

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXVII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA DE INUNDACIONES EN CUENCAS CRÍTICAS DE LA ARAUCANÍA

HÉCTOR GARCÉS-FIGUEROA^{1 2 3}
MAURICIO ZAMBRANO-BIGIARINI^{4 5 6}

RESUMEN

Las inundaciones son uno de los eventos extremos más destructivos y se espera que su recurrencia aumente producto del cambio climático. En Chile, las alertas de inundación se emiten con pocas horas de anticipación y están basadas únicamente en la comparación de umbrales con observaciones de caudal en tiempo real. Este trabajo desarrolla un prototipo de sistema de alerta temprana para cuencas andinas de la Región de La Araucanía, capaz de emitir pronósticos de caudal con hasta 9 días de anticipación.

El modelo conceptual TUWmodel fue calibrado mediante el algoritmo multiobjetivo NMPSO, priorizando simultáneamente la representación de caudales altos y bajos. Posteriormente, se forzó con datos diarios de temperatura y precipitación provenientes de los conjuntos de pronósticos ECMWF-IFS ENS y MSWX-Mid. Para corregir sesgos en las forzantes meteorológicas, se aplicó mapeo de cuantiles empíricos utilizando CR2METv2.5 como referencia. Posteriormente, el sistema se evaluó retrospectivamente en tres cuencas andinas del sur de Chile afectadas por crecidas recientes.

Se espera que este prototipo esté pronto disponible en línea, fortaleciendo las capacidades de pronóstico a mediano plazo en cuencas críticas y entregando información útil a autoridades y comunidades.

¹ Estudiante de Ingeniería Civil, Departamento de Obras Civiles, Universidad de La Frontera

² Asistente de Investigación, Observatorio de Recursos Hídricos de La Araucanía (Kimün-Ko), Universidad de La Frontera

³ Asistente de Investigación, Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2), Universidad de Chile

⁴ Profesor Asociado, Departamento de Obras Civiles, Universidad de La Frontera

⁵ Director, Observatorio de Recursos Hídricos de La Araucanía (Kimün-Ko), Universidad de La Frontera

⁶ Investigador Asociado, Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2), Universidad de Chile

1. INTRODUCCIÓN

Las inundaciones son desastres naturales que pueden generar efectos devastadores tanto en comunidades como en ecosistemas, ya que ponen en riesgo la vida de la población y provocan daños económicos severos, especialmente por la destrucción de infraestructura crítica (Grillakis et al., 2010; Nevo et al., 2022). En el contexto actual de cambio climático, se espera que su frecuencia y magnitud aumenten (Khazaei et al., 2012; Alfieri et al., 2017; Thielen et al., 2009; Nevo et al., 2022), lo que incrementa los desafíos para su adecuada gestión.

Ante esta problemática, los sistemas de alerta temprana (SAT) surgen como una herramienta para mitigar los efectos de estos eventos extremos, permitiendo pronosticar oportunamente condiciones críticas de caudal (Thielen et al., 2009). A nivel internacional, sistemas como el European Flood Awareness System (EFAS; Thielen et al., 2009) y el Global Flood Awareness System (GloFAS; Alfieri et al., 2013) utilizan modelos hidrológicos acoplados con conjuntos de pronósticos para generar pronósticos de caudal con hasta 15 días de anticipación.

Actualmente en Chile, el sistema de alerta de inundaciones se basa solo en la comparación entre umbrales de caudal definidos por la Dirección General de Aguas (DGA) y observaciones en tiempo real transmitidas desde estaciones fluviométricas (Ávila, 2018). En consecuencia, no es posible anticipar eventos de inundación con la debida antelación.

Este trabajo propone el desarrollo de un prototipo de sistema de alerta temprana de inundaciones para cuencas críticas de la Región de La Araucanía, a partir de la implementación del modelo hidrológico TUWmodel (Parajka et al., 2007) acoplado con pronósticos meteorológicos del producto Multi-Source Weather (MSWX; Beck et al., 2022) y del conjunto de pronósticos ECMWF-IFS ENS, lo que permite generar pronósticos de caudal con horizontes de hasta 9 días.

2. ÁREA DE ESTUDIO

La Figura 1 presenta la ubicación de las tres cuencas analizadas en este estudio: Río Cautín en Rari-Ruca (CRR), Río Allipén en Los Laureles (ALL) y Río Trancura antes de Llafenco (TAL), todas situadas en la Región de La Araucanía. Estas cuencas presentan regímenes hidrológicos pluvio-nivales, influenciados por precipitaciones invernales y acumulaciones nival en sectores altos (DGA, 2004a; DGA, 2024b).

La Cuenca del Río Cautín en Rari-Ruca (código BNA 9123001) tributa a la cuenca del Río Imperial y se localiza administrativamente en la comuna de Curacautín, la cual cuenta con una población de 18 536 habitantes. La estación fluviométrica se encuentra a una altitud de 400 m s.n.m., mientras que el rango altitudinal de la cuenca se extiende entre los 400 y los 2797 m s.n.m. Según la clasificación climática de Köppen-Geiger (Beck et al., 2023), predomina el clima templado sin estación seca y con veranos templados (Cfb), con presencia de zonas más frías en sectores elevados, principalmente Cfc (templado sin estación seca y veranos fríos) y Dsc (frío con veranos secos y fríos). Su régimen hidrológico ha sido clasificado como pluvial con leve influencia nival (DGA, 2004a)

