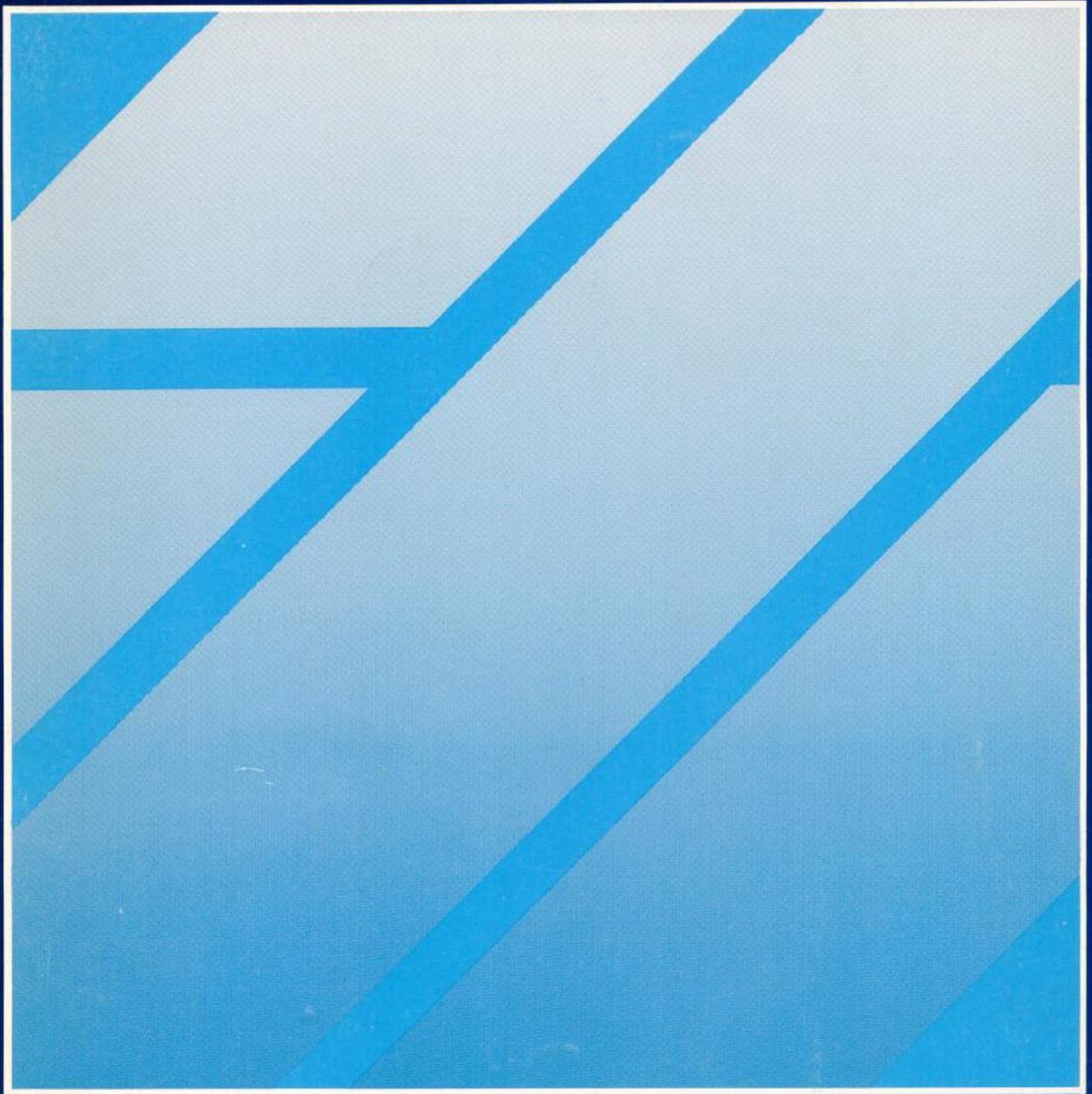




**Revista de la Sociedad Chilena
de Ingeniería Hidráulica**



ISSN 0716-3746 Volumen 39, Número 3, 2024

REVISTA DE LA
SOCIEDAD CHILENA DE
INGENIERÍA HIDRÁULICA

SOCHID

Sede Instituto de Ingenieros de Chile – San Martín 352 – Fono 2 2698 4028 – Santiago CHILE

DIRECTORIO SOCHID

Presidente: Jorge Gironás L.
Vicepresidenta: Pamela Muñoz
Tesorero: Damaris Orphanópoulos S.
Directores: Hernán Alcayaga S.
Aldo Tamburrino T.
Scarlett Vásquez P.
Secretario General: Vicente Zuazo E.

DIRECTORES HONORARIOS

Francisco J. Domínguez S. (Q.E.P.D.)
Horacio Mery M.
Eduardo Varas C.
Sergio Radrigán V.
Humberto Peña T.
Ernesto Brown F. (Q.E.P.D.)
Bonifacio Fernández L.
Jorge Bravo S
Luis Ayala R.
Ludwig Stowhas B.
Ricardo González V.
José Vargas B.
Luis Estellé A.
Raúl Demangel C.

EDITOR DE LA REVISTA

Aldo Tamburrino Tavantzis
atamburr@ing.uchile.cl
San Martín 352, Santiago
Fono 2 2698 4028
www.sochid.cl

Imagen de la portada: Diseño usado en el primer número de la Revista en 1986

REVISTA DE LA SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

ÍNDICE

Editorial	1
Invitación para contribuir con artículos en un número especial dedicado a flujos destrúcticos	3
Domingo Víctor Santa María y la Hidráulica de Puentes Oscar Link, Diego Mundaca	5
Simulation of Surface Water Quality Under Future Climate Change Scenario in the Serrano River Basin, Southern Chile Consuelo Alcarruz, Katherine Lizama-Allende, Alida Pérez-Fodich, Matías Peredo, Ximena Vargas, Hernan Latuz	19
Modelo Híbrido para Pronóstico de Caudales de Deshielo en Cuencas de Chile Central Francisco Jara, Diego Hernández, Pablo Mendoza, María Ignacia Orell, James Mcphee	33
Hidro-Grafía Aldo Tamburrino Tavantzis	57

EDITORIAL

Por tercer año consecutivo la Revista ha logrado editar tres números al año, con aportes de autores nacionales como extranjeros, a quienes agradecemos su contribución. La invitación continúa para todos aquellos que deseen colaborar con artículos para los próximos números, en cualquier tema relacionado con agua, fluidos y flujos en general.

El 4 de junio se llevó a cabo la Asamblea Anual de Socios, en la que se debía elegir dos directores para reemplazar a los ingenieros Hernán Alcayaga y Cristian Núñez, resultando elegida la ingeniera Scarlett Vásquez y reelecto Hernán Alcayaga. La charla magistral con la que se cerró la Asamblea estuvo a cargo del ingeniero y profesor Juan Velázquez, quien presentó “Inteligencia Artificial e Hidráulica: *The Good, The Bad, and The Ugly* de la Innovación Tecnológica”. En una reunión de directorio posterior fue elegido presidente de la Sociedad el director Jorge Gironás.

Durante este año, los días 22 y 23 de octubre, se desarrolló las XVII Jornadas Francisco Javier Domínguez, organizadas por el Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental de la Pontificia Universidad Católica de Chile, en conjunto con SOCHID, bajo el lema “Desde los datos a las decisiones: El poder de la información en la gestión integrada de cuencas”. La SOCHID también participó en la organización del X SIOP, Seminario Internacional de Ingeniería y Operación Portuaria, el que tuvo lugar en Antofagasta entre el 6 y el 8 de noviembre. Ambos eventos fueron exitosos, con una masiva concurrencia.

El año que comienza tendrá dos eventos importantes: el IV CChIASA (Cuarto Congreso Chileno de Ingeniería Ambiental en Sistemas Acuáticos) y el XXVII Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica, ambos en Concepción. Este último es la actividad bianual más importante de nuestra Sociedad, organizado en esta oportunidad por el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Concepción, y programado entre el 20 y 25 de octubre.

Este año se confirmó que Chile será la sede del XXXII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, a desarrollarse el 2026 y cuya organización la lidera el Instituto Nacional de Hidráulica, con el apoyo de la SOCHID.

En este último número de la Revista para 2024 se presentan tres artículos técnicos, uno de ellos de gran importancia para la historia de la hidráulica chilena, en el que se presenta la pionera investigación realizada por Domingo Santa María relativa a la socavación local en pilas de puentes.

Como siempre, agradeceremos la difusión de la Revista, cuyos números anteriores pueden descargarse del sitio web de la SOCHID, www.sochid.cl/publicaciones-sochid/revista-sochid/

Aldo Tamburrino Tavantzis
Editor

INVITACIÓN PARA CONTRIBUIR CON ARTÍCULOS EN UN NÚMERO ESPECIAL DEDICADO A FLUJOS DETRÍTICOS

El 25 de marzo de 2025 se cumplen 10 años del evento meteorológico que gatilló una gran cantidad de aluviones en el norte del país, entre las regiones de Coquimbo y Antofagasta. Por esta razón, la Revista desea conmemorar dicho evento con un número especial dedicado a flujos detríticos o aluviones, en su espectro más amplio, incluyendo condiciones de generación (climáticas, geológicas, geotécnicas), mecánica del flujo, modelación numérica y física, aspectos sociales, etc. De este modo, invitamos a todos los interesados en contribuir con artículos científicos, casos de la práctica profesional, columnas de opinión, y comentarios.

Originalmente se había establecido como fecha límite para recibir contribuciones el 15 de enero de 2025. Como enero y, especialmente, febrero son meses de vacaciones de verano, algunos de los potenciales autores de artículos solicitaron aplazar la fecha de entrega de los artículos. Considerando lo anterior, se recibirán contribuciones hasta el 30 de marzo.

Consultas respecto al formato de los artículos, así como su envío deben hacerse al editor de la Revista a la dirección atamburr@uchile.cl .

DOMINGO VÍCTOR SANTA MARÍA Y LA HIDRÁULICA DE PUENTES

OSCAR LINK¹, DIEGO MUNDACA²

¹Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción

olink@udec.cl

ORCID: 0000-0002-2188-6504

²Departamento de Historia, Facultad de Humanidades y Arte, Universidad de Concepción

dmundaca@udec.cl

ORCID: 0000-0002-2188-6504

RESUMEN

A fines del siglo XIX Chile impulsó el desarrollo del ferrocarril. Particularmente, la línea que unía Santiago con el Sur del país presentaba desafíos importantes a la ingeniería hidráulica, para fundar adecuadamente los puentes que cruzaban ríos torrenciales. Muchos de estos puentes siguen en operación en la actualidad y algunos han presentado problemas originados por una socavación excesiva. Buscando la respuesta a la pregunta: ¿Cómo fueron diseñados estos puentes? el presente artículo analiza una parte de la notable obra del ingeniero y profesor Domingo Santa María, quien se encargara del diseño y construcción de muchos de los puentes ferroviarios del país y se preocupara de publicar, principalmente en los Anales del Colegio de Ingenieros, sus hallazgos más relevantes para la Ingeniería. Se presenta una revisión de los trabajos relacionados con el desarrollo de las primeras fórmulas de socavación y se revisan las publicaciones de Santa María relativas al tema. Se encuentra que Santa María propuso la primera fórmula de cálculo para estimar la socavación alrededor de cepas de puente a nivel mundial. Este hito lo transforma en el primer hidráulico chileno en contribuir significativamente a la disciplina.

Palabras claves: Historia de la hidráulica. Ingeniería de Puentes. Hidráulica fluvial. Transporte de sedimentos. Domingo Santa María.

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

En los últimos años han ocurrido socavaciones importantes en diferentes puentes ferroviarios a lo largo de Chile, lo que motiva la revisión de su diseño original. La Figura 1 muestra fotografías de los puentes Toltén en el año 2016, Cautín en 2018 y Biobío en 2023.



Figura 1. Fotografías de los puentes Toltén en 2016, Cautín en el año 2018 y Biobío en 2023

Cabe preguntarse cuáles fueron las condiciones y formas de cálculo que se consideraron en el diseño, teniendo en cuenta que muchos de estos puentes tienen más de 130 años de antigüedad. Actualmente, en el diseño hidráulico, interesan sobre todo la determinación del caudal de diseño, la cota de aguas máxima y la profundidad máxima de socavación. Se determinaron estas variables de diseño en los proyectos de los puentes ferroviarios construidos en Chile hacia fines del siglo XIX? Cómo se consideraron; Existían fórmulas de cálculo?

Los puentes ferroviarios se comenzaron a construir en la segunda mitad del siglo XIX, tras la llegada del ferrocarril a Chile en 1851. Uno de los primeros proyectos consistió en la construcción del ferrocarril desde Santiago a Valparaíso, que tuvo como finalidad el traslado de trigo al puerto de California, tras la fiebre del oro. El segundo hito, que es el más importante desde el punto de vista histórico, corresponde a la instalación de la red ferroviaria del Norte grande, después del triunfo de Chile en la guerra del pacífico, ya que permitió la ocupación del norte grande y la explotación del salitre que convirtió al país en el primer productor mundial de salitre y lo hizo partícipe del proceso de industrialización, urbanización y modernización de la industria ferroviaria, liderada por las potencias de la época, que eran Inglaterra, Francia y Estados Unidos. El tercer hito fundamental para la historia nacional, fue la instalación de la red ferroviaria en la Araucanía. Después de la toma de Lima por el ejército chileno, a partir de 1881 el contingente militar chileno que volvía de Perú penetró en la Araucanía fundando varios fuertes, entre ellos el que se transformaría en la ciudad de Temuco. El estado decide impulsar la construcción de la línea férrea desde Santiago al Sur, como una manera de conectar el territorio nacional, favorecer el desarrollo de la industria local, especialmente minera, conectar las localidades dispersas y favorecer el intercambio comercial.

En este contexto, es notable la figura del ingeniero Domingo Víctor Santa María Márquez de la Plata, quien nació el 6 de marzo de 1854 en Santiago. Su padre fue un destacado político que ocupó la presidencia entre 1881 y 1886. A la edad de 20 años, Santa María se tituló de ingeniero geógrafo en la Universidad de Chile, y un año más tarde, de ingeniero en minas en la misma universidad. Es notable en este punto, la influencia del geólogo polaco Ignacio

Domeyko, quien siendo rector de la Universidad de Chile impulsó la creación de la Escuela de Ingenieros (Serrano, 2004; Anales UDCH,1872). Posteriormente, Santa María se trasladó a Bélgica, donde cursó los estudios para graduarse de ingeniero civil en 1878 en la Universidad de Gantes -la misma universidad donde L. J. Tison fundara el laboratorio de hidráulica en 1935-.

A su regreso de Europa, y siguiendo las ideas impulsadas por Domeyko de imitar la educación francesa de la época, de manera que los ingenieros sirvieran al estado y pudieran ir supliendo la influencia de ingenieros extranjeros que las compañías acostumbraban a contratar (Sagredo, 2011), Santa María trabajó como ingeniero para el gobierno chileno en varios proyectos de ferrocarriles, puertos y puentes. Paralelamente inició su carrera política, siendo diputado en dos periodos consecutivos, 1879-1884 y 1885-1888. Posteriormente, fue Director General de Obras Públicas en 1888, y luego pasó a ser inspector técnico encargado de la adquisición de trenes para el estado chileno, para lo cual vivió dos años en Europa. De regreso en Chile en 1891, asumió por segunda vez el cargo de Director General de Obras Públicas, hasta el 14 de mayo de 1895 (Instituto de Ingenieros de Chile, 1919). La figura de Domingo Santa María Márquez de la plata, fue central, porque su participación en la construcción de vías ferroviarias en el desierto de Atacama, como la de Refresco a Taltal que fue parte del *ferrocarril salitrero de Taltal*; los diversos puentes que conectaron la Araucanía y del dique de Talcahuano, lo hacen acreedor de un lugar capital en la ocupación del territorio efectivo, por parte del estado de Chile, liderado por los llamados gobiernos liberales de fines del siglo XIX y principio del XX.

