

Temporal Variation Analysis of Water Resources in the Chol-Chol River Watershed, Chile under Climate Change Scenarios, 2025–2060

Barreto, Wilmer¹; Icarte, Victor¹; Sáez, Ramon; Picon, Ricardo¹; Torres-Hoyer, Jesus¹; Torres-Hoyer, Roberto¹
1 Depto de Obras Civiles y Geología, Fac. de Ingeniería, Universidad Católica de Temuco, Chile

Abstract– *This study analyzes the temporal variation of water resources in the Chol-Chol River basin, located in the Araucanía Region of Chile, under climate change scenarios for the period 2025-2060, using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) hydrological model. Hydrological processes were simulated under the RCP 8.5 scenario, which represents a future scenario with high greenhouse gas emissions. The results indicate a generalized decrease in water availability, with prolonged periods of drought interspersed with intense rainfall events. Areas vulnerable to drought (Lumaco and Purén) and flooding (Chol-Chol, Galvarino, and Traiguén) were identified. These findings have significant implications for water management, agriculture, and human supply in the region.*

Keywords--: *Climate change, watershed, water availability, drought, flooding.*

Análisis de la Variación Temporal del Recurso Hídrico en la Cuenca del Río Chol-Chol bajo Escenarios de Cambio Climático para el periodo 2025-2060

Barreto, Wilmer¹; Icarte, Victor¹; Sáez, Ramon; Picon, Ricardo¹; Torres-Hoyer, Jesus¹; Torres-Hoyer, Roberto¹
1 Depto de Obras Civiles y Geología, Fac. de Ingeniería, Universidad Católica de Temuco, Chile

Resumen– Este estudio analiza la variación temporal del recurso hídrico en la cuenca del río Chol-Chol, ubicada en la Región de la Araucanía, Chile, bajo escenarios de cambio climático para el periodo 2025-2060, utilizando el modelo hidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool), se simuló los procesos hidrológicos bajo el escenario RCP 8.5, que representa un futuro con altas emisiones de gases de efecto invernadero. Los resultados indican una disminución generalizada en la disponibilidad de agua, con periodos prolongados de sequía intercalados con eventos de lluvias intensas. Se identificaron zonas vulnerables a sequías (Lumaco y Purén) y a inundaciones (Chol-Chol, Galvarino y Traiguén). Estos hallazgos tienen implicaciones significativas para la gestión del agua, la agricultura y el abastecimiento humano en la región.

Palabras clave–: Cambio climático, cuenca hidrográfica, Disponibilidad hídrica, Sequía, Inundación.

I. INTRODUCCIÓN

La gestión sostenible de los recursos hídricos enfrenta desafíos complejos en el contexto actual de variabilidad climática global. Estudios recientes demuestran que los eventos como sequías e inundaciones afectan gravemente a los ecosistemas y a las actividades humanas [1]. Los efectos combinados del cambio climático, el crecimiento poblacional, y la degradación ambiental han intensificado la presión sobre los recursos hídricos, especialmente en regiones vulnerables.

En Chile, la zona centro-sur enfrenta un panorama preocupante debido a una sequía prolongada que se extiende desde 2010, afectando gravemente la disponibilidad hídrica (Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia [CR2], 2020). En particular, la región de la Araucanía ha registrado una disminución significativa en las precipitaciones, lo que ha aumentado la frecuencia de sequías y puesto en riesgo a las comunidades rurales, cuya subsistencia depende principalmente de los recursos hídricos locales [2,3]. Paralelamente, las inundaciones, aunque menos frecuentes, también representan una amenaza, ya que pueden provocar desastres de gran magnitud en zonas rurales y urbanas [4].

II. METODOLOGÍA

A. Área de estudio

Este estudio se llevará a cabo en la cuenca del río Chol-Chol, una subcuenca del río Imperial. Con una superficie de 5,047 km², se ubica en la Región de la Araucanía, Chile. Abarca las comunas de Cholchol, Galvarino, Lumaco, Traiguén, Perquenco, Victoria y Purén, además de parte de Lautaro, Los Sauces y Ercilla, siendo una de las cuencas más importantes de la región y del país (observar Figura 1)[5].