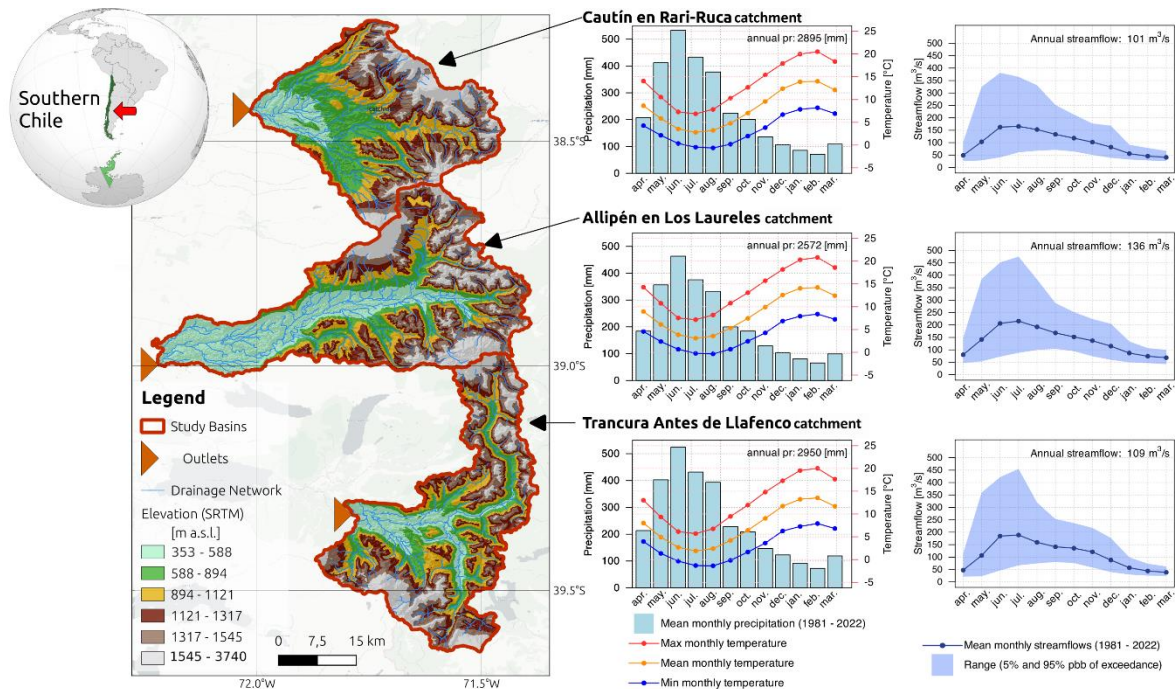


Figura 1: Área de estudio correspondiente a las cuencas Río Cautín en Rari-Ruca, Río Allipén en Los Laureles y Río Trancura antes de Llafenco, junto a sus respectivos climogramas y curvas de variación estacional de caudales para el período 1981-2022

La Cuenca del Río Allipén en Los Laureles (código BNA 9404001) tributa a la cuenca del Río Toltén y abarca completamente la comuna de Melipeuco, además de parte de la comuna de Cunco, que presentan una población de 6796 y 19 177 habitantes, respectivamente. Esta cuenca se extiende desde los 190 hasta los 3063 m s.n.m., con la estación fluviométrica ubicada en la cota más baja. Al igual que las cuencas anteriores, presenta un régimen pluvio-nival (DGA, 2024b). La distribución climática muestra predominancia de Cfb, seguida de Cfc y Dsc en las zonas más elevadas (Beck et al., 2023).

Por último, la Cuenca del Río Trancura antes de Llafenco (código BNA 9414001), también tributaria de la cuenca del Río Toltén, se encuentra completamente contenida dentro de los límites administrativos de la comuna de Curarrehue, la cual presenta una población de 7733 habitantes. El rango altitudinal de esta cuenca varía entre los 386 y los 3300 m s.n.m., con la estación fluviométrica ubicada a 386 m s.n.m. Esta cuenca posee un régimen pluvio-nival bien definido (DGA, 2024b). El clima predominante corresponde a Cfb en sectores medios y bajos, con presencia significativa de Cfc y Dsc hacia zonas de mayor elevación (Beck et al., 2023).

La selección de estas tres cuencas se realizó en conjunto con la Unidad de Hidrología de la Dirección General de Aguas de la Región de La Araucanía, debido a los eventos de inundación registrados durante los años 2023 y 2024. Estas crecidas evidenciaron la necesidad de priorizar zonas con alta recurrencia de eventos extremos para el desarrollo de sistemas de alerta temprana.

3. METODOLOGÍA

3.1 DATOS HIDROMETEOROLÓGICOS

El prototipo del sistema de alerta temprana se desarrolló a partir de la implementación de datos hidrometeorológicos diarios de precipitación y temperatura media del aire, obtenidos desde diversas fuentes que permiten representar condiciones históricas y futuras de manera consistente.

Se utilizó producto meteorológico Multi-Source Weather, en particular, los subproductos: MSWX-Past, MSWX-NRT y MSWX-Mid (Beck et al., 2022). Este producto entrega datos de precipitación y temperatura con resolución espacial de $0,1^\circ$ y temporal de 3 horas, los cuales fueron agregados a escala diaria para su implementación en el modelo hidrológico. En particular, MSWX-Mid corresponde a un conjunto de 30 pronósticos con horizonte de hasta 10 días. Para mayor detalle sobre la estructura y cobertura temporal de estos subproductos ver Figura 2.