Posteriormente, Santa María comenzó una carrera académica. Fue profesor de la Universidad de Chile entre 1899 y 1919. Impartió los cursos de puentes y ferrocarriles y fue decano de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas desde 1907 hasta 1909. La Figura 2 muestra una fotografía de Santa María durante su periodo como decano.



Figura 2. Fotografía de Santa María durante su periodo como decano en la Universidad de Chile

Santa María publicó más de 40 comunicaciones en los Anales de la Universidad de Chile y en los Anales del Instituto de Ingenieros de Chile sobre diversos temas de ingeniería, como la planificación de ferrocarriles, el uso de acero dulce en puentes ferroviarios, los flujos de

escombros, la socavación en puentes y el abastecimiento de agua potable en las ciudades. Santa María falleció el 11 de diciembre de 1919, a la edad de 65 años.

Uno de los focos de la gran obra del Ingeniero y Profesor Santa María fue el diseño y construcción de los puentes ferroviarios. En el presente artículo se revisan los trabajos de Santa María relacionados con el diseño hidráulico de puentes y se demuestra cómo estos hallazgos científicos, de orden matemático, otorgaron solución a los problemas de socavación en una difícil geografía. A continuación se presenta una revisión de la literatura especializada que evidencia el contexto histórico en que Santa María propuso sus fórmulas – las primeras a nivel mundial!- para estimar la socavación. Se revisan las publicaciones que Santa María realizó en Chile y en el 1er Congreso Panamericano de Ciencias, frente a una audiencia internacional.

2. LOS PRIMEROS ESTUDIOS PUBLICADOS SOBRE SOCAVACIÓN

La investigación sobre la socavación de puentes se inició formalmente con los experimentos de Durand-Claye (1873) y Engels (1894). Estos primeros experimentos mostraron cómo responder cuestiones básicas y prácticas de ingeniería, tales como por ejemplo, qué forma de cepa es más eficaz para reducir la socavación: rectangular, redondeada, lenticular u ojival; y, dónde se produce la máxima profundidad de socavación alrededor de la cepa de un puente: aguas arriba, al lado, o aguas abajo de la cepa. Durante un intervalo de aproximadamente 25 años, entre 1895 y 1920, no se publicaron estudios sobre la socavación alrededor de cepas de puente. La razón de este vacío en la investigación sobre socavación se atribuye al hecho de que los investigadores concentraron sus esfuerzos en estudiar el flujo alrededor de obstáculos centrándose en los efectos de remanso y sus consecuencias para la navegación.

Rehbock (1921) publicó estudios sobre la socavación de puentes específicos para el río alemán Wiesent, cerca de la ciudad de Nüremberg, mientras que Yarnell y Nagler (1931) estudiaron el caso de una cepa del puente de hormigón armado estándar de Carolina del Norte. Keutner (1932), Tison (1940), Ishihara (1942), Chabert y Engeldinger (1956) y Laursen y Toch (1956) realizaron caracterizaciones detalladas de la geometría de la socavación en diferentes condiciones experimentales. Fueron capaces de identificar los efectos de la velocidad del flujo y su ángulo de ataque, la profundidad del flujo, el tamaño del sedimento y del tamaño y forma de la cepa sobre la socavación. Laursen y Toch (1956) declararon: «Ni estos primeros experimentos ni los estudios posteriores realizados por diversos investigadores en varios países han sido lo suficientemente generales como para obtener el resultado deseado: una fórmula para estimar la socavación alrededor de puentes». La fórmula de socavación alrededor de cepas de puente más antigua presentada en la revisión del estado del arte por Breusers et al. (1977), -y que fue confirmada posteriormente por Sheppard et al. (2014)- es la de Inglis (1944, 1949). Esta fue desarrollada usando datos de 17 puentes de la India y Pakistán recogidos entre 1924 y 1942 y se basa en el método de Lacey (Lacey, 1930) para la estimación de la profundidad de régimen.

3. SERIE DE ARTICULOS PUBLICADA EN LOS ANALES DEL COLEGIO DE INGENIEROS EN EL AÑO 1901

En una serie de comunicaciones tituladas *Puentes Chilenos* (Santa María 1901a, b, c, d), Santa María dio cuenta de sus observaciones sobre el comportamiento de distintos ríos ubicados en el centro-sur de Chile, entregando recomendaciones dirigidas al ingeniero práctico, con especial énfasis en las fundaciones de los puentes, distinguiendo entre fundaciones directas y profundas.

Tras una introducción, describió el comportamiento de los ríos de montaña basándose en observaciones de los ríos ubicados entre el Maipo y el Toltén. Luego, presentó una fórmula para la socavación general del cauce. Posteriormente, su principal contribución consistió en un análisis de la socavación alrededor de las fundaciones de varios puentes en condiciones de crecida, para lo cual usó datos y observaciones de las crecidas ocurridas en los años 1868, 1877, 1878, 1884, 1885, 1888 y 1898-1900.

Santa María analizó 16 casos de estudio con fundaciones directas, incluido el puente Cal y Canto, que fue construido por los conquistadores españoles en 1779 sobre el río Mapocho y que colapsó varias veces durante la colonia (Rosales, 2019) y otros 35 casos con fundaciones profundas, incluyendo el puente Maule cerca de la ciudad de Constitución, al cual Santa María dedicó una serie de cinco comunicaciones sobre su construcción (Santa María 1898, 1899a, b, c, d), y el puente Biobío en la ciudad de Concepción, con una longitud de 1899 m y fundado en un lecho arenoso (Manby, 1892).

Santa María comenzó a desarrollar sus fórmulas con datos de los puentes ubicados a lo largo del Valle Central, ya que entre la ciudad de Santiago y el río Toltén, hacia el este, la Cordillera de los Andes, y hacia el oeste, la Cordillera de la Costa, agregarían dificultades adicionales significativas para el desarrollo del ferrocarril debido a las altas pendientes. Señala que durante las crecidas, los ríos de esta zona presentan caudales torrenciales y, al mismo tiempo, los cauces están compuestos de grava y cantos rodados. Para la socavación general del lecho en los sitios de los puentes, propuso que la velocidad de corte sobre el lecho u_* es capaz de producir socavación general si se excede la velocidad de corte crítica u_{*c} para el inicio del movimiento de sedimentos, definiendo el exceso de velocidad de corte como:

$$\Delta u_* = u_* - u_{*c} \quad (1)$$

Si bien la Ec. (1) fue propuesta por Santa María más de 30 años antes que los desarrollos de Kramer (1935), Hjulström (1935) y Shields (1936) sobre el transporte incipiente, en la época ya se conocía el fenómeno y existía información tabulada sobre la velocidad de corte crítica para el inicio del movimiento de algunos sedimentos, como las mostradas en la Figura 3 (Santa María, 1901a).

ANEXO

Velocidades de arrastre dadas por las observaciones de los señores DuBuat i Telford:

	Velocidad de fondo en metro por un l."
Tierra suelta.....	0.076
Arcilla parda propia para la cerámica	0.081
Arcilla blanda.....	0.152
Arenas depositadas por las arcillas de la cerámica.....	0.162
Arenas del Sena del grosor de un grano de anís.....	0.108
„ „ del tamaño de una arveja.....	0.189
Arena corriente.....	0.305
Gravas del Sena	0.325
Gravas corrientes finas.....	0.609
Gravas de 0.025 metro de diámetro máximo.....	0.650
Gravas gruesas	0.914
Gravas de piedra angulosa de fusil, del tamaño de un huevo de gallina	0.975
Piedra chancada	1.220
Grava aglomerada o esquita blanda.....	1.520
Rocas en capas o gravas de grandes dimensiones	1.830
Rocas duras.....	3.950

DOMINGO V. SANTA MARÍA
Ingeniero civil i de minas.

Figura 3. Velocidades de corte críticas para algunos sedimentos (Santa María, 1901a)

La profundidad de socavación general del lecho, d_{sg} , fue propuesta por Santa María como una cantidad que varía proporcionalmente con la profundidad de flujo h , y con el exceso de velocidad de corte. Así, Santa María propuso:

$$\frac{d_{sg}}{h} = \frac{\Delta u_*}{d_{sg}} \quad (2)$$

y, por tanto, la profundidad de erosión generalizada, d_{sg} es:

$$d_{sg} = \sqrt{h \Delta u_*} \quad (3)$$

Para estimar la socavación alrededor de cepas de puente Santa María reconoció la formación de vórtices que actúan incrementando la socavación localmente alrededor de un obstáculo. Sostuvo que, según la literatura especializada de la época -fundamentalmente basada en los contenidos de la revista francesa, *les Annales des Ponts et Chaussées*, creada en 1831-, se entendía que el potencial de socavación de los vórtices aumenta con el cuadrado de la velocidad media del flujo. Sin embargo, Santa María dudó de tal relación entre la profundidad de socavación y la velocidad del flujo debido a los resultados poco realistas que obtuvo en algunas aplicaciones a casos prácticos. Notablemente, sus conclusiones concuerdan con la bibliografía más reciente sobre socavación (Dey y Ali, 2024; Ali y Dey, 2024). Santa María explica que un aumento de la fricción interna causada por las partículas de sedimento en movimiento, el transporte de fondo y la carga en suspensión podrían ser responsables de una reducción de la socavación, que no es proporcional al cuadrado de la velocidad media del flujo. Con estas argumentaciones, Santa María propuso que la profundidad de socavación local d_s es proporcional a la velocidad del flujo en la superficie libre, u_s , a la velocidad de corte, a la profundidad del flujo y a la resistencia del lecho expresada a través de la velocidad de corte crítica. Tomando la velocidad de corte igual a 0.65 veces la velocidad de flujo en la superficie, Santa María propuso la siguiente fórmula empírica para estimar la profundidad máxima de socavación alrededor de cepas y estribos de puente:

$$d_s = h \left(\frac{0.65u_s - u_{*c}}{u_s - 0.65u_s} \right) \quad (4)$$

Las fórmulas de socavación propuestas para estimar las profundidades de socavación general del lecho y de socavación local alrededor de las cepas y estribos de puente se validaron comparando las profundidades de las fundaciones con las profundidades de socavación calculadas para cada caso de estudio, verificando si se predecía o no la ocurrencia del colapso del puente durante las crecidas de las que se tenía registro como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Profundidades de socavación observadas y calculadas

Puente	Año de la crecida	u_s	u^*_c	h	d_s cal	u_s/u^*_c	d_s cal / h	d_s obs	Profundidad del sello fundación	Falla?	Fuente
Mapocho en San Francisco del Monte	1900	6.0	1.8	3.4	3.40	3.3	1.0	3.50	N/A	NO	Santa María (1909): 85
La Purísima	antes de 1877	7.0	1.8	3.5	3.93	3.9	1.1	N/A	6.0	NO	Santa María (1909): 86
La Purísima	1877 y 1878	8.0	1.8	4.0	4.86	4.4	1.2	N/A	6.0	NO	Santa María (1909): 86
Maule	Crecidas de verano 1875–1882	7.0	1.8	4.2	4.71	3.9	1.1	~ 5.00	N/A	NO	Santa María (1909): 87
Maule	1877	7.3	1.8	5.0	5.76	4.1	1.2	6.00	N/A	NO	Santa María (1909): 87
Maule	1899	8.0	1.8	6	6.80	4.4	1.2	6.25	N/A	NO	Santa María (1909): 87
Maule	1900	9.0	1.8	7	8.36	5.0	1.3	N/A	10*	Sí	Santa María (1909): 88; *: Santa María (1901b): 315
Mapocho en Talagante	1900	8.0	1.5	6	7.27	5.3	1.3	N/A	7.5	Sí	Santa María (1909): 89-90
Río Claro en Yumbel	Valores típicos de crecidas	3.54	0.2 5	4	5.79	14.2	1.7	N/A	8	No	Santa María (1909): 90

	Valores típicos de crecidas extremas	0.2	8.53	5	4	6.21	34.1	1.8	>8	8	Sí	Santa María (1909): 90
Río Claro en Yumbel												
Tinguiririca	1900	10	1.6	5	7.00	6.3	1.4	N/A	7*	7	Yes	Santa María (1909): 91; *: Santa María (1901a): 83
Teno Sur	1900	10	1.8	5	4	5.31	5.4	1.3	3	7	NO	Santa María (1901a): 86
Río Claro en Yumbel	1899	2.31	0.3	4	5.20	7.7	1.5	N/A	4	4	Sí	Santa María (1901a): 89-92
Cachapoal	1888	8.5	1.4	4	5.55	6.1	1.4	4	4	6	NO	Santa María (1901b): 296-298

Es notable la buena concordancia entre los valores calculados y las observaciones.

Los resultados más importantes contenidos en la serie de artículos titulados *Puentes Chilenos* (Santa María 1901a, b, c, d), que básicamente consistían en proponer una fórmula para estimar la socavación, fueron presentados por Santa María ante más de 600 participantes en el IV Congreso Científico Latinoamericano y I Congreso Científico Panamericano, realizado en Santiago de Chile (Holmes 1909). Su ponencia, titulada “subterranean waters of torrential rivers se publicó en español en los anales del Colegio de Ingenieros de Chile bajo el título “Experiencias en ríos chilenos” (Santa María, 1909). En él se introducen las dos fórmulas de socavación, Ecuaciones (2) y (4), para la estimación de las profundidades de socavación general y local en puentes, respectivamente. Utilizando los datos correspondientes a una crecida extrema ocurrida en agosto de 1900, la fórmula para la estimación de la socavación general del lecho fue validada con datos de los puentes Estero de Limache, Estero de Lampa y Río Claro de Yumbel, y la fórmula para la estimación de la profundidad máxima de socavación alrededor de cepas de puente fue validada para los puentes Mapocho en Talagante, Nuevo Río Claro de Yumbel, puente Tinguiririca y puente Teno.

4. DISCUSION ACERCA DE LAS FÓRMULAS DE SANTA MARÍA

4.1 Datos de entrada para las fórmulas de Santa María

Las dos fórmulas de socavación de Santa María fueron desarrolladas para ser aplicadas a la condición de diseño, es decir, condiciones impuestas por una crecida extraordinaria. A fines del siglo XIX, en Chile, el registro hidrometeorológico no se realizaba de forma masiva ni sistemática. Por lo general, se disponía de información recabada por algunas personas de servicios públicos durante algunos eventos particulares. En este sentido el compendio de los climas de Chile Vicuña (1877) proporcionaba (y proporciona) una buena descripción de las inundaciones y sequías durante el siglo XIX (Jana et al., 2019).

