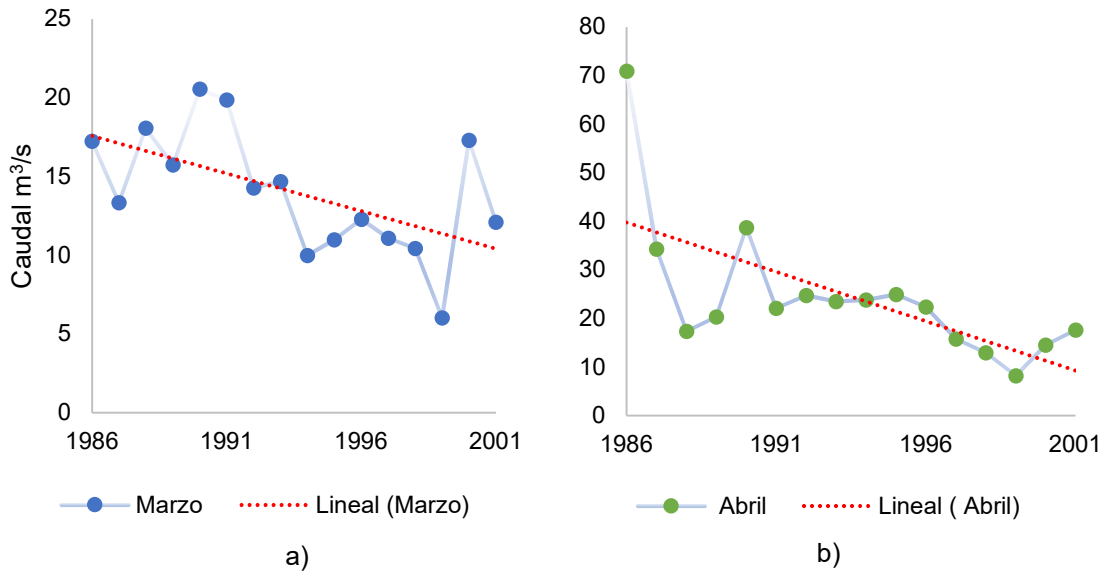


Figura 14. Caudal a) Marzo y b) Abril con tendencia en Rio Huaqui en Diquin.

En cambio, en los datos simulados (Tabla 17), no se encontraron tendencias significativas. La falta de tendencias significativas en las series simuladas sugiere que el modelo SWAT puede que no sea capaz de replicar las tendencias presentes en los datos observados. Esta discrepancia podría deberse a limitaciones en la configuración del modelo, o a factores no considerados en las simulaciones.

Tabla 17. Resultados de la Prueba de Mann-Kendall para Tendencias en Series Temporales de caudales medios mensuales simulados Río Huaqui en Diuquín (1986-2001).

Serie temporal	Test Z	Valor P	Tendencia	Pendiente de Sen (m³s⁻¹)
Enero	-0,945	0,344	no significativa	-
Febrero	0,315	0,752	no significativa	-
Marzo	-0,135	0,892	no significativa	-
Abril	-0,045	0,964	no significativa	-
Mayo	-0,765	0,444	no significativa	-
Junio	0,225	0,821	no significativa	-
Julio	0,135	0,892	no significativa	-
Agosto	0,405	0,685	no significativa	-
Septiembre	0,765	0,444	no significativa	-
Octubre	0,855	0,392	no significativa	-
Noviembre	-0,135	0,892	no significativa	-
Diciembre	-0,495	0,620	no significativa	-

6 CONCLUSIONES

Mediante la prueba de Mann-Kendall y la Pendiente de Sen se logró detectar una tendencia decreciente en los caudales máximos, mínimos y medio mensuales observados para la cuenca del río Laja en Tucapel. En el caso de los datos simulados el modelo sólo pudo replicar la tendencia para los valores máximos anuales de caudal, pero con una magnitud dos veces mayor que la observada. Esta tendencia en los datos simulados logra ser un falso positivo, ya que el modelo SWAT no pudo replicar los caudales medios y mínimos registrados en esta cuenca. En el caso de la cuenca del río Huaqui en Diuquín no se registraron tendencias observadas y el modelo fue consistente en no replicar una tendencia.