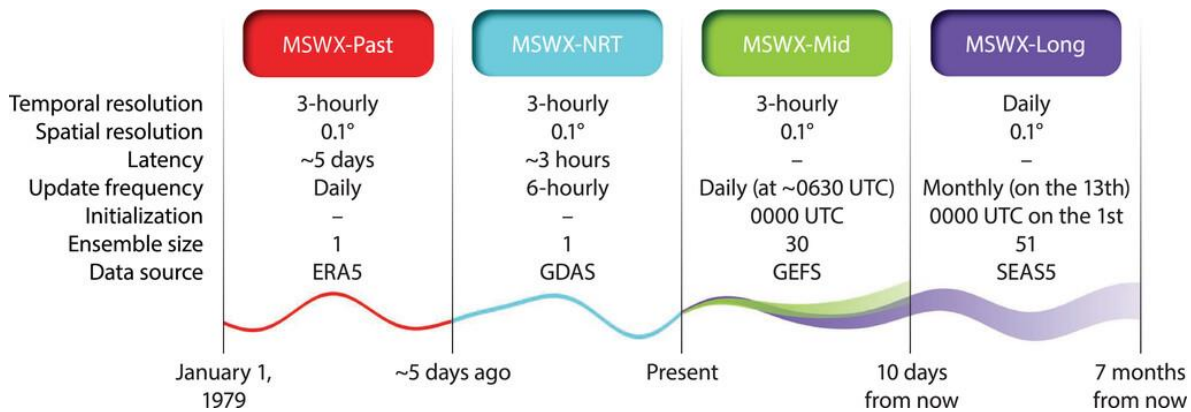


Figura 2: Subproductos disponibles en el producto meteorológico MSWX. Fuente: Beck et al. (2022)

Adicionalmente, se incorporaron datos del reanálisis ERA5-Land (Muñoz-Sabater et al., 2021) y su extensión en tiempo casi-real ERA5-Land-NRT, desarrollados por el Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio (ECMWF), que entregan información horaria con resolución espacial cercana a 9 km. Aquellos productos fueron acoplados con los pronósticos de mediano plazo generados por ECMWF-IFS ENS (ECMWF, 2023), los cuales son un conjunto de 50 miembros perturbados más un miembro de control, que alcanzan un horizonte de hasta 15 días. La consistencia entre ERA5-Land y los pronósticos ECMWF-IFS ENS permite un acople directo entre el reanálisis y los pronósticos, como ha sido respaldado por Amjad et al. (2024).

Con el objetivo de adaptar las forzantes meteorológicas a las condiciones locales, se aplicó una corrección de sesgo utilizando el producto CR2METv2.5-BEST como referencia (Boisier, 2023). Esta corrección se realizó mediante el método Quantile Delta Mapping (QDM; Cannon et al., 2015), que permite ajustar las distribuciones de los productos globales preservando los cambios en cuantiles y extremos.

Posteriormente, se estimó la evapotranspiración potencial diaria a partir de la fórmula propuesta por Oudin et al. (2005), que permite calcular esta variable en función de la temperatura media del aire.

Finalmente, los datos de caudal observado fueron obtenidos desde la plataforma Información Oficial Hidrometeorológica y de Calidad de Aguas en Línea de la Dirección General de Aguas (<https://snia.mop.gob.cl/BNAConsultas/reportes>), empleando registros medios diarios de estaciones fluviométricas ubicadas en los puntos de salida de las cuencas estudiadas.

3.2 MODELO HIDROLÓGICO

El modelo utilizado en este estudio es TUWmodel (Parajka et al., 2007), un modelo hidrológico conceptual basado en la estructura del modelo HBV (Bergström, 1976). Opera con tres forzantes meteorológicas diarias: precipitación, temperatura media del aire y evapotranspiración potencial. Su estructura comprende tres módulos principales: nieve, humedad del suelo y escorrentía y requiere la calibración de 14 parámetros. Los rangos considerados en este estudio para los parámetros del modelo son aquellos propuestos por Viglione y Parajka (2020).

El módulo de nieve clasifica la precipitación como líquida o sólida según la temperatura de bulbo húmedo (T_{wb}). El derretimiento se simula mediante un esquema grado-día controlado por un factor de derretimiento (DDF) y una temperatura umbral de derretimiento (T_m). Además, incluye un factor de corrección de nieve (SCF).

El módulo de humedad del suelo regula tanto la generación de escorrentía como la evapotranspiración, en función del estado de almacenamiento de humedad del suelo (SM). Toda el agua excedente genera escorrentía cuando se supera un umbral de almacenamiento (FC), modulada por un parámetro de no linealidad (β). La evapotranspiración real es controlada por el umbral LP, definido como el producto entre FC y un coeficiente LPrat. Si SM es mayor a LP, se asume que la evapotranspiración real es igual a la potencial.

La escorrentía se simula mediante un sistema de dos reservorios con tres rutas de salida:

1. Respuesta muy rápida (q_0) cuando se supera el umbral LSuz, asociada al coeficiente k_0 .
2. Respuesta rápida (q_1) desde el mismo reservorio, con coeficiente k_1 .
3. Flujo lento (q_2) tras percolación hacia el segundo reservorio, regulado por c_P y k_2 .

Finalmente, el caudal total se ajusta mediante una función de transferencia gobernada por los parámetros B_{max} y c_R .