Santa María estimaba la velocidad del flujo en la superficie midiendo el tiempo que tardaba un flotador en recorrer una distancia conocida. En ausencia de tales mediciones, se utilizaba la fórmula de Bazin (Bazin, 1897):

$$\alpha + \frac{\beta}{\sqrt{R}} = \frac{\sqrt{RI}}{u_s} \quad (5)$$

donde R es el radio hidráulico e I es la pendiente longitudinal del tramo del río. Adoptando $\gamma = \beta / \alpha = 2.1$, la velocidad superficial queda:

$$u_s = \frac{87}{I + \frac{\gamma}{\sqrt{R}}} \sqrt{RI} \quad (6)$$

4.2 Estructura de las fórmulas de Santa María

Las dos fórmulas de socavación de Santa María utilizan la diferencia entre la velocidad de corte y la velocidad de corte crítica, reconociendo un exceso de velocidad de corte como principal factor predictivo de la socavación. Estas fórmulas son más avanzadas que las basadas en la teoría del régimen (Lacey, 1930; Inglis, 1949; Blench, 1962), que representan la profundidad de socavación en términos de un caudal específico y de la profundidad del escurrimiento. Por lo tanto, las fórmulas de socavación de Santa María se alinean con las fórmulas modernas de socavación, como las propuestas por Jain y Fischer (1980), Melville (1997) o Sheppard et al. (2014), quienes reconocen la importancia del exceso de velocidad para la predicción de la socavación.

Santa María afirmó que la profundidad de socavación en los pilares de los puentes podría alcanzar hasta 6 - 8 m en condiciones de crecidas extremas. Este límite superior corresponde bien a los valores de profundidad máxima de socavación de equilibrio que se usan actualmente como envolventes de diseño y que oscilan entre 2,5 y 3,0 veces el diámetro de la cepa.

Santa María reconoció la existencia de una distribución vertical de la componente horizontal de la velocidad, señalando que la relación entre la velocidad media del flujo y la velocidad

superficial no es constante, variando de 0.5 a 0.8. Recomendó adoptar un valor de 0.65 para profundidades del flujo de hasta 10 m.

Santa María consideró que la profundidad de socavación general depende de la raíz cuadrada del producto de la profundidad del flujo y el exceso de velocidad de corte, y que la profundidad de socavación local depende de la profundidad del flujo y del exceso de velocidad. Aunque es bien sabido que la forma de la cepa y especialmente su ancho transversal a la dirección principal del escurrimiento son factores importantes que afectan la profundidad de socavación, las fórmulas de socavación de Santa María no consideran la geometría de la cepa.

5. CONCLUSIÓN

Al principio de su carrera profesional, Santa María ejerció más como ingeniero que como investigador. Con el tiempo, se convirtió en un académico y se empeñó en exponer y publicar los conocimientos que había desarrollado. Santa María propuso las primeras fórmulas de socavación alrededor de cepas de puente casi 30 años antes de que Lacey publicara su teoría del régimen y casi 50 años antes de que Inglis publicara su fórmula de socavación, lo que lo convierte en un ingeniero hidráulico notable. Sus fórmulas se desarrollaron a partir de datos de campo de varios puentes ferroviarios chilenos. Incluyen los efectos del flujo y el sedimento en la socavación, muy en línea con las fórmulas utilizadas actualmente. Santa María presentó sus fórmulas de socavación por primera vez ante una audiencia internacional en 1908, tras haber verificado sus conclusiones obtenidas en 1901 con las observaciones realizadas durante las inundaciones extremas de 1900. Así pues, Santa María merece el mérito de haber desarrollado la primera fórmula de socavación alrededor de cepas de puente!

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la política de acceso abierto y el trabajo de digitalización de la biblioteca de la Universidad de Chile, gracias a la cual fue posible revisar la bibliografía publicada por Santa María en los Anales del Colegio de Ingenieros de Chile. También agradecen a Daniel Hesse y Alonso Pizarro por su ayuda en el suministro de bibliografía. Este trabajo fue financiado por la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID) de Chile a través del proyecto Fondecyt 1221341.

REFERENCIAS

- Ali, S. Z., and S. Dey. 2024. "Generalized scaling law of equilibrium scour depth at a cylinder embedded in an erodible bed." *Phys. Fluids* 36 (6): 065155. <https://doi.org/10.1063/5.0214724>
- Annales de la Universidad de Chile (1872). Nr. 41:577-578.
- Bazin, H. 1897. "Etude d'une nouvelles formule pour calcules le débit des canaux découverts." *Ann. des Ponts et Chaussées* 67 (4): 20–70.
- Blench, T. 1962. "Quantitative interrelation of erosion and river regime by regime theory methods." *IAHR Symp., Bari, Italy*, 273–282.

- Breusers, H. N. C., G. Nicollet, and H. W. Shen. 1977. "Local scour around cylindrical piers." *J. Hydraul. Res.* 15 (3): 211–252. <https://doi.org/10.1080/00221687709499645>.
- Chabert, J., and P. Engeldinger. 1956. "Etude des affouillements autour des piles de ponts." Laboratoire National d'Hydraulique, Chatou, France.
- Dey, S., and S. Z. Ali. 2024. "The universal two-fifths law of pier scour." *Phys. Fluids* 36(4): 041401. <https://doi.org/10.1063/5.0200865>.
- Du Buat, P. L. G. 1779. *Principes d'hydraulique*. First edition. Paris: L'imprimerie de Monsieur (in French).
- Durand-Claye, A. A. 1873. "Experiences sur les affouillements." *Ann. des Ponts et Chaussées*, 1er semestre 5 (29): 467–483.
- Edwards, M. P. A. 2001. "La construcción de los Ferrocarriles en Chile 1850–1913." *Revista Austral de Ciencias Sociales* 5: 143-161.
- Engels, H. 1894. *Schutz von Strompfeiler-Fundamenten gegen Unterspülung*. Berlin: Zeitschrift für Bauwesen.
- Hjulström, F. (1935). *Studies of the morphological activity of rivers as illustrated by the River Fyris*. Tesis doctoral. The Geological institution of the University of Upsala.
- Holmes, W. H. 1909. "The First Pan-American Scientific Congress, Held in Santiago, Chile, December 25, 1908-January 6, 1909." *Science* 29 (742): 441–448.
- Inglis C. C. 1944. Maximum depth of scour at heads of guide banks, groins, pier noses and downstream of bridges. Annual Report, CWPRS, Pune, India.
- Inglis, C. C. 1949. *The behaviour and control of rivers and canals*. Central Waterpower, Irrigation and Navigation Research Station, Poona, Res. Publ. 13. India.
- Instituto de Ingenieros de Chile. 1919. "Necrología Don Domingo Víctor Santa María." *Anales del Instituto de Ingenieros de Chile* 1919 (12): 591–598. <https://revistas.uchile.cl/index.php/AICH/article/view/33806>.
- Ishihara, T. 1942. "Experimental study of scour at bridge piers." *Trans. JSCE* 28 (II): 974–1007.
- Jain, S. C., and E. E. Fischer. 1980. "Scour around bridge piers at high flow velocities." *J. Hydraul. Div.* 106 (11): 1827–1842.
- Jana, P., F. Torrejón, A. Araneda, and A. Stehr. 2019. "Drought periods during 18th century in central Chile (33° S): A historical reconstruction perspective revisiting Vicuña Mackenna's work." *Int. J. Climatol.* 39 (3): 1748–1755.
- Keutner, C. 1932. "Strömungsvorgänge an Strompfeilern von verschiedenen Grundrissformen und ihre Einwirkung auf die Fluss-Sohle." *Die Bautechnik* 10 (12):161–170.
- Kramer, H. 1935. "Sand mixtures and sand movement in fluvial model". *Trans. Am. Soc. Civ. Eng.*, 100, 798–838.
- Lacey, G. 1929. "Stable channels in alluviums." *Proc. Inst. Eng.*, Paper No. 4736, 229.
- Laursen, E. M. and A. Toch. 1956. *Scour around bridge piers and abutments*. Bull. No. 4, Iowa Highway Res. Board.
- Manby, E. 1892. "The Arauco railway and Bio-Bio bridge." *Proc. Inst. Civ. Eng.* 108: 318–333.

- Melville, B. W. 1997. "Pier and abutment scour: integrated approach." *J. Hydraul. Eng.* 123 (2): 125–136. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1997\)123:2\(125\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1997)123:2(125)).
- Oppenheimer, R. 1982. "National Capital and National Development: Financing Chile's Central Valley Railroads." *Business History Review* 56 (1): 54–75.
- Rehbock, T. 1921. Transformations wrought in stream beds by bridge piers of various shapes of cross sections and experiments on the scouring action of the circular piers of a skew railroad bridge across the Wiesent River for the Nürnberg Railroad. Hydraulic Laboratory Practice, John R. Freeman, Ed. ASME, New York.
- Rosales, J. A. 2019. *El Puente de Cal y Canto: Historia y tradiciones*. Noche Unánime Editores, Santiago de Chile.
- Sagredo, R. (2011). *Anales del Instituto de Ingenieros de Chile. Ingeniería y Sociedad 1889-1929*. Cámara Chilena de la Construcción. ISBN: 978-956-8306-08-3
- Santa María, D. V. 1898. "Monografía del puente carretero del Maule. Parte 1." *Anales del Instituto de Ingenieros de Chile* 1899 (12): 285–291. <https://revistas.uchile.cl/index.php/AICH/article/view/31383/33131>.
- Santa María, D. V. 1899a. "Monografía del puente carretero del Maule. Parte 2." *Anales del Instituto de Ingenieros de Chile* 1900 (1): 1–6. <https://revistas.uchile.cl/index.php/AICH/article/view/31212/32962>.
- Santa María, D. V. 1899b. "Monografía del puente carretero del Maule. Parte 3." *Anales del Instituto de Ingenieros de Chile* 1900 (2): 43–56. <https://revistas.uchile.cl/index.php/AICH/article/view/31254/33003>.
- Santa María, D. V. 1899c. "Monografía del puente carretero del Maule. Parte 4." *Anales del Instituto de Ingenieros de Chile* 1900(3): 91–102. <https://revistas.uchile.cl/index.php/AICH/article/view/31263/33012>.
- Santa María, D. V. 1899d. "Monografía del puente carretero del Maule. Parte 5." *Anales del Instituto de Ingenieros de Chile* 1900 (4): 129–148. <https://revistas.uchile.cl/index.php/AICH/article/view/31271/33020>.
- Santa María, D. V. 1901a. "Puentes Chilenos I (continuará)." *Anales del Instituto de Ingenieros de Chile* 1901 (2): 59–92. <https://revistas.uchile.cl/index.php/AICH/article/view/31761>.
- Santa María, D. V. 1901b. "Puentes Chilenos VI (continuación)." *Anales del Instituto de Ingenieros de Chile* 1901 (3): 278–318. <https://revistas.uchile.cl/index.php/AICH/article/view/31777>.
- Santa María, D. V. 1901c. "Puentes Chilenos (continuará)." *Anales del Instituto de Ingenieros de Chile* 1901 (4): 415–425. <https://revistas.uchile.cl/index.php/AICH/article/view/31788>.
- Santa María, D. V. 1901d. "Puentes Chilenos (conclusión)." *Anales del Instituto de Ingenieros de Chile* 1901 (5): 510–528. <https://revistas.uchile.cl/index.php/AICH/article/view/31805>.
- Santa María, D. V. 1909. "Determinación de las profundidades de socavación de las aguas corrientes." *Anales del Instituto de Ingenieros de Chile* 1909 (2): 67–96. <https://revistas.uchile.cl/index.php/AICH/article/view/32762>.
- Serrano, S. (2004) *Universidad y Nación, Chile en el siglo XIX*, Ed Universitaria, Santiago.

- Sheppard, D. M., B. Melville, and H. Demir. 2014. "Evaluation of existing equations for local scour at bridge piers." *J. Hydraul. Eng.* 140 (1): 14–23. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.000008](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.000008).
- Shields, A. (1936) *Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung*. Mitteilungen der Preussischen Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau, Heft 26, Berlin.
- Tison, L. J. 1940. "Erosion autour de piles de pont en riviere." *Ann. des Travaux Publics de Belgique* 41 (6): 813–871.
- Vicuña, B. 1877. *Ensayo histórico sobre el clima de Chile (desde los tiempos prehistóricos hasta el gran temporal de julio de 1877)*. Imprenta del Mercurio, Valparaíso, Chile.
- Yarnell, D. L., and F. A. Nagler. 1931. *A report upon a hydraulic investigation of North Carolina standard reinforced concrete bridge pier, No. P-40I-R and modifications thereof*. Iowa Inst. of Hydr. Res., Univ. of Iowa, Iowa City.
- Artículos que forman parte de libros:

ACERCA DE LOS AUTORES

Oscar Link es ingeniero civil, con mención en Hidráulica de la Universidad de Concepción. Se graduó de doctor en ingeniería en la TU-Darmstadt, Alemania, en 2006, con la tesis titulada: Socavación alrededor de una cepa cilíndrica de sección circular. Desde entonces, ha realizado investigación y proyectos de ingeniería relacionados con socavación de puentes. Desde el año 2016 es profesor titular en la Universidad de Concepción.

Diego Mundaca es doctor en historia por la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (2014). Actualmente es profesor asistente del Departamento de Historia de la Facultad de Humanidades y Arte de la Universidad de Concepción. Sus líneas de investigación son la historia cultural e intelectual. Ha sido profesor visitante en la Universidad Nacional Autónoma de México y de la Pontificia Universidad Católica de Chile. Es miembro del Laboratorio de Historia de la Ciencia, Tecnología y Sociedad de la Universidad de Chile y de la Academia de Historia de la Medicina.

SIMULATION OF SURFACE WATER QUALITY UNDER FUTURE CLIMATE CHANGE SCENARIO IN THE SERRANO RIVER BASIN, SOUTHERN CHILE

CONSUELO ALCARRUZ¹, KATHERINE LIZAMA-ALLENDE², ALIDA PÉREZ-FODICH³, MATÍAS PEREDO⁴, XIMENA VARGAS⁵, HERNAN LATUZ⁶

¹Universidad de Chile

consuelo.alcarruz@ug.uchile.cl

²Universidad de Chile

klizama@ing.uchile.cl

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3911-6919>

³Universidad de Chile

aliperez@chile.cl

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3137-4473>

⁴Plataforma de Investigación EcoHyd

matias.peredo@ecohyd.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-9547-7729>

⁵Universidad de Chile

xvargas.uchile@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1502-3574>

⁶Ministerio de Medio Ambiente

hlatuz@mma.gob.cl

ABSTRACT

Climate change affects not only the quantity of surface water but also its quality, which has increased concern over it. The study aims to evaluate the impact of climate change on the surface water quality of the Serrano River basin in Chilean Patagonia. The WASP program modeled key parameters such as dissolved oxygen, pH, temperature, and others for three sub-basins: Las Chinas, Tres Pasos, and Serrano. Preliminary results indicate that the model predicts some parameters more accurately depending on each sub-basin and is sensitive to boundary conditions. The study highlights the challenge of generating future boundary conditions for modeling under a pessimistic scenario, posing a significant obstacle to continuing future work.

Keywords: water quality modeling; climate change; WASP; water quality standards.

1. INTRODUCTION AND OBJETIVES

Given the numerous scientific pieces of evidence, climate change is undeniable and evident globally and locally. It has provoked a change in the statistical distribution of atmospheric patterns, one of the causes being the effect of greenhouse gases concentration (Sanabria et

al., 2009). This causes variations in the hydrological cycle and systems, impacting them significantly (Bates et al., 2008).

Chile is highly vulnerable to climate change, meeting 7 of the 9 vulnerability criteria outlined by the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). Global climate models in Patagonia project that by 2070, the average temperature will increase by 0.9 to 1.4 °C. Similarly, on average, precipitation is projected to decrease by 5.5 to 116 mm (Marquet P.A. et al., 2023). Also, most glaciers have been losing mass in an accelerated way, modifying lakes and fjords that receive glacial meltwater flow (A. Rivera et al., 2023 and R; Hucke-Gaete et al., 2023).