La cuenca del río Chol-Chol incluye a sus principales afluentes: los ríos Purén, Lumaco, Traiguén, Quino y Quillén. El territorio de Chol-Chol se distingue por la presencia de planicies, lomajes y cerros que, en general, no superan los 300 metros sobre el nivel del mar.

En la cuenca se encuentran los suelos trumaos, los cuales están asociados a una fuerte topografía de lomajes y cerros. Estos generalmente son suelos profundos, con texturas medias a moderadamente gruesas en todo el perfil. Poseen un elevado contenido de materia orgánica (8-25%). Estos suelos se sitúan a nivel regional, principalmente en la depresión intermedia [5].

También se presentan suelos Rojo Arcilloso, que son por lo general suelos profundos, los que derivan de materiales volcánicos diversos incluyendo cenizas volcánicas. La topografía es de plano ondulado a lomajes. Poseen una gran cantidad de arcilla cristalina tipo caolinita, por lo tanto, la infiltración y la permeabilidad son lentas, lo que favorece el escurrimiento superficial y los fenómenos erosivos, especialmente si hay un déficit de cobertura vegetal [5].

B. Clima y sus Proyecciones futuras

El panel internacional de cambio climático (IPCC), en su quinto informe (AR5, 2013), elaboró distintos escenarios sobre el clima futuro, conocidos como Trayectorias Representativas de Concentración (o RCP, por sus siglas en inglés) y que han sido empleados en numerosos estudios científicos [6]. Estas trayectorias presentan diversas posibilidades de cambio climático a nivel global (Observar tabla 1), que van desde el RCP 2.6 (el más optimista) donde los efectos de los gases de efecto invernadero comenzarían a disminuir desde el año 2020 hasta ser negativos para el año

2100, y la temperatura del planeta se incrementaría cerca de los dos grados Celsius. El presente estudio emplea el RCP 8.5 (el más pesimista), los esfuerzos para reducir estos gases serían insuficientes y la temperatura del planeta podría subir en promedio 4°C, alcanzando un forzamiento radiactivo de 8.5 W*m⁻² al final del siglo.

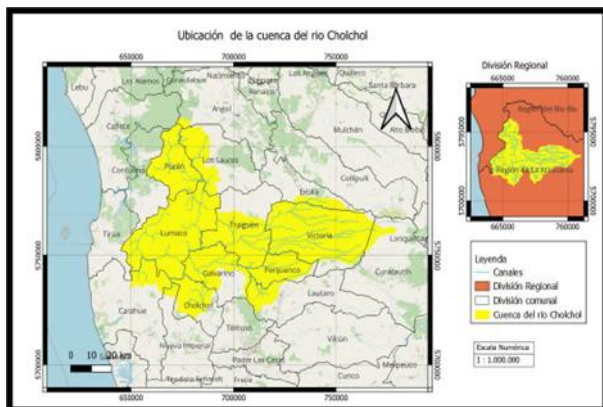


Fig. 1 Mapa de cuenca Chol-Chol con respecto a la región de la Araucanía (Fuente: Elaboración propia, 2024).

La reducción de escala o “*downscaling*” es un proceso que permite traducir las predicciones y proyecciones climáticas de modelos a gran escala, como los Modelos Climáticos Globales (General Circulation Models o GCMs), a una escala más fina, lo que resulta útil para estudios regionales o locales [7,8,15]. Para la aplicación de este modelo se realizó un escalamiento de las variables para las estaciones climáticas dentro de la cuenca.

C. Modelo SWAT

El proceso se estructura en tres etapas principales: la primera corresponde a la preparación y calibración del modelo SWAT+[9], incorporando datos espaciales, climáticos e hidrológicos observados; la segunda aborda el ajuste y escalamiento de los datos climáticos futuros; y la tercera contempla el análisis de las salidas del modelo, evaluando indicadores como caudal, escorrentía superficial y contenido de agua en el suelo (SW300), mediante mapas, gráficos y estadísticas, con el objetivo de identificar variaciones hidrológicas y extraer conclusiones relevantes para la gestión de la cuenca.