3.4 CALIBRACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO

La calibración del modelo hidrológico se llevó a cabo utilizando el paquete hydroMOPSO (Marinao-Rivas & Zambrano-Bigiarini, 2025), desarrollado específicamente para la optimización multiobjetivo de modelos ambientales. Este paquete implementa el algoritmo NMPSO (Lin et al., 2018), el cual combina la optimización por enjambre de partículas (PSO) con operadores genéticos evolutivos. En cada iteración, el algoritmo genera un conjunto de soluciones no dominadas (frente de Pareto) y las evalúa utilizando un estimador de aptitud balanceado (BFE). Para su aplicación en

la calibración de TUWmodel se utilizó la configuración recomendada en Marinao-Rivas & Zambrano-Bigiarini (2021).

La calibración se realizó con series diarias de caudal abarcando el periodo 1984-2022, con tres años de calentamiento entre 1981-1983. Además, empleó dos funciones objetivo orientadas a distintas partes del hidrograma (ver Figura 3).

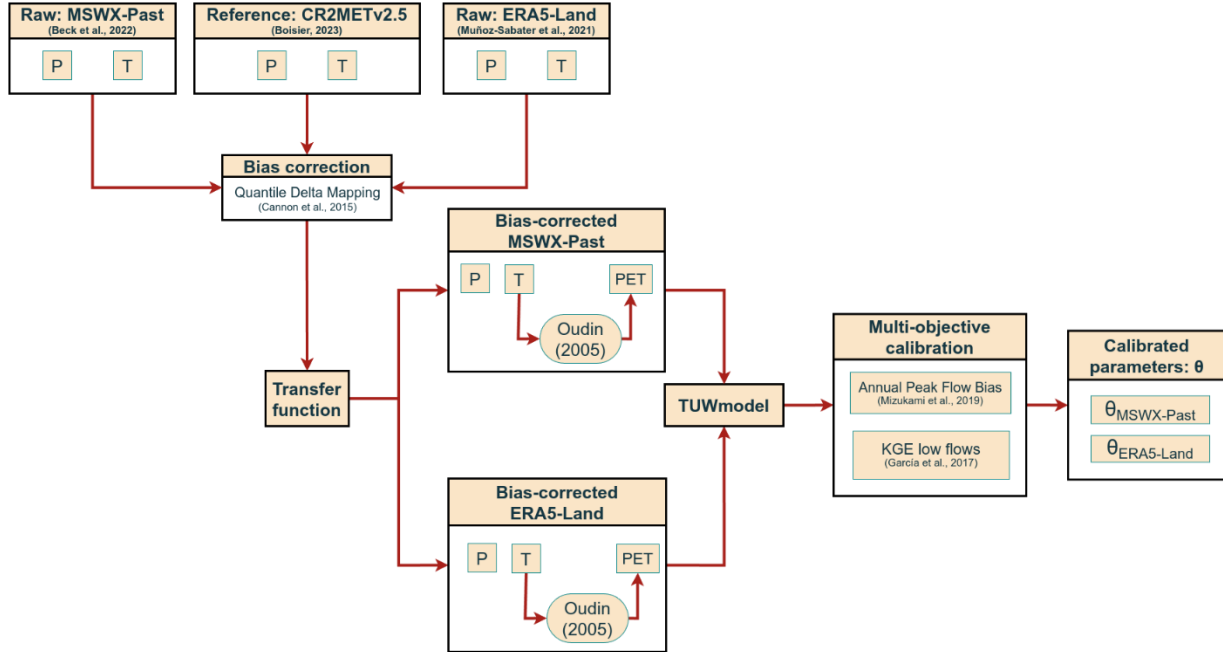


Figura 3: Esquema del proceso de calibración del modelo hidrológico TUWmodel utilizando forzantes provenientes de MSWX-Past y ERA5-Land, considerando una calibración multiobjetivo basada en las funciones objetivos Annual Peak Flow Bias (Mizukami et al., 2019) y KGE para flujos bajos (García et al., 2017).

Para representar adecuadamente los caudales altos se utilizó el Annual Peak Flow Bias (APFB; ver Ecuación 1). Esta métrica propuesta por Mizukami et al. (2019) evalúa el sesgo entre los caudales máximos anuales simulados y observados:

$$APFB(Q) = \sqrt{\left(\frac{\mu_{peakQ_s}}{\mu_{peakQ_o}} - 1\right)^2} \quad (1)$$

Donde μ_{peakQ_s} es la media de los caudales máximos anuales simulados y μ_{peakQ_o} es la media de los caudales máximos anuales observados.

Complementariamente, para capturar de manera adecuada la dinámica de caudales bajos, se empleó la métrica Kling-Gupta para flujos bajos (KGE_{lf}; ver Ecuación 2) propuesta por García et al. (2017). Está definida como el promedio entre la eficiencia de Kling-Gupta (KGE, Gupta et al., 2009) aplicada al caudal y la aplicada al inverso del caudal:

$$KGElf(Q) = \frac{1}{2} \left[KGE(Q) + KGE \left(\frac{1}{Q + \varepsilon} \right) \right] \quad (2)$$

Este enfoque de calibración multiobjetivo permite una estimación robusta de parámetros, mejorando la representación de los caudales extremos a la vez que preserva la dinámica en los flujos bajos.

3.5 PRODUCCIÓN DE PRONÓSTICOS HIDROLÓGICOS

El sistema de alerta temprana desarrollado en este estudio se basa en la comparación entre pronósticos hidrológicos y umbrales de caudal definidos por la Dirección General de Aguas, con el objetivo de pronosticar situaciones de riesgo de inundaciones. Actualmente, existen tres niveles de alerta: azul, cuando los caudales superan condiciones normales; amarilla, ante un aumento sostenido en los caudales y condiciones meteorológicas desfavorables; y roja, cuando el incremento de caudales representa una amenaza directa para zonas pobladas o infraestructura crítica. Parte de los umbrales de inundación para la Región de La Araucanía fueron definidos por Rhodos (2010).