Additionally, several studies have shown that climate change and extreme weather events on water bodies modify the processes of nutrients transformation and transport (Me et al., 2018); these changes decrease the solubility and concentration of dissolved oxygen (Komatsu et al., 2007). However, salinity, suspended sediments, and metals show a mixture of increasing and decreasing trends, exacerbating water quality problems (van Vliet et al., 2023).

The choice of the study area in the Serrano River Basin in Chilean Patagonia is particularly relevant due to its hydrological characteristics, its ecological importance, and its pristine water quality (DGA, 2004). Additionally, it was the first basin in Chile to have a Secondary Environmental Quality Standard for continental water (NSCA by its Spanish acronym) in place since 2010 and which is currently under revision.

It is also essential to address questions about how water quality will respond to variations in flow rates and other environmental factors driven by global change, such as higher temperature, higher solar radiation, and increased CO₂. To this end, models are a valuable tool for understanding and predicting future water quality considering climate change. Currently, in Chile, water quality models have only been developed using the QUAL2K program and the Water Quality Analysis Simulation Program (WASP) to some extent in the basins of the Elqui, Choapa, Cruces, Mataquito, and Mapocho rivers (Cubillos, 2013; Hodali, 2021; Rojas, 2022; Rodríguez, 2021, respectively). However, according to the available literature, no studies have reported the future effects of climate change on water quality.

This study aims at assessing the impact of climate change on the quality of surface water of the Serrano River Basin in Chile. We will generate projections for three sub-basins (Las Chinas, Tres Pasos, and Serrano between Lake Toro and the mouth), which will be simulated individually in WASP. Additionally, we will evaluate future compliance with the basin's NSCA in the corresponding surveillance areas for the selected water quality parameters.

2. METHODS

2.1 Study site

The Serrano River basin, located in southern Patagonia, spans an area of 8,850 km², of which approximately 2177 km² are in the provinces of Santa Cruz in Argentina and 6673 km² in the

Última Esperanza in the Magallanes Region of Chile (Urciuolo & Iturraspe, 2022 and DGA, 2004). This diverse landscape features glaciers, lakes, forested valleys, grasslands, and steppe. It is part of Torres del Paine National Park (UNESCO Biosphere Reserve) and Bernardo O'Higgins National Park (DGA, 2004).

On the western side of the basin, meltwater from the Southern Ice Field feeds a network of proglacial lakes, which connect via the Paine River to the Nordenskjold-Pehoé-Toro Lake system (Lafon et al., 2014; Urciuolo & Iturraspe, 2022). Lake Toro also receives drainage from the eastern basin through rivers such as Las Chinas, Baguales, and Tres Pasos. The Baguales River originates in the Baguales mountain range, forming the watershed divided with the Santa Cruz River basin. The Vizcachas River, flowing from Argentina, joins the Baguales River before it merges with the Las Chinas River. The Don Guillermo River is the last cross-border tributary of the Las Chinas before it flows into Lake Toro. Additionally, Lake Porteño and the Tres Pasos River, both to the south, contribute to Lake Toro.

The Serrano River begins at Lake Toro's outlet, with the Grey River (from Lake Grey) as its first tributary. Additional tributaries include the Tyndall and Balmaceda rivers, which drain glaciers of the same names (Urciuolo & Iturraspe, 2022).

The region's economy heavily depends on tourism, which leverages the area's natural beauty, scientific and cultural heritage, and recreational opportunities such as gastronomy and outdoor activities. Extensive livestock farming, especially cattle ranching near Cerro Castillo, is another significant economic activity. However, tourism and livestock farming are the primary sources of pollution in the region: tourism through the discharge of wastewater from hotels, lodges, and campsites into rivers and livestock farming through diffuse pollution (CENMA, 2010).

For this study, the simulated sub-basins are Las Chinas River (Don Guillermo, Vizcachas, Baguales, and Las Chinas Rivers), Tres Pasos River (Tres Pasos River), and Serrano River (Serrano and Grey Rivers). Figure 1 shows the water network, the water quality, and the hydrometric stations of Dirección General de Aguas (DGA), responsible for the national monitoring network, from which water quality and hydrometeorological data we obtained for the simulation of dissolved oxygen (DO), pH, water temperature (Tw), electrical conductivity (EC), iron (Fe), nitrate (NO_3^-), magnesium (Mg), calcium (Ca) and sulfate (SO_4^{2-}) and the National System of State-Protected Wilderness Areas (SNASPE by its Spanish acronym).

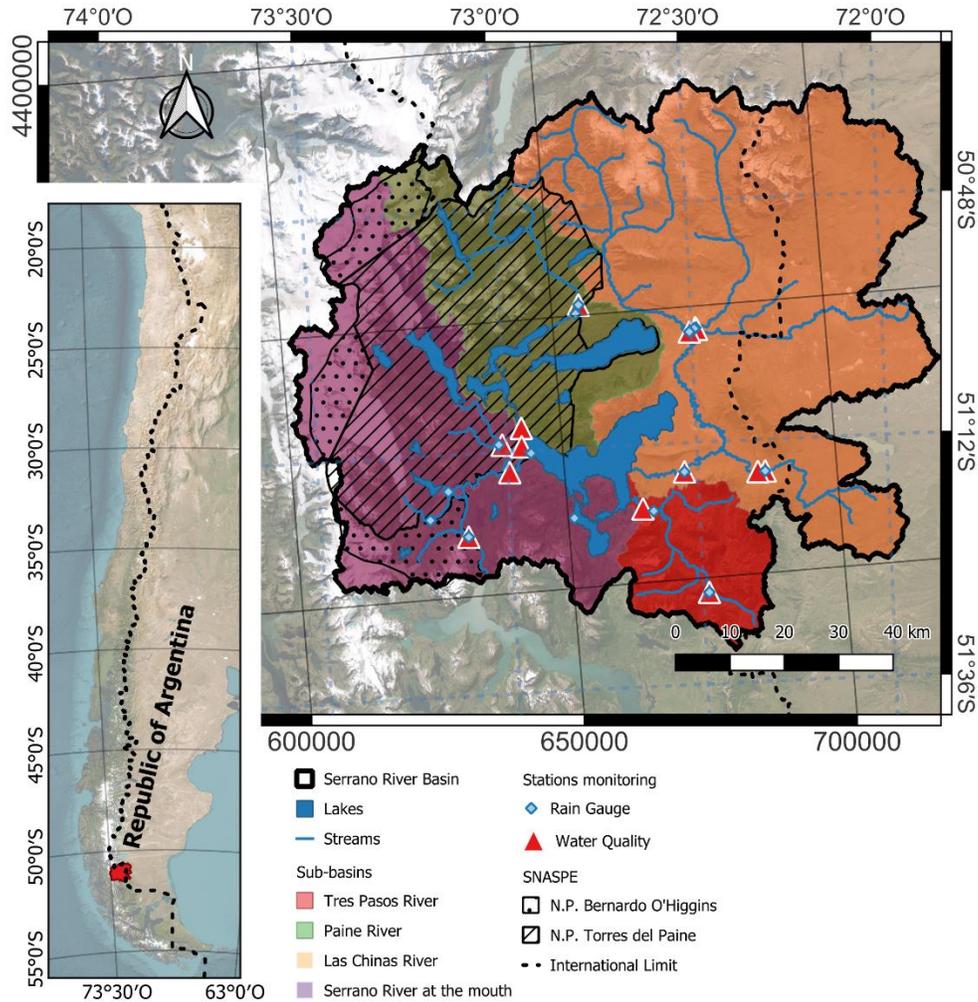


Figure 1. Study Site.

2.2 Model setup

Water Quality Analysis Simulation Program (WASP) is a software developed by the United States Environmental Protection Agency (US EPA) that allows the simulation of the quality of surface water bodies. The program primarily simulates the transport and destination of pollutants according to the diffusion and advection equation (Wool et al., 2020). WASP has two model types: Advanced Eutrophication for conventional water quality pollutants and Advanced Toxic for toxic pollutants.

Three sections of the Serrano basin were selected, each representing a sub-basin; we are developing a model for each section, following the same methodology to simulate water quality in the different streams. The WASP model requires input data such as the geometry of channels (width, length, and slope), local meteorological data (i.e., air temperature, wind speed), flows, the historical records of the selected water quality parameters as boundary conditions, and kinetic parameters and constants for the corresponding reaction (k_r ;

reaeration constant for DO). The geometry of channels was obtained from COPERNICUS Digital Elevation Model 30, local meteorology from gridded products developed by CR2MET, and running and records of parameters from the DGA.

Figure 2 shows the conceptual model for each sub-basin with the corresponding segments of each channel. We formulated each the conceptual model according to the NSCA surveillance areas. The blue arrows represent water flow, the red arrows indicate water extractions, and the brown arrows denote water discharges. Similarly, the color of the segments indicates the presence of flow monitoring stations (blue) and water quality monitoring stations (yellow).

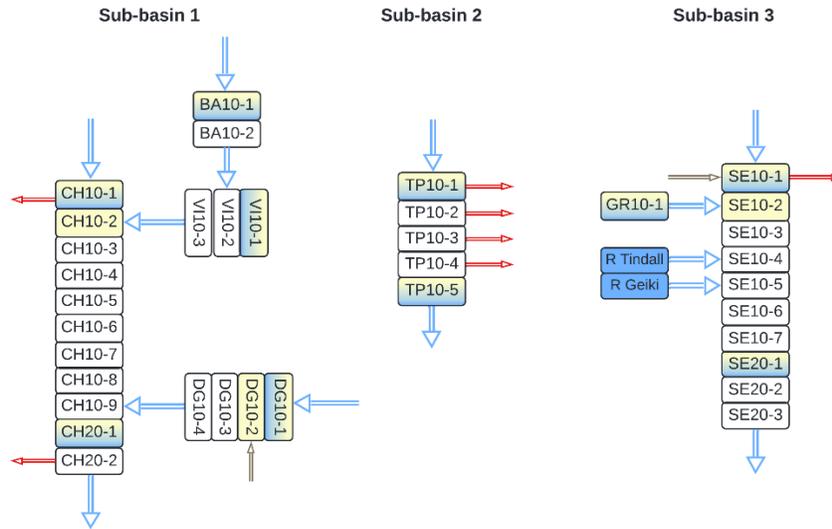


Figure 2. Conceptual model of the sub-basins.

The simulation and calibration periods were from 2005 to 2010. The simulated parameters are dissolved oxygen (DO), nitrate (NO_3^-), pH, water temperature (T_w), electrical conductivity (EC), iron (Fe), magnesium (Mg), calcium (Ca), and sulfate (SO_4^{2-}); this selection was based on their inclusion in the NSCA (except for T_w and NO_3^-) and their relevance at the site.

We evaluated the model's performance based on coefficient of determination (R^2), the root mean square error (RMSE) and Nash Sutcliffe Efficiency (NSE):

R^2 is a measure of the proportion of explained variance present in the data; higher value of R^2 , the better the model describes the data (Di Bucchianico, 2008).

$$R^2 = \frac{\text{Cov}(O,S)^2}{\text{Var}(O) \cdot \text{Var}(S)} \quad (1)$$

RMSE is a typical indicator for forecasting errors, and it is sensitive to outliers and is not sensitive to biases that may be present in the forecasts; smaller values indicate more accurate predictions (Wilks, 2006).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2} \quad (2)$$

NSE is a similarity measurement for calibration, model comparison, and verification. If NSE = 1, it indicates a perfect fit between the forecast and predictions. If $0 < NSE < 1$, it indicates the model has an acceptable fit. If NSE = 0, the model's accuracy is no better than the mean of the forecasts. Finally, if $NSE < 0$, it indicates the model has worse accuracy than the mean of the forecasts (Nash & Sutcliffe, 1970).

$$NSE = 1 - \frac{Var(O-S)}{Var(O)} \quad (3)$$

Where S/S_i and O/O_i denote simulations and observations, respectively, and n number of observations.

2.3 Climate change scenarios

Climatic and meteorological data (i.e., air temperature, solar radiation, dew point temperature) and hydrometric data (flow) for future scenarios were obtained from the National Water Balance (DGA, 2022) for the RCP 8.5 W/m² (Representative Concentration Pathways), which represent a worst-case scenario where humanity continues its current emissions trajectory with no corrective action (Hausfather & Peters, 2020) in which, an increase in radiative forcing of 8.5 W/m² is projected towards the year 2100. This study used climate data from DGA based on the Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5).

3. RESULTS AND DISCUSSION

In the first part of the study, we simulated the parameters NO₃⁻, Tw, DO, and pH for all the sub-basins mentioned above in WASP: Advanced Eutrophication. It is worth highlighting that each sub-basin exhibited different trends for the different water quality parameters. Figures 3, 4, and 5 show preliminary (uncalibrated) results for the sub-basins, and Table 1 shows the R², RMSE, and NSE metrics for the simulated parameters.

Alkalinity, a parameter necessary for simulating pH, was not measured during the simulated period, and we approximated it using bicarbonate ion concentrations; despite this, the measurements are very few, making calibration impossible. A similar situation occurs with Biological Oxygen Demand (BOD) as no records are available; we considered that 80% of the biochemical oxygen demand (COD) is biodegradable. Although COD and BOD are not among the selected parameters, we simulate them because they are necessary for simulating DO. Regarding the other simulated parameters, records are available for the entire simulated period, and the results for some parameters show similar behavior between the simulated and observed data; however, it is evident that model calibration is still necessary, and the metrics in Table 1 confirm this.

Figure 3 shows the simulation results and observed data from the monitoring station associated with the Serrano River mouth. The measurements begin in 2006, so there is a delay between the start of the simulation and the data used for calibration. The model

primarily underestimated the parameters studied, with NO_3^- standing out as the parameter showing a similar behavior. Table 1 also exhibits lower errors and better fitting according to RMSE and NSE, respectively. While Tw shows a similar behavior, the metrics indicate that the simulation performs poorly. On the other hand, pH is the parameter that does not show similar behavior, and the fit between the model and the data is poor.

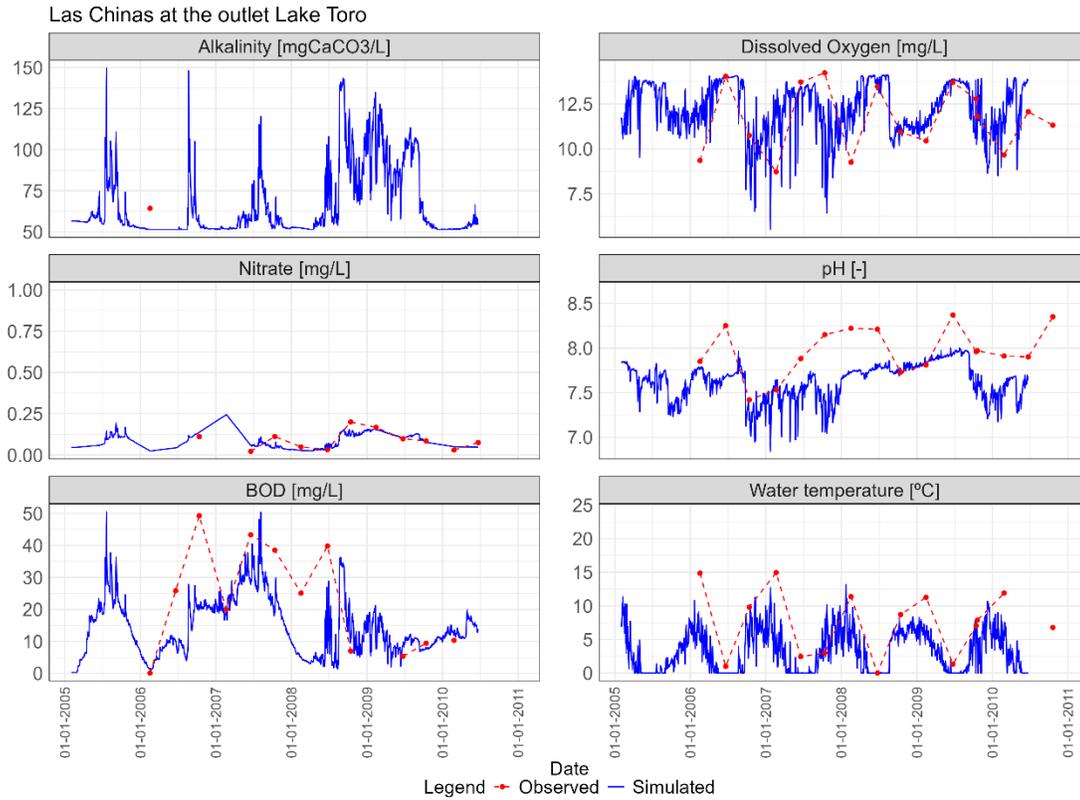


Figure 3. Simulation results for segment CH20-1, Las Chinas river sub-basin.