Para la serie de datos mensuales en cambio la tendencia se comportó estacionalmente y de forma decreciente en la cuenca del Río Laja en Tucapel, para los meses de enero, febrero, marzo, junio, julio y diciembre. Estas tendencias sugieren una disminución en la disponibilidad de agua durante los meses críticos de verano e invierno, lo cual puede estar relacionado con la disminución de las precipitaciones en la región. En contraste, las series simuladas por el modelo SWAT no mostraron tendencias significativas durante el mismo período. Esta discrepancia indica que el modelo SWAT no pudo replicar adecuadamente las tendencias estacionales observadas. En la cuenca del río Huaqui en Diuquín, solo se encontraron tendencias decrecientes significativas en los caudales medios mensuales observados para los meses de marzo y abril. La ausencia de tendencias significativas en los datos simulados mensuales sugiere que el modelo SWAT no es capaz de replicar las tendencias presentes en los datos observados debido a que no considera en la simulación los eventos extremos y la variabilidad climática.

Es importante tener en cuenta que los datos observados y simulados pueden diferir debido a diversas razones, como la calidad de los datos, la precisión del modelo hidrológico, la variabilidad climática, cambios en los usos de suelo, actividades antrópicas, entre otros. Lo anterior afecta los resultados de la simulación ya que, al

no considerar factores climáticos y geológicos específicos, estos afectan las tendencias estacionales, como la influencia de la nieve y el hielo, por ejemplo.

El presente estudio ha demostrado que, aunque el modelo SWAT logro replicar tendencia en los caudales máximos de la cuenca del Rio Laja en Tucapel, este fue un falso positivo, ya que el modelo no esta reproduciendo una tendencia como tal, más bien, es un error que arrastra de la simulación al no poder reproducir los caudales máximos. Además, no consiguió replicar tendencias observadas en las cuencas de estudio, ya sea para los caudales medios y mínimos anuales, así como para las tendencias mensuales, por sobre todo en la cuenca de Huaqui en Diuquín. Esto indica que para el área de estudio el modelo hidrológico SWAT no fue capaz de reproducir una tendencia en los registros de caudal real.

La herramienta de tendencia en los caudales hidrológicos contribuye a predecir futuros patrones de caudal, lo que es fundamental para la adecuada gestión del recurso hídrico.

7 REFERENCIAS

Alvarez-Garreton, C., Mendoza, P. A., Boisier, J. P., Addor, N., Galleguillos, M., Zambrano-Bigiarini, M., Lara, A., Puelma, C., Cortes, G., Garreaud, R., McPhee, J., and Ayala, A. (2018). The CAMELS-CL dataset: catchment attributes and meteorology for large sample studies – Chile dataset, Hydrology and Earth System Sciences. <https://doi.org/10.5194/hess-22-5817-2018>

Alves, T. L. B., Azevedo, P. V. & Farias, A. A. (2015). Comportamiento de las precipitaciones y su relación con el relieve en las microregiones de Cariri Oriental y Occidental del estado da Paraíba. Revista Brasileira de Geografia Física, 8(6), 1601-1614

Alvez, A., Aitken, D.; Rivera, D.; Vergara, M.; McIntyre, N.; Concha, F. 2020. At the crossroads: can desalination be a suitable public policy solution to address water scarcity in Chile's mining zones?. Journal Of Environmental Management, 258, 110039

Arumí, J., Rivera, D., Muñoz, E., & Billib, M. (2012). Interacciones entre el agua superficial y subterránea en la región del Bío Bío de Chile. Obras y proyectos, (12), 4-13. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-28132012000200001>

Banco Mundial. (2021). “El Agua en Chile: Elemento de Desarrollo y Resiliencia” Banco Mundial, Washington, DC.