La generación de pronósticos hidrológicos se realizó mediante dos enfoques, dependiendo de la fuente meteorológica utilizada: MSWX o ECMWF-IFS ENS (ver Figura 4).

En el caso de MSWX, se emplearon tres subproductos (MSWX-Past, MSWX-NRT y MSWX-Mid), previamente corregidos por sesgo, como forzantes del modelo hidrológico. La calibración del modelo se llevó a cabo utilizando únicamente MSWX-Past corregido, y los parámetros resultantes fueron utilizados de forma fija para las simulaciones acopladas que integran retrospectivamente MSWX-Past, luego MSWX-NRT, y finalmente MSWX-Mid (conjunto de 30 pronósticos meteorológicos). Las condiciones iniciales requeridas por el modelo hidrológico: almacenamiento de humedad del suelo, equivalente en agua de nieve, almacenamiento en zonas de respuesta rápida y lenta fueron generadas a partir de una corrida de calentamiento de cinco años con MSWX-Past, y actualizadas sucesivamente entre pronósticos bajo el supuesto de que este subproducto posee menor incertidumbre que sus versiones NRT y Mid.

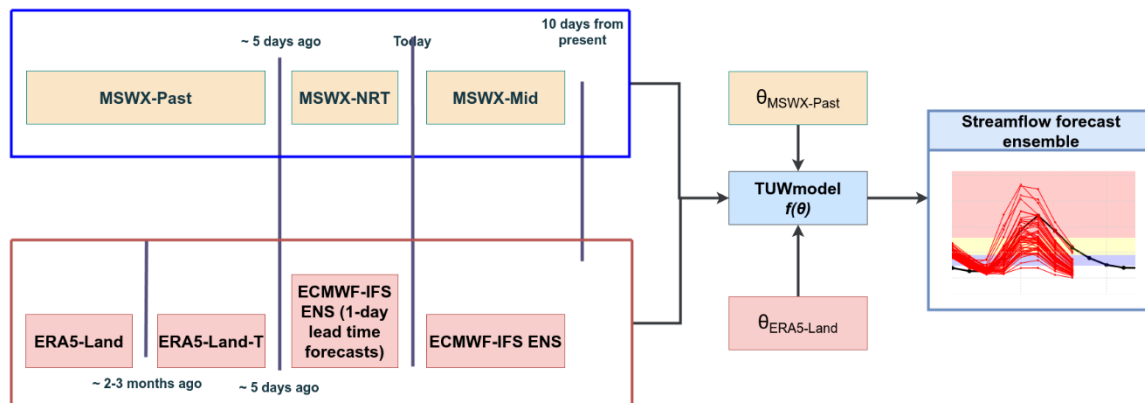


Figura 4: Esquema del proceso de acople entre TUWmodel y los pronósticos meteorológicos provenientes de ECMWF-IFS ENS y MSWX-Mid para generar pronósticos de caudal

Para el caso de ECMWF-IFS ENS, se implementó un acople entre ERA5-Land (histórico), ERA5-Land-T (versión en tiempo casi real), los pronósticos de ECMWF-IFS ENS con un horizonte de un día, y el conjunto de pronósticos extendidos a 9 días.

Una vez obtenidos los pronósticos hidrológicos, estos se contrastan con los umbrales de caudal establecidos para cada cuenca. Esta comparación permite determinar, para cada horizonte temporal, el nivel de alerta de inundación conforme a los umbrales previamente mencionados.

4. RESULTADOS

4.1 EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE PRONÓSTICO BASADO EN ECMWF-IFS ENS

En la Figura 5 se presenta un evento de crecida ocurrido en septiembre de 2023, que generó inundaciones en la comuna de Curarrehue (cuenca TAL). Los pronósticos hidrológicos fueron generados a partir de los 50 miembros de ECMWF-IFS ENS, corregidos por sesgo, utilizando distintas fechas de inicialización previas al caudal peak del evento.

Para TAL, se observa que, si el sistema de alerta se hubiese basado en la mediana del conjunto de pronósticos, el evento podría haberse anticipado con hasta 9 días de antelación. A partir de los 6 días previos al evento, la dispersión del ensamble comienza a disminuir, y los resultados para 6 y 4 días antes del peak son prácticamente equivalentes. Dos días antes del evento, la dispersión se reduce considerablemente; no obstante, la mediana del conjunto subestima la magnitud del caudal observado. Aun así, el pronóstico logra clasificar correctamente el evento como alerta roja, reflejando su capacidad para identificar correctamente situaciones en las que existe riesgo de inundación.

Entre las cuencas ALL y CRR se observa un comportamiento similar, que difiere del presentado por TAL. En este caso, los pronósticos generados con 9 días de anticipación abarcan una amplia gama de escenarios, incluyendo condiciones sin alerta, alerta azul, amarilla y roja. Se evidencia una alta dispersión, lo que refleja la incertidumbre meteorológica inicial. A los 6 días antes del evento, se observa una subestimación sistemática del peak, lo que conlleva una clasificación errónea del nivel de alerta: alerta azul en lugar de amarilla en CRR y ausencia de alerta en ALL. Para ALL, tres días antes del peak se logra una categorización adecuada (alerta azul), comportamiento que se mantiene para horizontes más cercanos. El día previo al evento, el caudal es sobrestimado, lo que podría deberse a un desajuste en la magnitud de la precipitación pronosticada. En CRR, en cambio, la subestimación persiste hasta tres días antes del peak, corrigiéndose parcialmente dos días antes, cuando la mediana del conjunto logra identificar correctamente el nivel de alerta como amarillo, pese a seguir subestimando la magnitud del caudal.