Figure 4 shows that the model overestimates DO and pH while underestimates Tw. On the other hand, NO_3^- and BOD show periods where the simulation overestimates them and other periods where it underestimates them. DO, pH, and Tw exhibit similar behavior, but the metrics in Table 1 indicate that the model's performance for these parameters is poor.

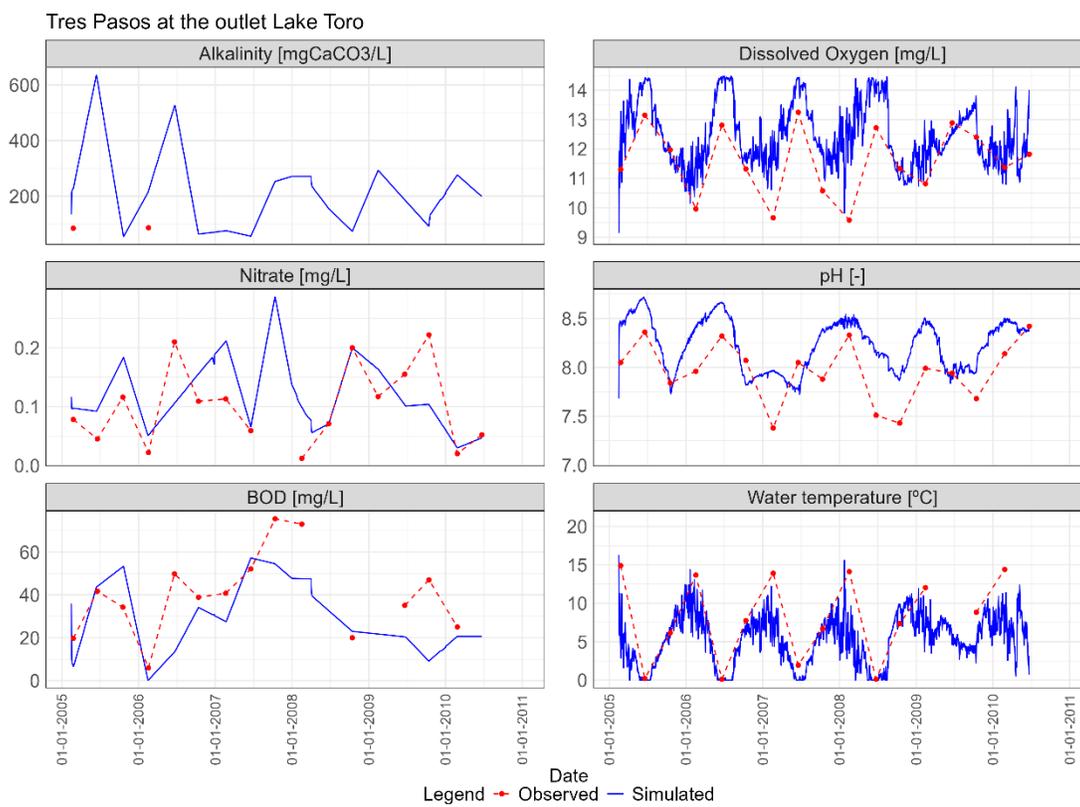


Figure 4. Simulation results for segment TP10-5, Tres Pasos River sub-basin.

Figure 5 shows the results for the Serrano basin, where we observe that the parameters DO, BOD, and Tw exhibit similar behavior. The metrics in Table 1 confirm this for the first two. However, the model underestimates the latter, and the metrics do not reflect this. NO_3^- and pH, on the other hand, display behavior that is entirely different from the observed data.

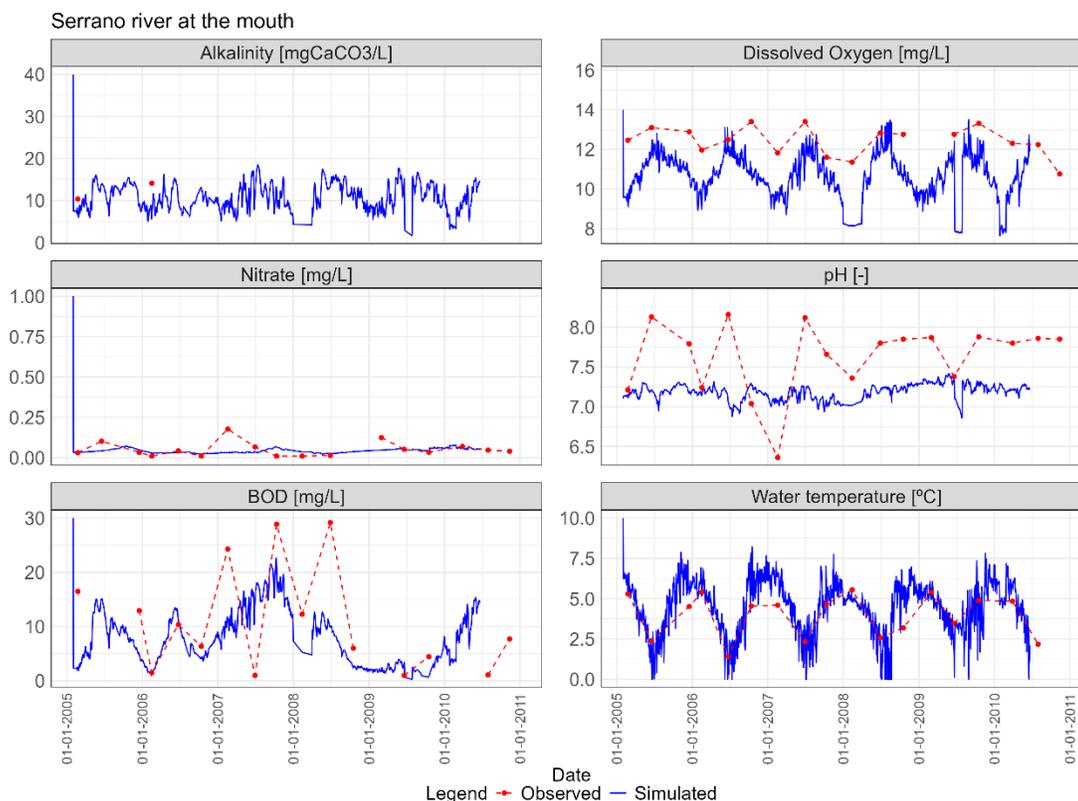


Figure 5. Simulation results for segment SE20-1, Serrano River sub-basin.

Table 1. Performance metrics for modeled parameters.

Parameters	The Chinas river sub-basin			Tres Pasos river sub-basin			Serrano river at the mouth sub-basin		
	R ²	RMSE	NSE	R ²	RMSE	NSE	R ²	RMSE	NSE
Alk	-	-	-	-	-	-	-	-	-
pH	0.27	0.38	-1.077	0.37	0.39	-0.77	0.028	0.62	-0.80
DO	0.16	1.92	0.005	0.46	1.47	-0.51	0.47	2.086	-10.12
BOD	0.40	16.45	-0.052	0.43	18.64	0.005	0.31	9.40	0.067
NO ₃ ⁻	0.59	0.037	0.57	0.26	0.062	0.15	0.004	0.049	-0.089
Tw	0.53	5.28	-0.12	0.46	5.324	0.027	0.59	1.20	0.11

The interdependence of the parameters and the lack of measurements limit the calibration of the model. The most significant example is pH, which performs poorly across all sub-basins due to its strong dependence on alkalinity. Another sensitive parameter is DO, as it relies on constants directly associated with DO itself and parameters like BOD and NO₃⁻, making its calibration dependent on the performance of all associated conditions. The results show that the model predicts specific parameters more accurately for each sub-basin; NO₃⁻ in Las Chinas and Tres Pasos River sub-basin and Tw in Serrano River sub-basin.

4. CONCLUSIONS

This study aims to assess climate change's impact on water quality in the Serrano River basin. We formulated and implemented water quality models for the different sub-basins to achieve this, we formulated and implemented water quality models for the parameters DO, pH, Tw, EC, Fe, Fe, NO₃⁻, Mg, Ca and SO₄²⁻). We are currently working on calibration for advanced eutrophication and implementing advanced toxicity models for Ca, Mg, SO₄, and Fe.

The preliminary results in Advanced Eutrophication show that the model predicts specific water quality parameters more accurately for each sub-basin: NO₃-in Las Chinas and Tres Pasos River sub-basin and Tw in the Serrano River sub-basin, indicating that each sub-basin requires separate and distinct calibration. Additionally, it indicates that the model is susceptible to the boundary conditions set in the simulation due to the model setup of the transport of compounds. This is challenging for future work to focus on projecting water quality under the climate change scenario RCP 8.5 W/m², as cannot future water quality values for the parameters necessary as boundary conditions.

The challenge is making assumptions and finding relationships between the historical records for water quality parameters that allow us to generate boundary conditions for future scenarios.

ACKNOWLEDGMENTS

This research has been supported by ANID/FONDEF/ID23110167.

REFERENCES

- Bates, B.C., W. Kundzewicz, S. Wu, and J.P. Palutikof, Eds., (2008). *El cambio climático y el agua*, Report Intergovernmental Panel on Climate Change, Ginebra.
- Centro Nacional del Medio Ambiente (2010). Apoyo al programa de vigilancia de la norma secundaria de calidad ambiental: cuenca del río Serrano, XII Región: Informe resultados campaña de terreno.
- Copernicus Digital Elevation Model (DEM) - 30m resolution. European Union, Copernicus Land Monitoring Service. Available online: <https://www.rapidresponse.copernicus.eu/>
- Cubillos, J. (2013). *Transporte de contaminantes en sistemas fluviales y evaluación de aplicabilidad del modelo WASP en las cuencas de los ríos Elqui y Choapa, Región de Coquimbo, Chile*. Undergraduate thesis, Universidad of La Serena, La Serena, Chile.
- Di Bucchianico, A. (2008). "Coefficient of Determination (R²)". Encyclopedia of Statistics in Quality and Reliability. doi:10.1002/9780470061572.eqr173.
- Dirección General de Aguas. (2004). *Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de Calidad: Informe final*, Departamento de Conservación y Protección de Recursos Hídricos.
- Dirección General de Aguas. (2022). *Homologación del cálculo hidrológico para la estimación de la oferta natural de agua histórica y futura en Chile*, División de Estudios y

- Planificación, MOP. Realizado por Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Civil, División Recursos Hídricos y Medio Ambiente. S.I.T. 524
- Hausfather Z., and Peter G. (2020). “Emissions – “The Business as usual” story is misleading”. *Nature*, 577, 618-620.
- Hodali, S. (2021). *Evaluación de la aplicabilidad del programa computacional WASP en la simulación de la calidad del agua del humedal del río Cruces, Cuenca del río Valdivia, Región de Los Ríos, Chile*. Undergraduate thesis, University of Chile, Santiago, Chile.
- Hucke-Gaete R., Viddi F., Simeone A. (2023). Marine Mammals and Seabirds of Chilean Patagonia: Focal Species for the Conservation of Marine Ecosystems. In: *Conservation in Chilean Patagonia*, Castilla J., Armesto J., Martínez-Harms M., and Tecklin D. (ed.), 1nd edn, Springer Cham, pp. 393-407.
- Juan P. Boisier. (2023). CR2MET: A high-resolution precipitation and temperature dataset for the period 1960-2021 in continental Chile. (v2.5) [Data set]. Zenodo. DOI: [10.5281/zenodo.7529682](https://doi.org/10.5281/zenodo.7529682).
- Komatau E., Fukushima T., & Harasawa H. (2007). “A modeling approach to forecast the effect of long-term climate change on lake water quality”. *Ecology Model*, pp. 531-366.
- Lafon, A., Silva, N., & Vargas, C. A. (2014). “Contribution of allochthonous organic carbon across the Serrano River Basin and the adjacent fjord system in Southern Chilean Patagonia: Insights from the combined use of stable isotope and fatty acid biomarkers”. *Progress In Oceanography*, 129, 98-113. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2014.03.004>
- Marquet P.A., Buschmann A.H., Corcoran D., Díaz P., Fuentes-Castillo T., Garreaud R., Plissock P., and Salazar A. (2023). Global Change and Acceleration of Anthropogenic Pressures on Patagonian Ecosystems. In: *Conservation in Chilean Patagonia*, Castilla J., Armesto J., Martínez-Harms M., and Tecklin D. (ed.), Springer Cham, pp. 33-65.
- Me W., Hamilton D., McBride C., Abell J., and Hicks B. (2018). “Modelling hydrology and water quality in a mixed land use catchment and eutrophic lake: Effects of nutrient load reductions and climate change”. *Environmental Modelling and Software*, 109, 114-133.
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). “River flow forecasting through conceptual models. Part I — A discussion of principles”. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282–290. doi:10.1016/0022-1694(70)90255-6
- Rivera A., Aravera J.C., Urra A., Reid B. (2023). Chilean Patagonian Glaciers and Environmental Change. In: *Conservation in Chilean Patagonia*, Castilla J., Armesto J., Martínez-Harms M., and Tecklin D. (ed.), 1nd edn, Springer Cham, pp. 393-407.
- Rodriguez, M. (2021). *Effects of municipal WWTP contributions on the distribution of pathogens in the Mapocho River, Chile, and possible consequences for the future reuse*. Undergraduate thesis, University of Chile, Santiago, Chile.
- Rojas, J. (2022). *Evaluación del soporte WASP en la simulación de la calidad del agua superficial: caso cuenca del río Mataquito*. Undergraduate thesis, University of Chile, Santiago, Chile.
- Sanabria J., Marengo J., and Valverde M. (2009). “Climate change scenarios using regional models for the Peruvian Altiplano (Departamento de Puno)”. *Revista Peruana Geo-Atmosferica RPGA*, (1), 134-149.

- Urciuolo, A.B., Iturraspe, R.J. (2022). Hydrologic Systems, Water Uses, and Emerging Conflicts Around Freshwater Availability in Patagonia. In: *Freshwaters and Wetlands of Patagonia*, Mataloni, G., Quintana, R.D. (ed.), Natural and Social Sciences of Patagonia. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-10027-7_9
- van Vliet, M.T.H., Thorslund, J., Stokal, M. et al. “Global river water quality under climate change and hydroclimatic extremes”. *Nat Rev Earth Environ* 4, 687–702 (2023). <https://doi.org/10.1038/s43017-023-00472-3>
- Wilks, D.S. (2006) *Statistical Methods in the Atmospheric*. Academic Press.
- Wool T., Ambrose R., Martin J., & Comer A. (2020). “WASP 8: The Next Generation in the 50-year Evolution of USEPA’s Water Quality Model”. *Water* 12(5), 33.