Beck, H.E., Zimmermann, N. E., McVicar, T. R., Vergopolan, N., Berg, A., & Wood, E. F. (2018). Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. Nature Scientific Data. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.214>

Beven, K. J., (2011). Rainfall-runoff modelling: the primer / Keith Beven. – 2nd ed. ISBN 978-0-470-71459-1.

Boisier, J. P., Alvarez-Garreton, C., Cordero, R. R., Damiani, A., Gallardo, L., Garreaud, R. D., Lambert, F., Ramallo, C., Rojas, M., Rondanelli, R., & Chadwick, O. (2018). Anthropogenic drying in central-southern Chile evidenced by long-term

observations and climate model simulations. *Elementa: Science of the Anthropocene*, 6(1), 74. <https://doi.org/10.1525/elementa.328>

Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia. (2015). Informe a la Nación. La Megasequía 2010-2015: Una lección para el futuro. Chile.

Centro de Estudios Ambientales Eula (2023). Estudio de disponibilidad hídrica para la cuenca del río Laja. Universidad de Concepción.

Christensen, JH, Krishna Kumar, K, Aldrian, E, An, S-I, Cavalcanti, IFA, de Castro, M, Dong, W, Goswami, P, Hall, A, Kanyanga, JK, Kitoh, A, Kossin, J, Lau, N-C, Renwick, J, Stephenson, DB, Xie, S-P and Zhou, T. 2013. Climate Phenomena and their Relevance for Future Regional Climate Change. In: *Climate Change (2013): The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Stocker, TF, Qin, D, Plattner, GK, Tignor, M, Allen, SK, Boschung, J, Nauels, A, Xia, Y, Bex, V and Midgley, PM (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Collins, M, Knutti, R, Arblaster, J, Dufresne, JL, Fichefet, F, Friedlingstein, P, Gao, X, Gutowski, WJ, Johns, T, Krinner, G, Shongwe, M, Tebaldi, C, Weaver, AJ and Wehner, M. 2013. Long-term climate change: Projections, commitments and irreversibility. In: *Climate Change (2013): The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Stocker, TF, Qin, D, Plattner, GK, Tignor, M, Allen, SK, Boschung, J, Nauels, A, Xia, Y, Bex, V and Midgley, PM (eds.), 1029–1136. Cambridge Univ. Press, Cambridge, U. K., and New York.

Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), (2015). La incertidumbre de los recursos hídricos y sus riesgos frente al cambio climático: Herramientas para los tomadores de decisiones de los sectores público y privado. Recuperado de:

https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/38274/S1500538_es.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Dirección General de Aguas (DGA). (2004). Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de Calidad. Cuenca del río Bio Bio.

Dirección General de Aguas (DGA). (2019), Desarrollo de Herramienta para el Análisis de Gestión en el Marco del Plan Nacional de Recursos Hídricos, SIT N° 445, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile, Realizado por: DICTUC S.A. & SEI.

Dirección General de Aguas (DGA). (2020) Boletín DGA marzo 2020.

Dirección General de Aguas (DGA). (2015). Atlas del Agua: Chile 2016. Santiago, Chile.

Dirección General de Aguas (DGA). (2023). Mapoteca Digital. Recuperado de: <https://dga.mop.gob.cl/estudiospublicaciones/mapoteca/Paginas/Mapoteca-Digital.aspx>

Garreaud, R., Alvarez-Garreton, C., Barichivich, J., Boisier, J.P., Christie, D., Galleguillos, M., LeQuesne, C., McPhee, J., Zambrano-Bigiarini, M., (2017). The 2010 - 2015 mega drought in Central Chile: Impacts on regional hydroclimate and vegetation. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* 1–37.

Gayathri K. Devia, B.P. Ganasri, G.S. Dwarakish, A Review on Hydrological Models, *Aquatic Procedia*, Volume 4. (2015). Pages 1001-1007. ISSN 2214-241X. <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.126>.