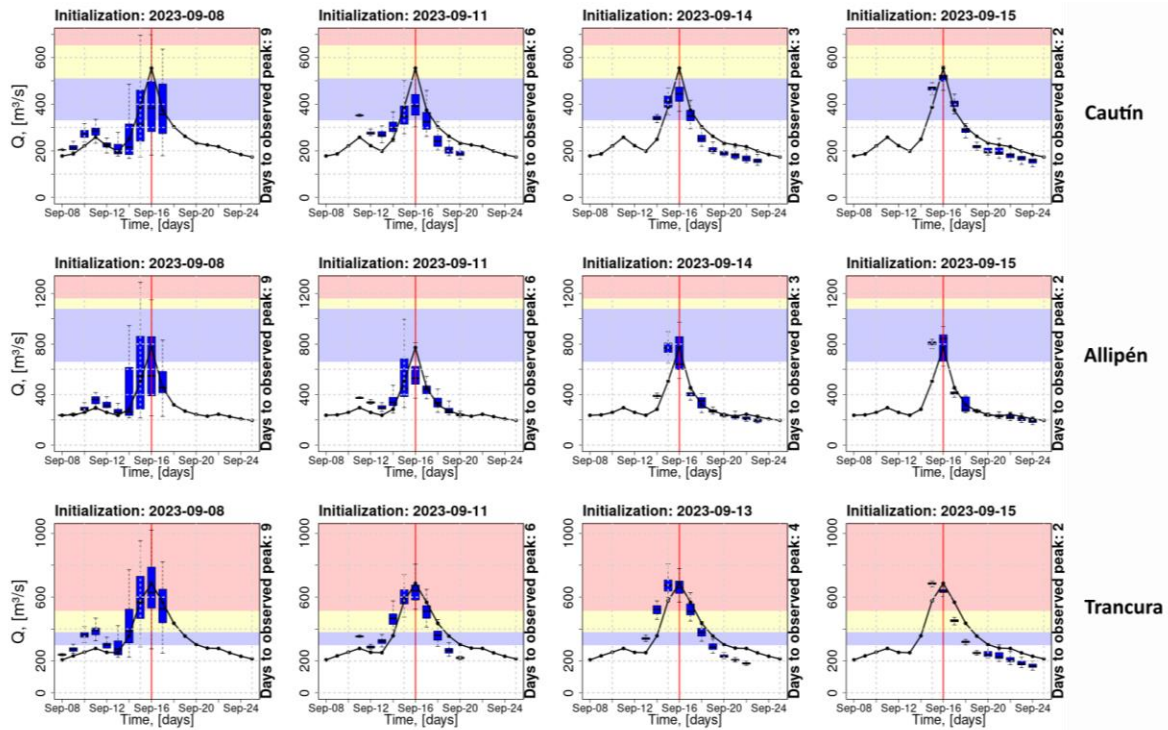


Figura 5: Evaluación de un evento de crecidas ocurrido durante septiembre de 2023 en el área de estudio. Los pronósticos hidrológicos están basados en el acople entre TUWmodel y los pronósticos meteorológicos de ECMWF-IFS ENS

4.2 COMPARACIÓN ENTRE EL SISTEMA DE PRONÓSTICO BASADO EN ECMWF-IFS ENS Y MSWX

La Figura 6 presenta parcialmente un evento de crecida en TAL correspondiente a julio de 2024, utilizado para comparar el desempeño del ensamble ECMWF-IFS ENS con el producto MSWX-Mid. Dado que MSWX-Mid no entrega pronósticos retrospectivos para eventos específicos, la comparación se realizó únicamente para los dos días previos al caudal peak, pues no se tuvo acceso a más datos.

Los resultados muestran diferencias notorias entre ambos productos. Para ECMWF-IFS ENS, dos días antes del evento se observa una sobrestimación del caudal, aunque se logra una clasificación correcta del nivel de alerta. Un día antes del peak, la dispersión del conjunto de pronósticos hidrológicos es prácticamente nula, y el pronóstico acierta tanto en magnitud como en la categorización del evento (alerta amarilla).

En contraste, los pronósticos generados con MSWX-Mid representan adecuadamente la magnitud del evento con dos días de anticipación, aunque la mediana se ubica por sobre el valor observado. De forma contraintuitiva, un día antes del evento la dispersión se reduce, pero se produce una sobrestimación marcada del caudal, lo que sugiere posibles inconsistencias en el comportamiento del ensamble a medida que se aproxima la fecha del evento, alejándose del supuesto de convergencia esperada en pronósticos de corto plazo.