La Etapa I inició con la recopilación de datos de entrada para el modelo SWAT+ (versión 2.3.7), incluyendo información climática (precipitación, temperaturas máxima y mínima, radiación solar, humedad relativa y velocidad del viento) de seis estaciones meteorológicas del INIA (2024) para el período 2015-2023, un modelo digital de elevación (DEM ASTERGDEM de 90 m), mapas de uso de suelo de CONAF y tipos de suelo de la FAO [10]. Estos datos se integraron en SWAT+ para generar un modelo hidrológico inicial sin calibrar.

La calibración y validación se realizaron utilizando el complemento SWAT+ Toolbox, empleando datos de caudal de la estación DGA "Río Cholchol en Cholchol", aunque SWAT no requiere un mínimo obligatorio de años para la calibración, la International Water Association (IWA) recomienda contar con al menos cinco años de datos para garantizar una calibración adecuada. Esto se debe a que SWAT maneja una mayor cantidad de datos de entrada y relaciones físicas más complejas entre los parámetros, en comparación con otros modelos hidrológicos, por ende, se utiliza un período de calibración (2015-2020) y validación (2021-2023), obteniendo un modelo calibrado y validado para su uso en la Etapa III.

En la etapa II, se extraen los datos del modelo regional RegCM4-6 bajo el escenario más desfavorable (RCP 8.5) [11,12,13], posteriormente se ajustaron con datos observados de las 6 estaciones meteorológicas de la INIA mediante el “*downscaling*” estadístico, para luego proyectarlos en simulaciones futuras de la etapa III.

En la Etapa III, se integraron los resultados de las etapas I y II, obteniendo un modelo SWAT+ calibrado que proyectó parámetros hidrológicos de la cuenca para el período 2015-2060. A partir de estas simulaciones, se extrajeron y analizaron los indicadores relevantes para el estudio.

D. Indicadores

Para el análisis de la cuenca del río Chol-Chol, se consideraron indicadores hidrológicos clave[14], tales como el caudal, la escorrentía superficial y el contenido de agua en el suelo a 30 cm de profundidad (SW300). El caudal se evaluó integrando registros históricos extraídos de la DGA (1974-2024) con datos simulados para el periodo 2025-2060, lo que permitió construir una serie continua desde 1974 hasta 2060. A partir de esta base, se calcularon los percentiles 10 y 90 para identificar los caudales mínimos y máximos, respectivamente. Además, se analizaron promedios de caudal en distintos subperíodos (Tabla 1), comparando el comportamiento histórico con las proyecciones futuras, con el fin de identificar tendencias temporales. Finalmente, se elaboró un mapa crítico de la cuenca que permitió determinar las zonas con mayor susceptibilidad a inundaciones.

Para el análisis de la escorrentía superficial y del contenido de agua en el suelo (SW300), se aplicó una metodología similar a la empleada para el caudal. En esta etapa, la cuenca fue subdividida en cinco zonas, agrupadas según unidades de respuesta hidrológica (HRUs) que presentaban rangos de datos de salida similares, con el objetivo de lograr un análisis más detallado del comportamiento hidrológico (ver Figura 2). Para cada una de estas zonas, se evaluaron medidas de tendencia central como

el promedio, así como indicadores de variabilidad, incluyendo el coeficiente de variación, entre otros.

TABLA I
SUBPERIODOS PARA ANÁLISIS DE INDICADORES

Subperiodos temporales			
Subperiodos Históricos		Subperiodos futuros	
Subperíodo 1	1974-1990	Subperíodo 4	2025-2036
Subperíodo 2	1991-2007	Subperíodo 5	2037-2048
Subperíodo 3	2008-2024	Subperíodo 6	2049-2060