ABOUT THE AUTORS

Consuelo Alcarruz is a Civil Engineering student and a master's student in Engineering Sciences, mention in Resources and the Water Environment at Universidad de Chile. Her research areas are environmental engineering and water quality.

Katherine Lizama-Allende is a Civil Engineer and a Ms. Sc. from Pontificia Universidad Católica de Chile, and a Ph.D. in Civil Engineering from Monash University. She is an Assistant Professor at Universidad de Chile. Her research areas are environmental engineering, water quality, and constructed wetlands for water pollution control.

Alida Pérez obtained a B.Sc. and M.Sc in Geology from the University of Chile and a Ph.D. in Geological Sciences from Cornell University in 2019. She was a visiting scholar at the Geochemistry of External Envelopes Laboratory at the Institut de Physique du Globe de Paris before joining the faculty at the University of Chile as Assistant Professor in 2020. Dr. Perez-Fodich investigates geochemical reactions occurring on the Earth’s surface, focusing on weathering reactions, solute generation and transport, and precipitation of clays and opal in soils and geothermal environments. She employs reactive transport models and geochemical tracers such as silicon isotopes and Ge/Si ratios among other isotopic tracers.

Matias Peredo is the CEO of ECOHYD, a research platform specializing in ecohydrology. Holds a PhD in Hydraulic Engineering and Environmental Science from the Polytechnic University of Valencia and a degree in Hydraulic Civil Engineering from the University of Chile.

Ximena Vargas is a Civil Engineer Universidad de Chile. Associate Professor Universidad de Chile. Her research areas are surface hydrology, hydrological modeling and climate change.

Hernan Latuz is a Natural Resources Engineer at Universidad de Chile, specializing in limnology and aquatic ecosystems He has been a visiting academic at the Universidad de Chile, Catholic University of Temuco, University of Concepción, Austral University and

Universidad Mayor. He has worked as a collaborating researcher at Pontificia Universidad Católica de Chile. He is currently the focal point of the Ramsar Convention for Chile and in charge of the aquatic ecosystem monitoring program of the Ministry of the Environment.

MODELO HÍBRIDO PARA PRONÓSTICO DE CAUDALES DE DESHIELO EN CUENCAS DE CHILE CENTRAL

FRANCISCO JARA^{1,3}, DIEGO HERNÁNDEZ^{1,4}, PABLO MENDOZA^{1,2,5},
MARÍA IGNACIA ORELL^{1,6}, JAMES MCPHEE^{1,2,7}

¹Advanced Mining Technology Center, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas,
Universidad de Chile

²Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas,
Universidad de Chile

³ fcojara506@gmail.com , ⁴ hernandez@hydro.tuwien.ac.at , ⁵ pamendoz@uchile.cl

⁶ maria.orell@uchile.cl , ⁷ jmcphee@uchile.cl

RESUMEN

Los pronósticos estacionales de caudal pueden servir de apoyo a la gestión y planificación a largo plazo de los recursos hídricos, incluidas las asignaciones para el abastecimiento de agua, el riego, la generación de energía hidroeléctrica, la industria, las operaciones mineras y la navegación. Por lo tanto, la mejora de la calidad de estos productos es un reto constante para la comunidad hidrológica, especialmente en regiones donde se espera que el riesgo y la gravedad de la sequía aumenten en escenarios de cambio climático. En años recientes, se han propuesto metodologías *híbridas*, que combinan modelos hidrológicos dinámicos con metodologías estadísticas de pronóstico. En dichos enfoques, el modelo hidrológico se utiliza para generar condiciones hidrológicas iniciales (CHI) tales como el almacenamiento de nieve y contenido de humedad del suelo, las que luego son utilizadas como variables de entrada en un modelo de regresión. En el presente trabajo se presenta una metodología automática de pronóstico de caudales en cuencas hidrográficas de Chile central, basada en la combinación óptima de modelos atmosféricos e hidrológicos, con análisis de incertidumbre para 45 cuencas de Chile Central. Para cada cuenca y con distintos tiempos de adelanto del pronóstico, se construye un modelo estadístico (regresión lineal múltiple) que aprovecha ambas fuentes de predictibilidad: condición hidrológica e índices climáticos. Los resultados indican que en mayo y junio la predictibilidad de volúmenes de caudal (acumulado de septiembre a marzo) es baja, mientras que en julio la predictibilidad aumenta: principalmente la predictibilidad proviene de la condición hidrológica; por sí mismos los índices climáticos no son suficiente para dar una buena predictibilidad, pero juegan un rol en complementar a la condición hidrológica en la regresión lineal. En agosto y septiembre la predictibilidad aumenta y se explica principalmente por el almacenamiento hidrológico, mientras los índices climáticos reducen progresivamente su aporte al desempeño del pronóstico.

Palabras claves: Pronóstico de caudales de deshielo, Modelamiento hidrológico, Predictibilidad de escorrentía, Cuencas de montaña

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Los pronósticos estacionales de caudal pueden servir de apoyo a la gestión y planificación a largo plazo de los recursos hídricos, incluidas las asignaciones para el abastecimiento de agua, el riego, la generación de energía hidroeléctrica, la industria, las operaciones mineras y la navegación. Por lo tanto, la mejora de la calidad de estos productos es un reto constante para la comunidad hidrológica, especialmente en regiones donde se espera que el riesgo y la gravedad de la sequía aumenten en escenarios de cambio climático (Cook et al., 2022). Entre los enfoques existentes, los métodos dinámicos -que se basan en la implementación de modelos hidrológicos o de superficie terrestre (Wood et al., 2018; Slater et al., 2023)- son atractivos porque implican representaciones explícitas de procesos hidrológicos, con diversos grados de abstracción en función de la complejidad del modelo (Hrachowitz y Clark, 2017). Sin embargo, los métodos dinámicos de pronóstico requieren pronósticos climáticos con varias semanas o meses de anticipación, lo que dificulta su aplicación y afecta su desempeño. Por otro lado, los modelos de regresión vinculan la variable dependiente (el volumen de escorrentía estacional en el período de estiaje) con condiciones hidrológicas previas, tales como el almacenamiento de nieve, la precipitación en la temporada fría, o el contenido de humedad del suelo. Históricamente los modelos de regresión se han aplicado usando como predictoras variables observadas en estaciones hidrometeorológicas, lo que limita su desempeño en zonas sin información observacional. En años recientes, se han propuesto metodologías *híbridas*, que combinan modelos hidrológicos dinámicos con metodologías estadísticas de pronóstico (Troin et al. 2021). En dichos enfoques, el modelo hidrológico se utiliza para generar condiciones hidrológicas iniciales (CHI) tales como el almacenamiento de nieve y contenido de humedad del suelo, las que luego son utilizadas como variables de entrada en un modelo de regresión.

En el presente trabajo se presenta una metodología automática de pronóstico de caudales en cuencas hidrográficas de Chile central, basada en la combinación óptima de modelos atmosféricos e hidrológicos, con análisis de incertidumbre para 45 cuencas de Chile Central. En específico, se analiza la capacidad de diversos productos meteorológicos distribuidos (modelos globales y reanálisis) para proveer predictibilidad hidroclimática en la Cordillera de Los Andes en el contexto del pronóstico de caudales. Asimismo, se determinan los factores principales que inciden sobre la calidad de pronósticos de caudales en cuencas hidrográficas de montaña de Chile central, en particular durante la temporada de deshielo, considerando distintos atributos y tiempos de adelanto.

La metodología implementada combina de manera óptima la información y capacidad predictiva de indicadores climáticos de gran escala, reanálisis meteorológicos e información in situ medida en redes de observación hidrometeorológica, y entrega pronósticos de volúmenes estacionales y caudales mensuales actualizados mensualmente a lo largo de la temporada de deshielo (septiembre a marzo).

Los pronósticos estacionales de volumen de deshielo, desagregados en caudales mensuales, se logran mediante la incorporación de:

- i) productos meteorológicos públicos de disponibilidad global y local, actualizados hasta casi el presente.
- ii) un modelo hidrológico dinámico, agregado a escala de cuenca, que simula las variables del ciclo hidrológico de acuerdo con la información meteorológica provista.
- iii) índices climáticos que representan el estado de las variables de gran escala en sectores del Océano Pacífico, con capacidad predictiva para el hidroclima de Chile central.
- iv) un modelo estadístico (regresión lineal múltiple) que utiliza los predictores construidos en (ii) y (iii) (i.e., la suma de todos los almacenamientos de agua de la cuenca obtenidos según modelación dinámica, e índices climáticos de gran escala, respectivamente), y los relaciona con el volumen de deshielo estacional como predictando.

En específico, la meteorología actualizada al momento de emisión del pronóstico se obtiene del reanálisis global ERA5. Dado que ERA5 es un producto grillado de baja resolución espacial, para cada cuenca se corrige la información meteorológica usando como referencia el producto local de alta resolución CR2MET (Boisier et al., 2018). Esta corrección remueve los sesgos sistemáticos de las series de precipitación y temperatura, mediante una combinación del método univariado *Quantile Delta Mapping* con la técnica de permutación multivariada *Schaake Shuffle*, resultando en una modificación del método *SimSchaake*. Con la meteorología ya corregida y con series de caudales disponibles, para cada cuenca se calibra el modelo hidrológico TUW, y se obtienen variables de almacenamiento simuladas (agua en el suelo y en la nieve).

Por otro lado, para cada cuenca se analiza cuáles índices climáticos de gran escala (entre ONI, NINO3.4, NINO1+2, SOI y PDO, todos disponibles desde el servicio NOAA) tienen la mayor capacidad predictiva según distintos tiempos de adelanto del pronóstico. Una vez que se escoge el mejor índice (para cada cuenca y cada tiempo de adelanto, según el criterio de información de Akaike), el predictor climático se combina con las variables de almacenamiento simuladas, en una regresión lineal múltiple donde la variable predicha es el volumen de deshielo estacional (agregado de septiembre a marzo). Obtenido el volumen de deshielo, este se desagrega en caudales mensuales según la técnica *k-Nearest Neighbor* (kNN), la cual replica la forma o distribución de años anteriores con estacionalidad similar al año presente.

Para cada cuenca y con distintos tiempos de adelanto del pronóstico, se construye un modelo estadístico (regresión lineal múltiple) que aprovecha ambas fuentes de predictibilidad: condición hidrológica e índices climáticos. Los resultados indican que en mayo y junio la predictibilidad de volúmenes de caudal (acumulado de septiembre a marzo) es baja, mientras que en julio la predictibilidad aumenta. Este resultado sugiere que la predictibilidad proviene primordialmente de la condición hidrológica; por sí mismos, los índices climáticos no

proveen información suficiente para dar una buena predictibilidad, pero juegan un rol en complementar a la condición hidrológica en la regresión lineal. En agosto y septiembre la predictibilidad aumenta y se explica principalmente por el almacenamiento hidrológico, mientras los índices climáticos reducen progresivamente su aporte al desempeño del pronóstico.

2. METODOLOGÍA Y DATOS UTILIZADOS

2.1 Zona de estudio

El dominio de estudio corresponde a 45 cuencas de Chile central (Figura 1), principalmente cuencas de cabecera, aunque también se incluyen cuencas bajas con tal de abarcar mayor diversidad de condiciones hidrológicas. Estas 45 cuencas se escogieron según criterios de baja intervención antrópica, y suficiente extensión de datos de caudal para posibilitar el entrenamiento de los modelos.

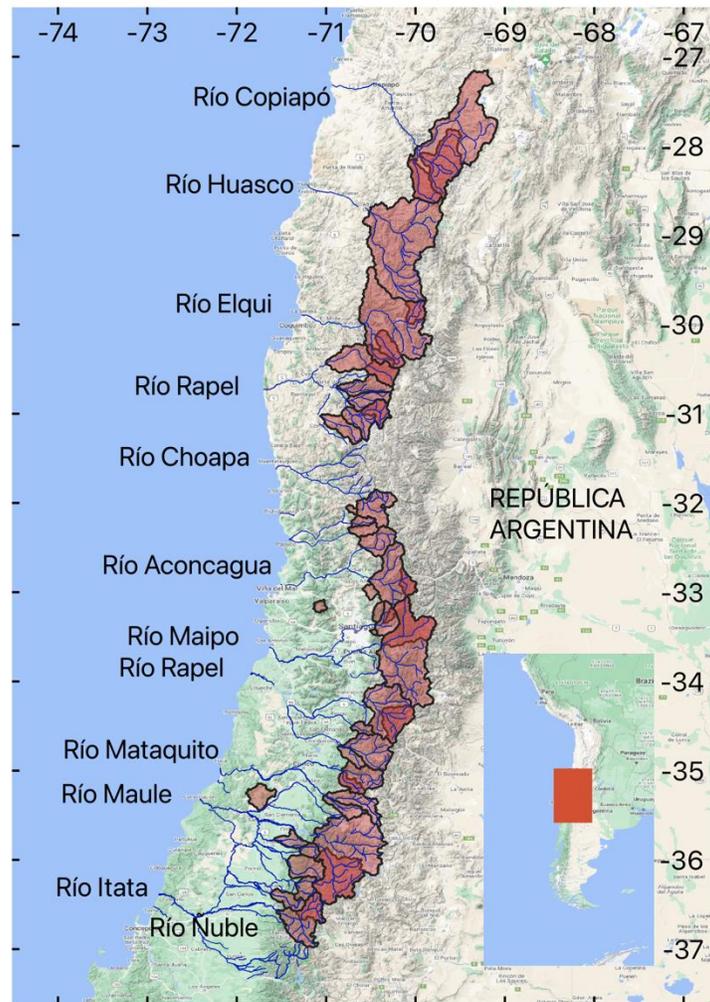


Figura 1. Mapa de la zona de estudio incluyendo las 45 cuencas de Chile central

La zona central de Chile presenta condiciones climáticas muy secas al norte y húmedas al sur, acentuado por la acción del Anticiclón del Pacífico en el norte, donde los montos de acumulación anual se explican solamente a través de unas pocas tormentas. Además, de oeste a este la precipitación presenta un efecto orográfico producto de la elevación de la Cordillera de Los Andes. Chile central concentra las ciudades más pobladas del país, y actividades económicas dependientes del agua como la agricultura, generación hidroeléctrica, y minería.

2.2 Métricas de evaluación del pronóstico

2.2.1 Métricas determinísticas

- a) Coeficiente de determinación (R^2): Esta métrica proporciona una medida de la variabilidad total de los datos que se explica por el modelo. Un valor de R^2 cercano a 1 indica que el modelo explica el 100% de la variabilidad observada, mientras que un valor cercano a 0 indica lo contrario.
- b) Raíz del Error cuadrático medio (RMSE): RMSE es una métrica utilizada para medir la diferencia entre los valores del modelo y los valores observados. Cuanto menor sea el RMSE, mejor será el modelo. Esta métrica es especialmente útil cuando se desean penalizar errores grandes.
- c) Error absoluto medio (MAE): El MAE es la media de las diferencias absolutas entre las predicciones y las observaciones. Esta métrica es menos sensible que RMSE a los errores altos.