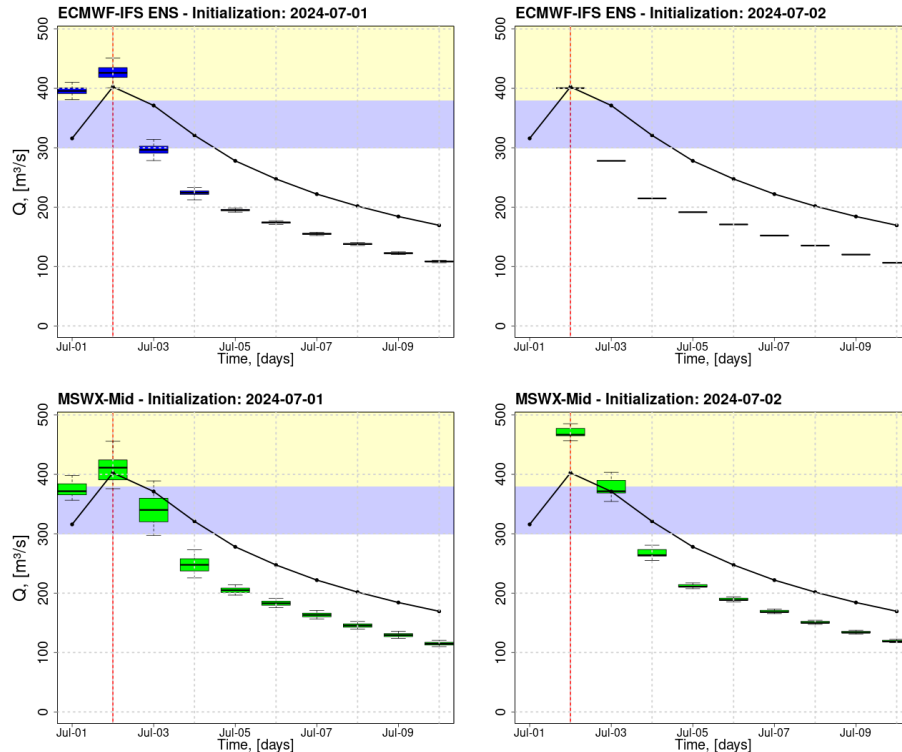


Figura 6: Comparación de rendimiento entre los pronósticos hidrológicos generados a partir de ECMWF-IFS ENS y MSWX-Mid luego de acoplarlo con TUWmodel, considerando un evento de caudales altos durante julio de 2024 en la cuenca del Río Trancura antes de Llafenco

5. CONCLUSIONES

Este trabajo presentó el desarrollo de un prototipo de sistema de alerta temprana de inundaciones para cuencas críticas de la Región de La Araucanía, basado en la integración de TUWmodel con conjuntos de pronósticos meteorológicos corregidos por sesgo mediante QDM. La estructura del sistema permite evaluar el riesgo de inundación basándose en el pronóstico de caudales con respecto a umbrales de alerta definidos, contribuyendo a mejorar la anticipación ante eventos extremos.

Los resultados retrospectivos mostraron que, para el evento de septiembre de 2023, el conjunto ECMWF-IFS ENS corregido por sesgo permitió anticipar correctamente una alerta roja con hasta 9 días de anticipación en la cuenca del Trancura. En cambio, en las cuencas del Cautín y Allipén, el sistema logró predecir adecuadamente los caudales peak solo 3 y 2 días antes del evento, respectivamente.

Para el evento de julio de 2024, ambos conjuntos meteorológicos (ECMWF-IFS ENS y MSWX-Mid) hubiesen permitido emitir una alerta amarilla con 2 días de anticipación. En este caso, MSWX-Mid mostró menor sesgo en el horizonte de 2 días, mientras que ECMWF-IFS ENS presentó menor sesgo a 1 día del evento.

Estos resultados evidencian el potencial del sistema para anticipar crecidas relevantes con distintos niveles de incertidumbre según la cuenca y el horizonte de pronóstico. No obstante, se destaca la

necesidad de contar con registros más extensos de MSWX-Mid para evaluar adecuadamente su capacidad predictiva.

Se espera que este sistema prototipo esté próximamente disponible en línea, como herramienta de apoyo para el pronóstico de inundaciones a mediano plazo en cuencas críticas del sur andino de Chile.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo agradecen el financiamiento proporcionado por los proyectos PCI CONICYT Chile – NSFC China NSFC190018 (“Management of global change impacts on hydrological extremes by coupling remote sensing data and an interdisciplinary modelling approach”) y Fondecyt Regular 1212071 (“The catchment’s memory: understanding how hydrological extremes are modulated by antecedent soil moisture conditions in a warmer climate”).

REFERENCIAS

- Alfieri, L., Bisselink, B., Dottori, F., Naumann, G., de Roo, A., Salamon, P., Wyser, K., & Feyen, L. (2017). Global projections of river flood risk in a warmer world. *Earth's Future*, 5(2), 171-182. <https://doi.org/10.1002/2016EF000485>
- Alfieri, L., Burek, P., Dutra, E., Krzeminski, B., Muraro, D., Thielen, J., & Pappenberger, F. (2013). GloFAS: global ensemble streamflow forecasting and flood early warning. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(3), 1161-1175. <https://doi.org/10.5194/hess-17-1161-2013>
- Amjad, M., Yilmaz, M. T., Yucel, I., Yilmaz, K. K., & Öztürk, K. (2024). Investigating the comparative utility of ECMWF precipitation forecasts as an alternative to reanalysis data. *Hydrological Sciences Journal*, 69(8), 1060-1081. <https://doi.org/10.1080/02626667.2024.2355204>
- Ávila Mercado, C. A. (2018). *Propuesta de actualización del sistema de alerta de crecidas en Chile usando redes neuronales e hidrogramas unitarios* [Tesis de pregrado, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Civil]. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/167794>
- Beck, H. E., Dijk, A. I. J. M. van, Larraondo, P. R., McVicar, T. R., Pan, M., Dutra, E., & Miralles, D. G. (2022). MSWX: Global 3-Hourly 0.1° Bias-Corrected Meteorological Data Including Near-Real-Time Updates and Forecast Ensembles. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 103, E710-E732. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-21-0145.1>
- Beck, H. E., McVicar, T. R., Vergopolan, N., Berg, A., Lutsko, N. J., Dufour, A., Zeng, Z., Jiang, X., van Dijk, A. I. J. M., & Miralles, D. G. (2023). High-resolution (1 km) Köppen-Geiger maps for 1901–2099 based on constrained CMIP6 projections. *Scientific Data*, 10(1), 724. <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02549-6>
- Bergström, S. (1976). *Development and Application of a Conceptual Runoff Model for Scandinavian Catchments* (No. 7; Reports RHO). Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI).
- Cannon, A. J., Sobie, S. R., & Murdock, T. Q. (2015). Bias Correction of GCM Precipitation by Quantile Mapping: How Well Do Methods Preserve Changes in Quantiles and Extremes? *Journal of Climate*, 28(17), 6938-6959. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00754.1>
- Dirección General de Aguas. (2004a). *Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad: Cuenca del río Imperial*. Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile. <https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2017/12/Imperial.pdf>
- Dirección General de Aguas. (2004b). *Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad: Cuenca del río Tolten*. Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile. <https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2017/12/Tolten.pdf>