González, M. E., S. Gómez-González, A. Lara, R. Garreaud, and I. Díaz-Hormazábal. 2018. The 2010–2015 Megadrought and its influence on the fire regime in central and south-central Chile. *Ecosphere* 9(8): e02300. 10.1002/ecs2.2300

Gupta, H. V., Sorooshian, S., & Yapo, P. O. (1999). Status of Automatic Calibration for Hydrologic Models: Comparison with Multilevel Expert Calibration. *Journal of*

Hydrologic Engineering, 4(2), 135-143. [https://doi.org/doi:10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(1999\)4:2\(135\)](https://doi.org/doi:10.1061/(ASCE)1084-0699(1999)4:2(135))

He, J and Soden, BJ. 2017. A re-examination of the projected subtropical precipitation decline. *Nature Climate Change* 7(1): 53–57. DOI: <https://doi.org/10.1038/nclimate3157>

Kendall, M. G. (1975). Rank correlation methods. Charles Griffin. London. p.120.

Malik, W., Jiménez-Aguirre, M.-T., & Dechmi, F. (2020). Coupled DSSAT-SWAT models to reduce off-site N pollution in Mediterranean irrigated watershed. *Science of The Total Environment*, 745, 141000. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141000>

Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica* 13, 245-259.

Miró Pérez, J., Estrela Navarro, M. J., Pastor Guzman, F., & Millán, M. (2009). Análisis comparativo de tendencias en la precipitación, por distintos inputs, entre los dominios hidrológicos del Segura y del Júcar (1958-2008). *Investigaciones Geográficas*, 49(49), 129–157.

Moradkhani, H., Sorooshian, S. (2009). General Review of Rainfall-Runoff Modeling: Model Calibration, Data Assimilation, and Uncertainty Analysis. In: Sorooshian, S., Hsu, KL., Coppola, E., Tomassetti, B., Verdecchia, M., Visconti, G. (eds) *Hydrological Modelling and the Water Cycle*. Water Science and Technology Library, vol 63. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-77843-1_1

Moriasi, D. N., Gitau, M. W., Pai, N., & Daggupati, P. (2015). Hydrologic and Water Quality Models: Performance Measures and Evaluation Criteria. *Transactions of the ASABE (American Society of Agricultural and Biological Engineers)*, 58(6), 1763-1785. <https://doi.org/10.13031/trans.58.10715>

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>

Munar-Samboní, A. M., Méndez-Pedroza, N. M., & Valbuena-Calderón, O. E. (2021). Modelación hidrodinámica y de calidad del agua en un ecosistema estuarino urbano con incidencia mareográfica y vertimientos de aguas residuales. *Entramado*, 17(1), 302-320. Epub May 05, 2021. <https://doi.org/10.18041/1900-3803/entramado.1.7285>

Ochoa-Tocachi, B. F., Cuadros-Adriazola, J., Arapa Guzman, E., Aste Cannock, N., Ochoa-Tocachi, E., Bonnesoeur, Bonnesoeur, V. (2022). Guía de modelación hidrológica para la infraestructura natural. *Forest Trends*, Lima, Perú.

Pizarro, R. (2021). “El valor del Agua en la Agenda 2030: Realidad y Desafíos” en el marco del Foro Político de alto nivel sobre Desarrollo Sostenible. Universidad de Talca, Chile.

Polade, SD, Gershunov, A, Cayan, DR, Dettinger, MD and Pierce, DW. 2017. Precipitation in a warming world: Assessing projected hydro-climate changes in California and other Mediterranean climate regions. *Scientific Reports* 7(1): 10783. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-017-11285-y>

Sen, P.K., 1968. Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. *J. Am. Stat. Assoc.* 63, 1379-1389.

Servicio de Evaluación Ambiental. (SEA) (2023). Guía metodológica para la consideración del cambio climático en el SEIA. Primera edición, Santiago, Chile.

Silva, D. G. (2007). Evolución Paleoambiental de los Depósitos de Tanques en Fazenda Nova, Municipio de Brejo de Madre de Dios - Pernambuco (Tesis de Maestría). Recife: UFPE.

Stehr, A. (2008). Análisis del comportamiento hidrológico y disponibilidad de agua bajo escenarios de cambio climático para dos subcuencas del río Biobío incorporando el impacto del aporte nival en la zona cordillerana. Universidad de Concepción, Facultad de ciencias Ambientales.