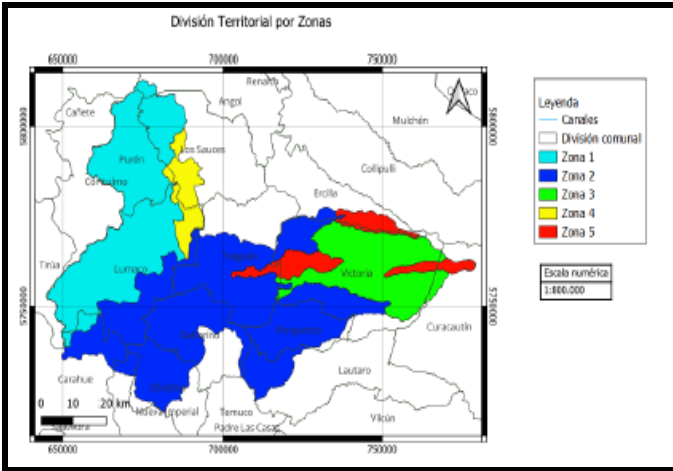


Fig.2 División de la cuenca Río Chol-Chol para análisis de indicadores (Fuente: Elaboración propia, 2024).

Por otro lado, con el objetivo de identificar zonas con riesgo de sequía, se analizó el contenido de agua en el suelo (SW300) durante la temporada de verano. En cada zona, se examinaron el promedio y el coeficiente de variación para caracterizar su variabilidad hídrica. Finalmente, se generaron mapas críticos de los episodios más severos de escorrentía superficial y contenido de agua en el suelo en los primeros 30 cm.

III. RESULTADOS

A. Calibración del modelo

Se identificaron los parámetros sensibles en el modelo SWAT+, empleando SWAT+ Toolbox junto con el método de Sobol, obteniendo 7 parámetros clave de más de 150 analizados. Luego de un proceso de calibración manual, permitió evaluar su impacto real de estos en la cuenca.

Para la primera calibración, que abarcó los años 2015 a 2020, obteniendo un coeficiente de determinación (R^2) de 0.90, un índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) de 0.90 y un BIAS de 10.21. Una vez obteniendo el modelo calibrado para la validación se usaron los años 2021-2023, donde los índices estadísticos fueron un coeficiente de determinación

(R^2) de 0.93, un índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) de 0.92 y un BIAS de 9.72.

Los resultados obtenidos de los procesos conjuntos con el periodo completo, mostraron un coeficiente de determinación (R^2) de 0.91, un índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) de 0.91 y un BIAS de 9.81, lo que indica un excelente ajuste del modelo (Figura 3).

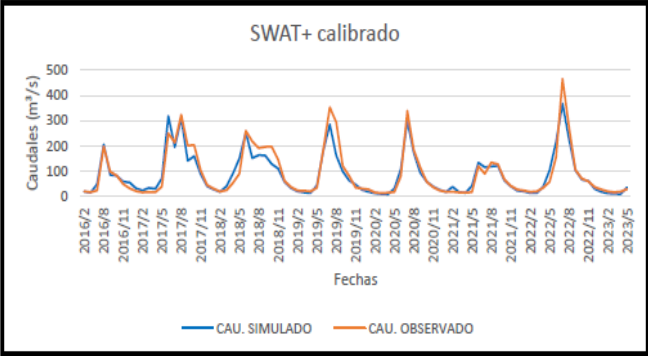


Fig.3 Modelo SWAT+ Calibrado y validado (Fuente: Elaboración propia, 2024).

B. Downscaling o escalamiento

Utilizando el modelo climático regional del CR2 y el software Panoply, se obtuvieron datos mensuales de precipitación, temperatura máxima y mínima, radiación solar, porcentaje de humedad, velocidad del viento en las direcciones S-N y E-O para el período 2015-2060, generando una base de datos climáticos compuesto por 15,456 registros, que fueron gestionados mediante el software Excel. Posteriormente, se aplicó el método de downscaling. Para la mayoría de los datos, se empleó la técnica de reducción estadística mediante la adición delta, y para las temperaturas, fue necesario aplicar la reducción mediante regresión lineal simple.

A continuación, se presentan las diferencias en los coeficientes de determinación (R^2) entre los datos proporcionados por el CR2 antes de aplicar el downscaling (R^2 Inicial), y los resultados posteriores al downscaling (R^2 Final). Donde se observa que los valores de R^2 de la precipitación y velocidad del viento presentaron un ajuste más bajo debido a la dispersión de los datos (Tabla II).