2.2.2 Métricas probabilísticas

- a) Puntuación continua de Brier (Continuous Rank Probability Score: CRPS): CRPS es una métrica que cuantifica la diferencia entre la distribución de probabilidad prevista y la distribución de probabilidad observada. En el caso de los modelos híbridos en hidrología, CRPS puede utilizarse para evaluar la precisión del pronóstico del volumen estacional de los caudales.
- b) Puntuación de habilidad continua de Brier (*Continuous Rank Probability Skill Score*: CRPSS): CRPSS es una métrica que compara el rendimiento de un modelo de pronóstico con un modelo de referencia (generalmente un modelo de pronóstico climatológico u otra versión del modelo, por lo que se compara el CRPS del modelo actual versus el CRPS de un modelo de referencia). Un CRPSS positivo indica que el modelo de pronóstico tiene un rendimiento superior al modelo de referencia.

2.2.2 Métricas de clasificación

Para las métricas de clasificación se utiliza la matriz de confusión donde se cuentan los casos observados y pronosticados. Para una variable binaria la matriz se parece a la Tabla 1.

Tabla 1. Matriz de confusión general para un variable binaria.

Observación	Predicción Positiva	Predicción Negativa
Positiva	Verdadero Pos	Falso Neg
Negativa	Falso Pos	Verdadero Neg

- a) Exactitud (Accuracy): Esta métrica proporciona una medida general de cuántas predicciones fueron correctas.
- b) Precisión: La precisión es la proporción de predicciones verdaderas positivas sobre el total de verdaderas positivas y falsas positivas. Por ejemplo, si se elige "año seco" como la clase positiva, la precisión sería el número de "años secos" que el modelo predice correctamente dividido por el total de "años secos" que el modelo predice (correcta e incorrectamente).
- c) Sensibilidad (Recall): También conocida como sensibilidad o tasa de verdaderos positivos, mide la proporción de verdaderos positivos que fueron identificados correctamente. Siguiendo con el ejemplo de "año seco", el recall sería el número de "años secos" que el modelo predice correctamente dividido por el total de "años secos" reales (que el modelo predijo correctamente y los que no predijo).

Estas métricas proporcionan una perspectiva sobre el rendimiento del modelo, y la elección de las métricas dependerá de los objetivos específicos. Es importante recordar que no existe una única "mejor" métrica para todos los contextos, por lo que generalmente se consideran múltiples métricas al evaluar el rendimiento.

En la Tabla 2 se presentan las métricas de evaluación del pronóstico. En ella, la notación utilizada es la siguiente:

y_i : valor observado

\hat{y}_i : valor pronosticado

\bar{y} : media de los valores observados

n : número de observaciones

$F(y)$: función de distribución acumulativa de las predicciones

$O(y)$: función de distribución acumulativa de las observaciones

TP : verdaderos positivos

TN : verdaderos negativos

FP : falsos positivos

FN : falsos negativos

Tabla 2. Métricas de evaluación del pronóstico

Métrica	Símbolo	Ecuación
Coefficiente de determinación	R^2	$R^2 = 1 - \frac{\sum_i (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_i (y_i - \bar{y})^2}$
Error cuadrático medio	$RMSE$	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_i (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}}$
Error absoluto medio	MAE	$MAE = \frac{\sum_i (y_i - \hat{y}_i)}{n}$
Puntuación continua de Brier	$CRPS$	$CRPS = \int (F(y) - O(y))^2 dy$
Puntuación de habilidad continua de Brier	$CRPSS$	$CRPSS = 1 - \frac{CRPS \text{ modelo}}{CRPS \text{ modelo de referencia}}$
Exactitud	Accuracy	$Accuracy = (TP + TN)/(TP + TN + FP + FN)$
Precisión	Precision	$Precision = TP/(TP + FP)$
Sensibilidad	Recall	$Recall = TP/(TP + FN)$

Un ejemplo de clasificación, generado con valores aleatorios y que no refleja los valores de una cuenca o tiempo de emisión específico, es el siguiente:

AÑO HIDROLÓGICO	OBSERVADO	PRONOSTICADO
1990	húmedo	normal
1983	seco	seco
1998	seco	normal
2010	normal	húmedo
2015	húmedo	normal
1992	normal	normal
2007	seco	seco
2017	húmedo	húmedo

Matriz de confusión:

	OBSERVADO				
	TIPO AÑO	Húmedo	Normal	Seco	SUMA
PRONOSTICADO	Húmedo	1	1	0	2
	Normal	2	1	1	4
	Seco	0	0	2	2
	SUMA	3	2	3	8

Métricas:

MÉTRICA	Seco	Normal	Húmedo
Precisión	2/2	1/4	1/2
Recall	2/3	1/2	1/3
Exactitud	4/8 (diag/total de casos)		

2.3 Modelos estadísticos híbridos

De manera simplificada el modelo estadístico tiene una secuencia de pasos que se realizan de forma iterativa hasta conseguir un modelo final de acuerdo con criterios de calidad. Los pasos para conseguir el modelo son:

- 1) Preparación de datos: Seleccionar y preparar los predictores relevantes que se utilizarán en el modelo estadístico. Los predictores incluyen índices climáticos como ENSO, PDO, ONI, y SOI, así como variables diarias provenientes del modelo hidrológico TUW (Parajka et al., 2007) alimentado por reanálisis meteorológico ERA5 (Hersbach et al., 2020), como la precipitación mensual acumulada para el año hidrológico en estudio. Estos predictores se normalizan utilizando métodos como centrar/escalar o minmax, utilizando los datos de entrenamiento de los años hidrológicos 1980 a 2020.
- 2) Verificación de supuestos: Antes de aplicar la regresión lineal múltiple, se deben verificar los supuestos estadísticos, como la normalidad de la distribución del predictando (volumen). Se utiliza el test de Shapiro-Wilk (Shapiro & Wilk, 1995) para verificar la normalidad y se aplica una transformación de logaritmo para corregir sesgos en la distribución en caso de que no se pase el test.
- 3) Entrenamiento del modelo: se entrena el modelo de regresión lineal múltiple utilizando los predictores mensualizados y normalizados, además de la variable dependiente: volumen o logaritmo del volumen. Se estiman los coeficientes de regresión que minimizan la función de pérdida de mínimos cuadrados ordinarios (MCO). Se generan 1000 miembros (conjunto) a partir de una perturbación con distribución normal del error cuadrático medio de la regresión lineal.
- 4) Validación y evaluación del modelo: el modelo se verifica usando validación cruzada para un año fuera (LOOCV, *leave one out cross validation*), calculando métricas de evaluación univariada como el coeficiente de determinación (R^2) y la raíz del error cuadrático medio (MSE). También se evalúa el rendimiento del conjunto ocupando el CRPSS (*Continuous Ranked Probability Skill Score*).
- 5) Pronóstico de volúmenes y caudales: se utiliza el modelo entrenado y validado para pronosticar los volúmenes y caudales estacionales con nuevos predictores. Se obtiene el

caudal medio mensual distribuyendo el volumen utilizando los coeficientes de Pardé de los años más cercanos basados en la distancia euclidiana de los predictores.

- 6) A partir de los resultados de las métricas se exploran nuevas regresiones, predictores, horizontes del pronóstico, tiempos de emisión, forzantes meteorológicas, modelos hidrológicos, métodos de corrección de sesgo, etc.

A continuación, se detallan los elementos más relevantes del proceso de modelación estadística.

2.4 Datos de entrada

Los datos de entrada provienen de varias fuentes externas de información. Los índices climáticos estudiados provienen del National Centers for Environmental Information perteneciente a la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) del EEUU. Los datos meteorológicos provienen del reanálisis meteorológico ERA5 (Hersbach et al., 2020) del ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts), para el proceso de corrección del sesgo se utiliza también el producto CR2MET v2.0 del Center for Climate and Resilience Research de la Universidad de Chile. Las forzantes meteorológicas son utilizadas dentro del modelo TUW (Parajka et al., 2007) de nivel diario.

Para los predictores climáticos se utilizó el valor del índice mensual del mes anterior de la fecha de emisión del pronóstico. Por otro lado, para las variables hidrológicas simuladas se utilizó el valor del último día disponible antes de la fecha de emisión. Por ejemplo, para la emisión del 1 de junio se ocupa el SOI y NINO1.2 de mayo de cada año, y se ocupan los almacenamientos de modelo hidrológico simulados incluyendo el manto nival y agua en el suelo del día 31 de mayo.

2.5 Preprocesamiento de los datos meteorológicos

Actualmente existen diversos *datasets* meteorológicos globales de libre acceso. Sin embargo, solo algunos de estos actualizan sus datos hasta (casi) el presente (por ejemplo, CFS v2, IMERG-Late, MSWEP y ERA5). Por otro lado, en Chile se dispone del producto meteorológico de alta resolución CR2MET (Boisier et al., 2018; <https://www.cr2.cl/datos-productos-grillados/>), que es utilizado en nuestra metodología como producto de referencia o pseudo-observación. El producto CR2MET no se actualiza al presente, por lo que no puede ser utilizado directamente en la metodología de pronóstico; sin embargo, sirve como referencia para corregir otros productos. Se escoge ERA5 (Hersbach et al., 2020) como el producto global actualizado que se corregirá usando como referencia CR2MET. Esta elección se basa en que CR2MET, a su vez, depende de ERA5 en su construcción, por lo que el uso de ambos *datasets* sería consistente. Para el periodo 1979-2020 se obtienen series diarias promedio-de-cuenca de precipitación y temperatura, tanto desde CR2MET como ERA5.

Las series de ERA5 se corrigen según la referencia CR2MET a través del método de ajuste de sesgo (es decir, preprocesamiento) “corrección delta por cuantiles” (Cannon et al., 2015),

adaptada para el caso probabilístico, donde se genera un conjunto de tamaño N según una metodología modificada de Schefzik (2015, 2016), basada en análogos o días similares, y posterior aplicación de “Schaake Shuffle” (Clark et al., 2004) como proceso complementario que busca otorgar realismo físico a los miembros del conjunto (Vrac and Friederichs, 2015). No obstante, luego los miembros del ensemble se promedian y se recuperan las series determinísticas. Esta metodología probabilística mostró resultados mejores que la aplicación solamente de “corrección delta por cuantiles”.

2.6 Modelación hidrológica

En el contexto de la presente metodología, el objetivo de la modelación hidrológica dinámica es obtener la “condición hidrológica inicial” correspondiente a la suma de todos los almacenamientos hídricos de las cuencas para un momento dado. Los almacenamientos considerados incluyen la nieve acumulada en la cuenca, los almacenamientos subterráneos superior e inferior, y la humedad del suelo. Esto se consigue a partir de la modelación hidrológica de la cuenca usando el modelo TUW (modificación de HBV para R; Parajka et al., 2007) con las forzantes derivadas y preprocesadas de ERA5 (Hersbach et al., 2020) antes mencionadas. El modelo hidrológico se calibra en 1994-2020 y se valida en el periodo 1981-1994. Para la calibración, se utilizó una función objetivo que depende solamente del caudal (univariada), promediando los puntajes de KGE (Gupta et al., 2009) sin transformar y NSE (Nash & Sutcliffe, 1970) previa transformación logarítmica. Esta función objetivo se calcula tipo “split”, que consiste en calcular los índices para cada año hidrológico por separado, promediando luego todos los valores (Fowler et al., 2018).

2.7 Modelo estadístico de regresión

El modelo estadístico consiste en una regresión lineal múltiple de los diferentes predictores hídricos. La regresión lineal múltiple es un modelo estadístico que establece una relación lineal entre una variable dependiente (predictando) y varias variables independientes (o predictores). La función de optimización en la regresión lineal múltiple se utiliza para encontrar los coeficientes de regresión que minimizan la suma de los errores cuadráticos, generalmente se ocupa la función de pérdida de mínimos cuadrados ordinarios (MCO), aunque existen otras formas de optimizar la regresión lineal especialmente para un gran número de atributos (predictores o muestra).

La ecuación general de la regresión lineal múltiple es:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \varepsilon \quad (1)$$

Donde, y es la variable dependiente, x_i son las variables independientes, β_0 es el término constante o intercepto, β_i son los coeficientes de regresión y ε es el término de error aleatorio.

La función de optimización en la regresión lineal múltiple busca estimar los coeficientes β que minimizan la función de pérdida $L(\beta)$, que en este caso es la suma de los errores cuadráticos:

$$L(\beta) = \sum (y_{obs} - y_{sim}(\beta))^2 \quad (2)$$

$$y_{sim}(\beta) = \beta_0 + \left(\sum_{i=1}^n \beta_i x_i \right) \quad (3)$$

Dónde y_{obs} es el valor observado de la variable dependiente, x_i son los valores observados de las variables independientes y i representa el i -ésimo predictor en el conjunto de datos.

- *Supuestos de la regresión lineal*

Los modelos de regresión lineal múltiple se basan en varios supuestos, que incluyen:

- 1) **Relación lineal:** Los modelos de regresión lineal asumen que la relación entre las variables independientes y la variable dependiente es lineal. Esto se puede comprobar visualizando los datos mediante gráficos de dispersión.
- 2) **Independencia de las observaciones:** Las observaciones deben ser independientes entre sí, lo que significa que las observaciones no deben influirse mutuamente. En el caso de los datos temporales o espaciales, este supuesto a menudo no se cumple. El estadístico Durbin-Watson se usa comúnmente para detectar la autocorrelación en los residuos de la regresión.
- 3) **Homocedasticidad:** Los residuos (errores) deben tener una varianza constante en todos los niveles de las variables independientes. Si la varianza de los residuos varía a lo largo de los niveles de las variables independientes, esto se llama heterocedasticidad. Se comprueba la homocedasticidad visualizando los residuos frente a los valores ajustados: los residuos deben estar distribuidos aleatoriamente y no formar un patrón discernible. También es posible usar pruebas como la prueba de Breusch-Pagan o la prueba de White para comprobar la heterocedasticidad.
- 4) **Normalidad de los errores:** Los errores (residuos) deben estar normalmente distribuidos. Esto se puede comprobar utilizando un histograma de los residuos, un gráfico Q-Q o realizando una prueba de normalidad como la prueba de Shapiro-Wilk o la prueba de Kolmogorov-Smirnov.
- 5) **No colinealidad/multicolinealidad:** Las variables independientes no deben estar altamente correlacionadas entre sí, ya que esto puede hacer que sea difícil separar los efectos individuales de las variables independientes sobre la variable dependiente. Esto se puede comprobar calculando el factor de inflación de la varianza (VIF) para cada variable independiente. Un VIF mayor de 5 o 10 indica generalmente alta multicolinealidad.
- 6) **Ausencia de puntos de apalancamiento y valores atípicos influyentes:** Los modelos de regresión lineal pueden ser sensibles a los puntos de apalancamiento (observaciones con valores extremos de las variables independientes) y a los valores atípicos influyentes (observaciones con valores extremos de la variable dependiente). Estos pueden ser identificados a través de gráficos de residuos y medidas como la distancia de Cook.

Para verificar la normalidad del volumen (variable independiente) se aplicó la prueba de Shapiro-Wilk (SW). Esta prueba tiene como hipótesis nula que la variable viene de una distribución normal. Por lo tanto, si el p-valor es menor al nivel alfa (generalmente 0.05) la hipótesis nula se rechaza y por lo tanto la distribución no sería normal. Cabe mencionar que este tipo de metodología no identifica la distribución, sino que aprueba o rechaza la hipótesis de normalidad. En caso de ser rechazada la hipótesis, si la variable en el histograma se encuentra sesgada a la derecha o la izquierda, la muestra se puede transformar aplicando alguna transformación de orden de magnitud, por ejemplo, logaritmo natural o raíz cuadrada. Para los volúmenes se observaron principalmente volúmenes sesgados (*skewed*) a la derecha, es decir, una mayor frecuencia de caudales bajos comparado con medios y altos. Por lo que se aplicó, si la hipótesis nula se rechazaba, una transformación logarítmica y nuevamente se realizó la prueba de Shapiro-Wilks a la nueva variable. La variable (volumen o logaritmo del volumen) que pase la prueba de Shapiro-Wilks se utiliza como predicando en la regresión lineal múltiple.