Stehr, A., Debels, P., Arumi, J., Alcayaga, H., & Romero, F. (2010). Modelación de la respuesta hidrológica al cambio climático: experiencias de dos cuencas de la zona centro-sur de Chile. *Tecnología y Ciencias del Agua, antes Ingeniería hidráulica en México*.

UNESCO (2018) *El Atlas de Glaciares y Aguas Andinos: el impacto del retroceso de los glaciares sobre los recursos hídricos*.

UNESCO (2020) *The United Nations World Water Development Report 2020: Water and Climate Change*.

Uribe, N. (2010). SWAT (Soil and Water Assessment Tool): Conceptos básicos y guía rápida para el usuario. Recuperado de: <https://swat.tamu.edu/media/46967/swat2005-tutorial-spanish.pdf>

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.

Viale, M and Garreaud, RD. 2015. Orographic effects of the subtropical and extratropical Andes on upwind precipitating clouds. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 120(10): 4962–4974. DOI: <https://doi.org/10.1002/2014JD023014>

Yu, J.-Y., & Kao, H.-Y. (2007). Decadal changes of El Niño persistence barrier in SST and ocean heat content indices: 1958-2001. *Geophysical Research Letters*.

8 ANEXOS

8.1 Anexo A

Criterios de evaluación de rendimiento final para medidas de rendimiento estadístico recomendadas para modelos a escala de cuenca y campo.

Measure	Output Response	Temporal Scale ^[a]	Performance Evaluation Criteria			
			Very Good	Good	Satisfactory	Not Satisfactory
Watershed scale						
R ²	Flow ^[b]	D-M-A	R ² > 0.85	0.75 < R ² ≤ 0.85	0.60 < R ² ≤ 0.75	R ² ≤ 0.60
	Sediment/P ^[c]	M	R ² > 0.80	0.65 < R ² ≤ 0.80	0.40 < R ² ≤ 0.65	R ² ≤ 0.40
	N	M	R ² > 0.70	0.60 < R ² ≤ 0.70	0.30 < R ² ≤ 0.60	R ² ≤ 0.30
NSE	Flow	D-M-A	NSE > 0.80	0.70 < NSE ≤ 0.80	0.50 < NSE ≤ 0.70	NSE ≤ 0.50
	Sediment	M	NSE > 0.80	0.70 < NSE ≤ 0.80	0.45 < NSE ≤ 0.70	NSE ≤ 0.45
	N/P ^[c]	M	NSE > 0.65	0.50 < NSE ≤ 0.65	0.35 < NSE ≤ 0.50	NSE ≤ 0.35
PBIAS (%)	Flow	D-M-A	PBIAS < ±5	±5 ≤ PBIAS < ±10	±10 ≤ PBIAS < ±15	PBIAS ≥ ±15
	Sediment	D-M-A	PBIAS < ±10	±10 ≤ PBIAS < ±15	±15 ≤ PBIAS < ±20	PBIAS ≥ ±20
	N/P ^[c]	D-M-A	PBIAS < ±15	±15 ≤ PBIAS < ±20	±20 ≤ PBIAS < ±30	PBIAS ≥ ±30
Field scale						
R ²	Flow	M	R ² > 0.85	0.75 < R ² ≤ 0.85	0.70 < R ² < 0.75	R ² ≤ 0.70
<i>d</i>	Flow	M	<i>d</i> > 0.90	0.85 < <i>d</i> ≤ 0.90	0.75 < <i>d</i> < 0.85	<i>d</i> ≤ 0.75

Fuente: Moriasi et al., 2015.

[a] D, M y A denotan escalas temporales diarias, mensuales y anuales, respectivamente.

[b] Incluye el flujo de arroyos, la escorrentía superficial, el flujo base y el flujo de tejas, según corresponda, para modelos a escala de cuenca y campo.

[c] Donde no hubo diferencias, los PEC se agruparon para las respuestas de salida.