TABLA II
MATRIZ DE DATOS CLIMÁTICOS MEDIANTE DOWNSCALING

Variable climática	Estación 1		Estación 2		Estación 3		Estación 4		Estación 5		Estación 6	
	R ² Inicial	R ² Final	R ² Inicial	R ² Final	R ² Inicial	R ² Final	R ² Inicial	R ² Final	R ² Inicial	R ² Final	R ² Inicial	R ² Final
Precipitación	0,18	0,44	0,24	0,52	0,18	0,48	0,17	0,46	0,21	0,49	0,27	0,56
Temperatura máxima	0,80	0,83	0,84	0,86	0,83	0,84	0,84	0,85	0,84	0,84	0,83	0,88
Temperatura mínima	0,67	0,73	0,69	0,71	0,67	0,69	0,73	0,73	0,72	0,73	0,52	0,61
Radiación solar	0,91	0,90	0,92	0,88	0,92	0,89	0,92	0,90	0,93	0,91	0,93	0,94
% Humedad	0,51	0,86	0,33	0,82	0,41	0,73	0,41	0,84	0,32	0,88	0,43	0,88
Velocidad del viento	0,07	0,67	0,0001	0,34	0,0003	0,16	0,49	0,74	0,015	0,74	0,007	0,79

C. Indicadores de Caudal

Al analizar el caudal en conjunto, considerando tanto los datos históricos (1974-2024) como los simulados (2025-2060), se observa una tendencia decreciente a lo largo del tiempo, reflejada en la pendiente negativa de la ecuación de regresión de la figura 4 ($y = -0.0027x + 220.61$). Además, el promedio histórico del caudal fue de 104.3 m³/s, mientras que su coeficiente de variación (1.09) indica una alta variabilidad en los datos. Esto indica menores caudales hacia el futuro.

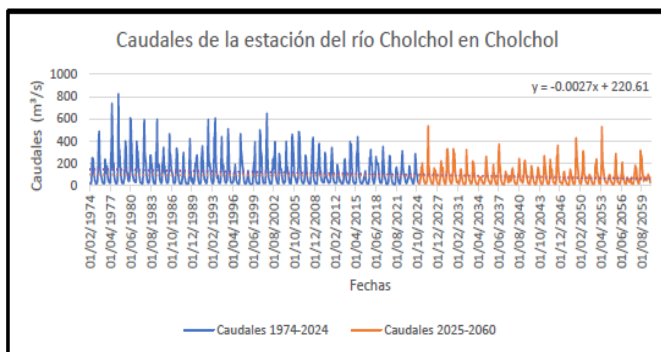


Fig.4 Gráfico del caudal del río Chol-Chol, desde 1974 hasta 2060
(Fuente: Elaboración propia, 2024).

La Tabla III presenta la ocurrencia de grandes caudales (caudales sobre percentil 90) y bajos caudales (caudales bajo percentil 10). Se observa que los grandes caudales han disminuido en un 62% en comparación con el periodo histórico (1974-2024), mientras que los bajos caudales han aumentado en un 142%.

El mapa del último subperiodo (2049-2060), muestra que las zonas del río Cholchol en Cholchol, el río Quillén en Galvarino y el río Traiguén en Traiguén presentan una susceptibilidad elevada a posibles inundaciones (Figura 5). Este comportamiento se debe a los cambios proyectados en los patrones de precipitación, así como a la dinámica hidrológica de cada cuenca, lo que podría generar un mayor riesgo de

eventos extremos. Estos hallazgos resaltan la importancia de la gestión del agua y la planificación territorial en la zona.