European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. (2023). *IFS Documentation – Cy48r1, Part V: Ensemble Prediction System*. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). <https://www.ecmwf.int/en/publications/ifs-documentation>

Garcia, F., Folton, N., & Oudin, L. (2017). Which objective function to calibrate rainfall–runoff models for low-flow index simulations? *Hydrological Sciences Journal*, 62(7), 1149–1166. <https://doi.org/10.1080/02626667.2017.1308511>

Grillakis, M. G., Tsanis, I. K., & Koutroulis, A. G. (2010). Application of the HBV hydrological model in a flash flood case in Slovenia. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10(12), 2713–2725. <https://doi.org/10.5194/nhess-10-2713-2010>

Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., & Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377(1), 80–91. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003>

Khazaei, M. R., Zahabiyou, B., & Saghafian, B. (2012). Assessment of climate change impact on floods using weather generator and continuous rainfall–runoff model. *International Journal of Climatology*, 32(13), 1997–2006. <https://doi.org/10.1002/joc.2416>

Lin, Q., Liu, S., Zhu, Q., Tang, C., Song, R., Chen, J., Coello, C. A. C., Wong, K.-C., & Zhang, J. (2018). Particle Swarm Optimization With a Balanceable Fitness Estimation for Many-Objective Optimization Problems. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 22(1), 32–46. <https://doi.org/10.1109/TEVC.2016.2631279>

Marinao-Rivas, R., & Zambrano-Bigiarini, M. (2021). Towards best default configuration settings for NMPSO in multi-objective optimization. *2021 IEEE Latin American Conference on Computational Intelligence (LA-CCI)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/LA-CCI48322.2021.9769844>

Marinao-Rivas, R., & Zambrano-Bigiarini, M. (2025). *hydroMOPSO: Multi-Objective Optimisation with Focus on Environmental Models*. <https://CRAN.R-project.org/package=hydroMOPSO>

Mizukami, N., Rakovec, O., Newman, A. J., Clark, M. P., Wood, A. W., Gupta, H. V., & Kumar, R. (2019). On the choice of calibration metrics for “high-flow” estimation using hydrologic models. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(6), 2601–2614. <https://doi.org/10.5194/hess-23-2601-2019>

Nevo, S., Morin, E., Gerzi Rosenthal, A., Metzger, A., Barshai, C., Weitzner, D., Voloshin, D., Kratzert, F., Elidan, G., Dror, G., Begeleman, G., Nearing, G., Shalev, G., Noga, H., Shavitt, I., Yuklea, L., Royz, M., Giladi, N., Peled Levi, N., ... Matias, Y. (2022). Flood forecasting with machine learning models in an operational framework. *Hydrology and Earth System Sciences*, 26(15), 4013–4032. <https://doi.org/10.5194/hess-26-4013-2022>

Oudin, L., Hervieu, F., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V., Anctil, F., & Loumagne, C. (2005). Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall–runoff model?: Part 2—Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall–runoff modelling. *Journal of Hydrology*, 303(1), 290–306. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.08.026>

Parajka, J., Merz, R., & Blöschl, G. (2007). Uncertainty and multiple objective calibration in regional water balance modelling: Case study in 320 Austrian catchments. *Hydrological Processes*, 21(4), 435–446. <https://doi.org/10.1002/hyp.6253>

Rhodos. (2010). *Determinación de los umbrales de alerta de caudales, lluvias y temperaturas del sistema de transmisión de datos de la DGA*. Rhodos Asesorías y Proyectos Ltda. <https://bibliotecadigital.ciren.cl/items/df3a30f5-50ef-4d35-b5f2-7ca3852da2bf>

Széles, B., Parajka, J., Hogan, P., Silasari, R., Pavlin, L., Strauss, P., & Blöschl, G. (2020). The Added Value of Different Data Types for Calibrating and Testing a Hydrologic Model in a Small Catchment. *Water Resources Research*, 56(10), e2019WR026153. <https://doi.org/10.1029/2019WR026153>

Thielen, J., Bartholmes, J., Ramos, M.-H., & de Roo, A. (2009). The European Flood Alert System – Part 1: Concept and development. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(2), 125–140. <https://doi.org/10.5194/hess-13-125-2009>

Viglione, A., & Parajka, J. (2020). *TUWmodel: Lumped/semi-distributed hydrological model for education purposes*. <https://CRAN.R-project.org/package=TUWmodel>