TABLA III
NÚMERO DE GRANDES Y BAJOS CAUDALES (1974 A 2060)

Periodo / Métrica	Nº de grandes caudales sobre percentil 90	Nº de bajos caudales sobre percentil 10
Línea base (1974-2024)	50	28
Escenario (2025-2060)	19	68
Variación porcentual (%)	62%	142.9%

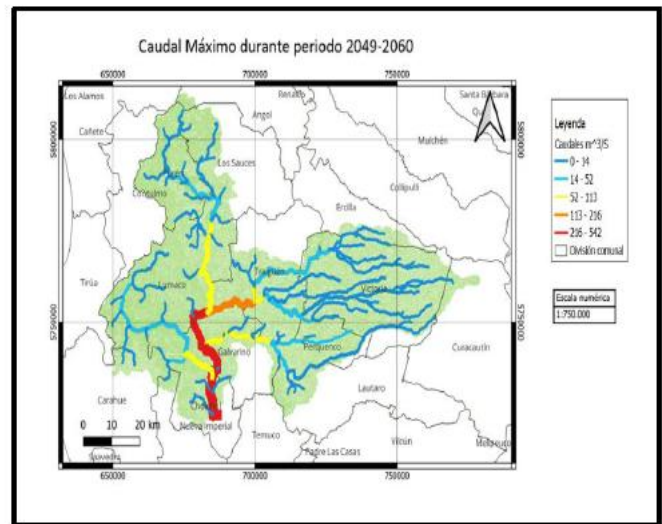


Fig.5 Mapa de máximo caudal subperiodo 2049-2060.
(Fuente: Elaboración propia, 2024).

D. Indicadores de Escorrentía Superficial

La tabla IV muestra las medidas de tendencia central obtenidas durante la simulación, reflejando una alta variabilidad en la escorrentía superficial con coeficientes de variación superiores a 2, destacando la zona 1 con el valor más alto (3.4). Al analizar las diferentes zonas se identifica que las zonas 2 y 5 presentan los mayores niveles de escorrentía, indicando una posible propensión a inundaciones en períodos de lluvias intensas, mientras que las zonas 1 y 3 registran valores bajos lo que sugiere una mayor susceptibilidad a posibles sequías.

La escorrentía superficial promedio por subperiodo en cada zona para los meses invernales, se observa que la zona 2 presenta el mayor valor de escorrentía, mientras que la zona 3 registra la menor escorrentía superficial. Además, se identifica que, a lo largo del tiempo, el contenido de escorrentía disminuye en las zonas 2, 3, 4 y 5, mientras que en la zona 1, a

diferencia de las demás, aumenta progresivamente conforme avanza la simulación.

TABLA IV
MEDIDAS DE LA ESCORRENTÍA SUPERFICIAL POR ZONAS

	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5
Promedio (mm)	5,6	15,4	1,9	7,9	10,5
Des. Estándar (mm)	19,1	35,4	3,9	16,7	24,9
Coe. Variación	3,4	2,3	2,1	2,1	2,4
Mínimo (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Máximo (mm)	166,0	293,5	30,3	129,5	205,9
Percentil 10 (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Percentil 90 (mm)	10,1	51,7	6,3	26,8	33,0

Los mapas más críticos de escorrentía superficial (Figura 6), se observa que las zonas 1, 2 y 4 son las más afectadas por un aumento significativo en la escorrentía. En estas áreas, el color rojo intenso indica una mayor acumulación de agua superficial, lo que sugiere un potencial riesgo de inundaciones. Este incremento es más notable en los escenarios del futuro cercano (2025-2026) y del futuro lejano (2049-2060), reflejando una tendencia preocupante para estas zonas debido al aumento sostenido de la escorrentía superficial.

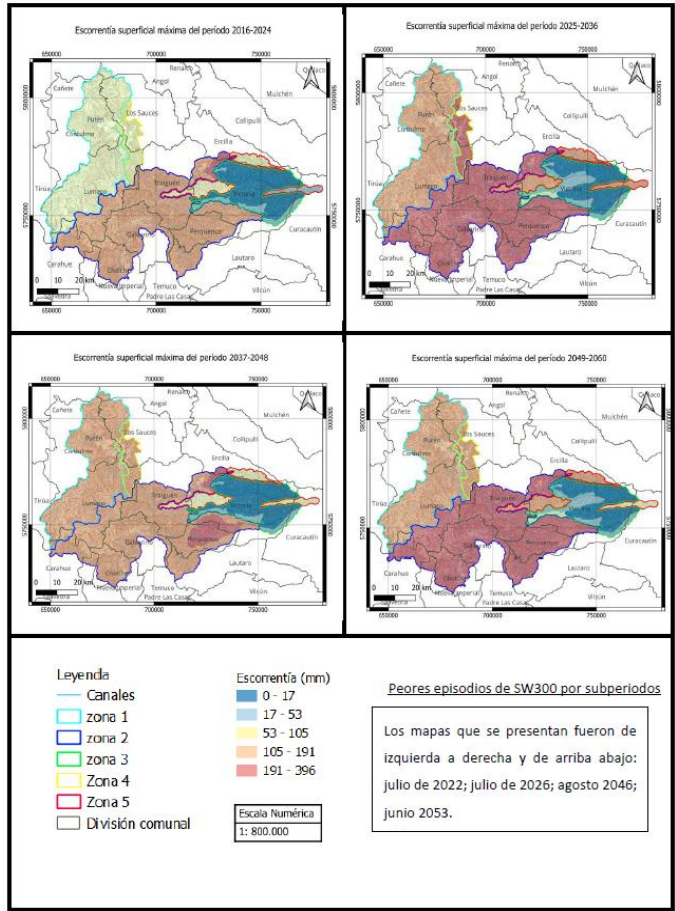


Fig.6 Mapas críticos de escorrentía superficial por subperíodos.

E. Indicadores de Humedad del Suelo

De los mapas más críticos de SW300, se observa que las zonas 1, 2 y 4 son las más afectadas por un bajo contenido de agua en el suelo. En estas áreas, el color rojo intenso indica una disminución significativa, lo que representa un potencial riesgo de sequías. Esta reducción es más marcada en los escenarios del presente (2016-2024), futuro intermedio (2037-2048) y futuro lejano (2049-2060), evidenciando una tendencia preocupante para estas zonas debido a la disminución del contenido de agua en los primeros 30 cm (Figura 7).

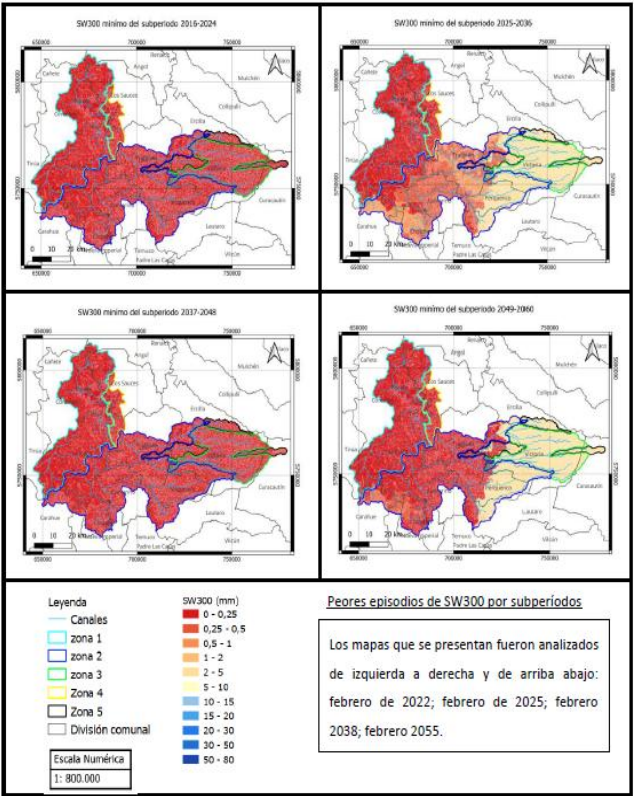


Fig.7 Mapas críticos de escorrentía superficial por subperíodos.

IV. CONCLUSIONES

El análisis hidrológico proyectado para la cuenca del río Chol-Chol bajo el escenario climático RCP 8.5 indica una disminución generalizada de la disponibilidad hídrica para el período 2025–2060, con una reducción del 38,3% en los caudales medios respecto al período histórico 1974–1990. Se evidencia un aumento del 142,9% en los eventos de bajos caudales (P10) y una disminución del 62% en los caudales altos (P90), reflejando una mayor irregularidad hídrica.

Se identificaron zonas vulnerables con distinta exposición a riesgos: Lumaco y Purén presentan alta susceptibilidad a sequías, mientras que Chol-Chol, Galvarino y Traiguén se ven más expuestas a eventos de inundación. Estas diferencias están

asociadas a variaciones en la escorrentía superficial, el contenido de agua del suelo (SW300), el uso del suelo y la topografía. En sectores como Lumaco y Purén se observó un incremento de la escorrentía sin aumento correspondiente en la saturación del suelo, lo que sugiere una pérdida de capacidad de infiltración y potencial degradación de la funcionalidad hidrológica del suelo. Las zonas agrícolas (zona 2) enfrentan un riesgo creciente de sequías prolongadas y extremos hidrológicos, con posibles impactos negativos sobre cultivos, infraestructura y economía local.

El modelo SWAT+ mostró un desempeño robusto durante la calibración y validación, con coeficientes R^2 y NSE superiores a 0,90, lo que respalda la fiabilidad de las proyecciones obtenidas. Estos resultados destacan la necesidad de implementar estrategias de gestión adaptativa del recurso hídrico, orientadas a mitigar los efectos de la variabilidad climática y a fortalecer la resiliencia socioambiental en la Región de La Araucanía.

REFERENCES

- [1] ONU. (2020). La crisis del agua. <https://www.un.org/es/climatechange/science/climate-issues/water>
- [2] CR2. (2020). Informe a la Nación: La megasequía en Chile. <https://www.cr2.cl/megasequia/>
- [3] Carrasco, C. (2021, octubre 20). La crisis hídrica que golpea a La Araucanía. El Mostrador. <https://www.elmostrador.cl/agenda-pais/2021/10/20/la-crisis-hidrica-que-golpea-a-la-araucania/>
- [4] Bozkurt, D., Alvarez-Garretón, C., Muñoz, A. A., Oyarzún, R., & Rondanelli, R. (2022). La mega sequía en Chile central: evidencia paleoclimática y sus implicancias actuales. Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2). <https://www.cr2.cl/paleoclimatologia-chile-central-padece-la-sequia-mas-prolongada-en-1-000-anos-chilevision/>
- [5] Municipalidad de Chol-Chol. (2021). Recursos Naturales de la Comuna de Chol-Chol. Ciren, 2-4.
- [6] IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. (2013). Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (T. F. Stocker et al., Eds.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324>
- [7] Maraun, D., Wetterhall, F., Ireson, A. M., Chandler, R. E., Kendon, E. J., Widmann, M., ... & Thiele-Eich, I. (2010). Precipitation downscaling under climate change: Recent developments to bridge the gap between dynamical models and the end user. *Reviews of Geophysics*, 48(3). <https://doi.org/10.1029/2009RG000314>
- [8] Fowler, H. J., Blenkinsop, S., & Tebaldi, C. (2007). Linking climate change modelling to impacts studies: Recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 27(12), 1547-1578. <https://doi.org/10.1002/joc.1556>
- [9] Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., & Williams, J. R. (2011). *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009*. Texas Water Resources Institute.
- [10] FAO. (2018). SOFO 2018 - El estado de los bosques del mundo 2018. <https://www.fao.org/state-of-forests/2018/es/>
- [11] Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2). (2015). *Simulaciones regionales RegCM4*. <https://www.cr2.cl/simulaciones-regionales-regcm4/>
- [12] Giorgi, F., & Coauthors. (2012). RegCM4: Model description and preliminary tests over multiple CORDEX domains. *Climate Research*, 52, 7-29. <https://doi.org/10.3354/cr01018>
- [13] Moss, R. H., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., Rose, S. K., van Vuuren, D. P., Carter, T. R., Emori, S., Kainuma, M., & Kram, T. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463(7282), 747-756
- [14] Nalbantis, I. (2008). Evaluation of a hydrological drought index. *European Water*, 23(24), 67-77.
- [15] Fowler, H. J., Blenkinsop, S., & Tebaldi, C. (2007). Linking climate change modelling to impacts studies: Recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 27(12), 1547-1578. <https://doi.org/10.1002/joc.1556>