2.8 Enfoque híbrido

Los modelos estadísticos híbridos, en hidrología, son una combinación de enfoques basados en procesos físicos de la cuenca y en relaciones estadísticas, utilizados para pronosticar el volumen estacional de los caudales. Estos modelos integran la información de varias fuentes como índices climáticos, por ejemplo, ENSO (El Niño - Oscilación del Sur) y SOI (Índice de Oscilación del Sur), junto con las variables de estado de modelos hidrológicos. Los índices climáticos mencionados están vinculados a las variaciones en la temperatura superficial del océano y la presión atmosférica, que influyen en la precipitación y la evaporación y, en consecuencia, en los volúmenes de agua almacenados en la atmósfera.

ENSO es un fenómeno climático que implica fluctuaciones en la temperatura superficial del océano en el Pacífico ecuatorial, afectando los patrones de precipitación y temperatura en todo el mundo. ONI es una medida estandarizada de la anomalía de la temperatura superficial del océano en una región específica del Pacífico ecuatorial, mientras que SOI mide la diferencia normalizada entre la presión atmosférica en Tahití y Darwin, Australia.

Por otro lado, el modelo hidrológico TUW es un modelo conceptual que simula los procesos del ciclo hidrológico, como la humedad del suelo, la infiltración, el flujo subsuperficial y el caudal. Este modelo se alimenta con datos meteorológicos diarios del reanálisis ERA5, que proporciona información detallada y precisa sobre las condiciones meteorológicas pasadas a nivel global.

El enfoque híbrido se basa en combinar las ventajas de ambos tipos de modelos: las representaciones detalladas de los modelos hidrológicos y la capacidad predictiva de las relaciones estadísticas. Las ecuaciones que combinan las variables independientes pueden ser lineales, no lineales o basadas en técnicas de aprendizaje automático, como las redes neuronales artificiales, árboles de decisión o máquinas de vectores de soporte.

2.9 Predictores

Los predictores utilizados se normalizan utilizando el método centrar/escalar que consiste en restar a cada individuo de un predictor el promedio de la muestra (centrar) y luego dividir por la desviación estándar (escalar). Tanto el promedio como la desviación se calculan ocupando los años de la muestra de entrenamiento que corresponden a los años hidrológicos 1980 a 2019. Existen otras alternativas de normalización como minmax (restar el mínimo y dividir por el máximo), sin embargo, el tipo de normalización no suele ser influyente en el resultado final de la regresión.

2.10 Coeficientes de Pardé y algoritmo kNN para distribución del volumen

El volumen simulado se distribuye a caudales medios mensuales ocupando los coeficientes de Pardé de los años más cercanos (kNN) como se muestra en la ecuación 4.

$$Q_{sim\ i} = V_{sim} \frac{\sum_{j=1}^k CP_{ij}(1/d_j)}{\sum_{j=1}^k 1/d_j} \quad (4)$$

$$CP_{ij} = Q_{obs\ ij}/V_{obs\ j} \quad (5)$$

Donde $Q_{sim\ i}$ representa el caudal pronosticado para el mes i . El mes i debe estar dentro del horizonte del pronóstico (septiembre a marzo). El volumen pronosticado es V_{sim} .

El coeficiente de Pardé CP_{ij} para el mes i y el año hidrológico j , se define ocupando $Q_{obs\ ij}$ que corresponde al caudal observado para el mes i y el año hidrológico j y $V_{obs\ j}$ que es el volumen observado para el año hidrológico j . d_j es la distancia entre los predictores del año pronosticado y el periodo histórico (1980-2020). k corresponde al número de años considerados cercanos.

El método de *k-Nearest Neighbor* (kNN) es un algoritmo de aprendizaje supervisado no paramétrico utilizado para clasificación y regresión. La idea principal detrás de kNN es que las observaciones similares tienden a tener valores de salida similares. Este algoritmo se basa en medir la similitud o la distancia entre los puntos de datos en un espacio multidimensional, generalmente utilizando la distancia euclidiana u otras métricas de distancia.

El algoritmo kNN funciona de la siguiente manera:

- 1) Determinar el valor de 'k': Seleccionar un número entero 'k' que representa el número de vecinos más cercanos que se considerarán en el proceso de clasificación o regresión.
- 2) Calcular la distancia: Calcular la distancia entre la observación de interés (nueva instancia) y todas las demás observaciones en el conjunto de datos. La medida de distancia más común es la distancia euclidiana, aunque también se pueden utilizar otras métricas, como la distancia de Manhattan o la distancia de Minkowski.
- 3) Encontrar los vecinos más cercanos: Ordenar las observaciones según las distancias calculadas y seleccionar las 'k' observaciones con las distancias más cortas. Estos 'k' puntos de datos son los vecinos más cercanos de la instancia de interés.

- 4) Agregar las respuestas: se asigna a la nueva instancia el valor de la variable objetivo de sus 'k' vecinos más cercanos.
- 5) Predecir la etiqueta o valor de la nueva instancia basándose en la agregación de las respuestas de los vecinos más cercanos.

3. RESULTADOS – PRONÓSTICO DE VOLÚMENES ESTACIONALES

3.1 Cuencas de estudio

Las 45 cuencas de estudio se especifican en la Tabla 3. Los atributos provienen de la base de datos del CAMELS-CL (Alvarez-Garreton et al., 2018).

Tabla 3. Cuencas del dominio de estudio

CÓDIGO DGA	NOMBRE DE LA ESTACIÓN FLUVIOMÉTRICA	LATITUD (°)	LONGITUD (°)	ÁREA CUENCA (km ²)
3414001	Río Pulido En Vertedero	-28.0858	-69.9408	2021.8
3421001	Río Manflas En Vertedero	-28.1478	-69.9939	981.6
3430003	Río Copiapó En Pastillo	-28.0003	-69.9747	7463.9
3820001	Río Huasco En Algodones	-28.7306	-70.5067	7199.7
4302001	Río Toro Antes Junta Río La Laguna	-29.9711	-70.0928	467.4
4311001	Estero Derecho En Alcohuaz	-30.2206	-70.4928	338.2
4313001	Río Cochiguaz En El Peñón	-30.1222	-70.4344	675.3
4320001	Río Elqui En Algarrobal	-29.9953	-70.5867	5669.7
4501001	Río Hurtado En San Agustín	-30.4622	-70.5361	672.4
4503001	Río Hurtado En Angostura De Pangué	-30.4386	-71.0022	1837.3
4511002	Río Grande En Las Ramadas	-31.0117	-70.5811	568.5
4513001	Río Grande En Cuyano	-30.9242	-70.7731	1286.6
4515002	Río Mostazal En Caren	-30.8422	-70.7694	640.2
4522002	Río Rapel En Junta	-30.7081	-70.8728	820.6
4531002	Río Cogotí Entrada Embalse Cogotí	-31.0325	-71.0403	753.1
4703002	Río Choapa En Cuncumen	-31.9667	-70.5944	1131.6
5100001	Río Sobrante En Piadero	-32.2253	-70.7119	241.1
5101001	Río Pedernal En Tejada	-32.0708	-70.7564	81.1
5200001	Río Alicahue En Colliguay	-32.33	-70.7381	348.0
5401003	Río Juncal En Juncal	-32.8625	-70.1675	343.1
5410002	Río Aconcagua En Chacabuquito	-32.8503	-70.5094	2113.4
5411001	Estero Pocuro En El Sifón	-32.9164	-70.5403	181.0
5414001	Río Putaendo En Resguardo Los Patos	-32.5017	-70.5811	885.3
5707002	Río Colorado Antes Junta Río Maipo	-33.5875	-70.3669	1662.8
5710001	Río Maipo En El Manzano	-33.5939	-70.3792	4839.0

5721001	Estero Yerba Loca Antes Junta San Francisco	-33.3414	-70.3636	110.0
5722001	Estero Arrayan En La Montosa	-33.3256	-70.4561	216.5
5722002	Río Mapocho En Los Almendros	-33.3703	-70.4508	638.0
5730008	Quebrada Ramon En Recinto Emos	-33.4331	-70.5142	35.6
5741001	Estero Puangue En Boquerón	-33.1669	-71.1306	144.2
6003001	Río Cachapoal 5 Km. Aguas Abajo Junta Cortaderal	-34.3464	-70.3764	964.7
6013001	Río Claro En Hacienda Las Nieves	-34.4922	-70.7028	245.0
6027001	Río Claro En El Valle	-34.6867	-70.8739	349.4
6028001	Río Tinguiririca Bajo Los Briones	-34.7186	-70.8267	1438.3
7103001	Río Claro En Los Queñes	-34.9983	-70.8094	354.4
7104002	Río Teno Después De Junta Con Claro	-34.9961	-70.8206	1205.3
7112001	Río Colorado En Junta Con Palos	-35.2783	-71.0028	877.9
7115001	Río Palos En Junta Con Colorado	-35.2744	-71.0156	490.0
7321002	Río Maule En Armerillo	-35.7061	-71.1139	5469.0
7330001	Río Perquilauquen En San Manuel	-36.3758	-71.6233	502.4
7350003	Río Longaví En El Castillo	-36.2558	-71.3375	466.9
7354002	Río Achibueno En La Recova	-36.0028	-71.4419	894.3
7358001	Río Putagan En Yervas Buenas	-35.7719	-71.585	390.5
7381001	Estero Los Puercos En Puente Los Puercos	-35.3736	-71.8292	558.8
8104001	Río Sauces Antes Junta Con Ñuble	-36.6653	-71.2739	606.7

3.2 Predictores versus volumen

En las figuras sucesivas se evalúa la selección de predictores (o importancia relativa de cada predictor), y con el conjunto de predictores óptimos para cada cuenca, se muestran los resultados de los modelos de pronóstico.

En la Figura 2 se aprecia que en general los índices climáticos aumentan su correlación con el volumen estacional de estiaje a medida que el pronóstico se realiza más tarde en el año. Cuando los pronósticos se intentan en el mes de abril, prácticamente no existe capacidad predictiva de los índices climáticos; cuando se hacen en agosto, los índices mejor correlacionados con el volumen son el SOI, BIENSO, MEIv2 y ONI. La PDO muestra muy baja correlación con el volumen estacional. Asimismo, la capacidad predictiva decrece con el tiempo de adelanto, si bien existe variabilidad en este aspecto. Geográficamente, se aprecia que las cuencas con mayor influencia de los índices climáticos se ubican más hacia el norte del dominio de estudio, entre las regiones de Atacama y Maule.

La Figura 3 muestra la evolución espacio-temporal de la importancia de los predictores en el pronóstico, según el criterio de Akaike. En este caso se ilustra un modelo de regresión que incluye la condición hidrológica inicial (CHI), el índice Niño1.2 y el índice SOI como

predictores. Se muestran resultados para el modelo inicializado en distintos meses del año para todas las cuencas en estudio. Se aprecia que los índices climáticos aportan mayor información cuando el pronóstico se emite en los meses de mayo a julio, pero que la CHI domina fuertemente a partir del mes de julio en adelante, en todas las cuencas en análisis.

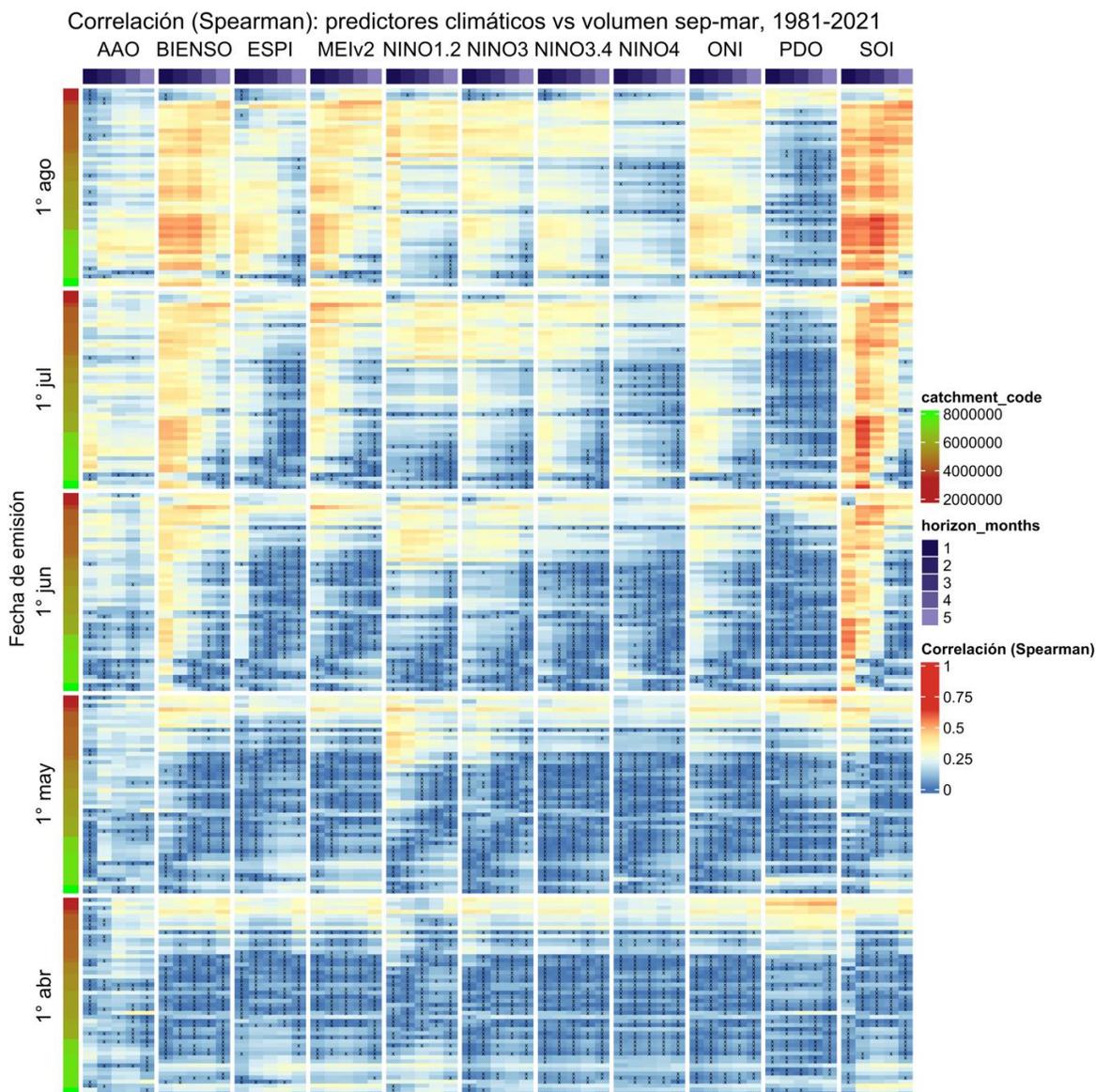


Figura 2. Correlación entre predictores climáticos y volumen estacional de caudal, para distintos tiempos de emisión y distintos tiempos de anticipación.

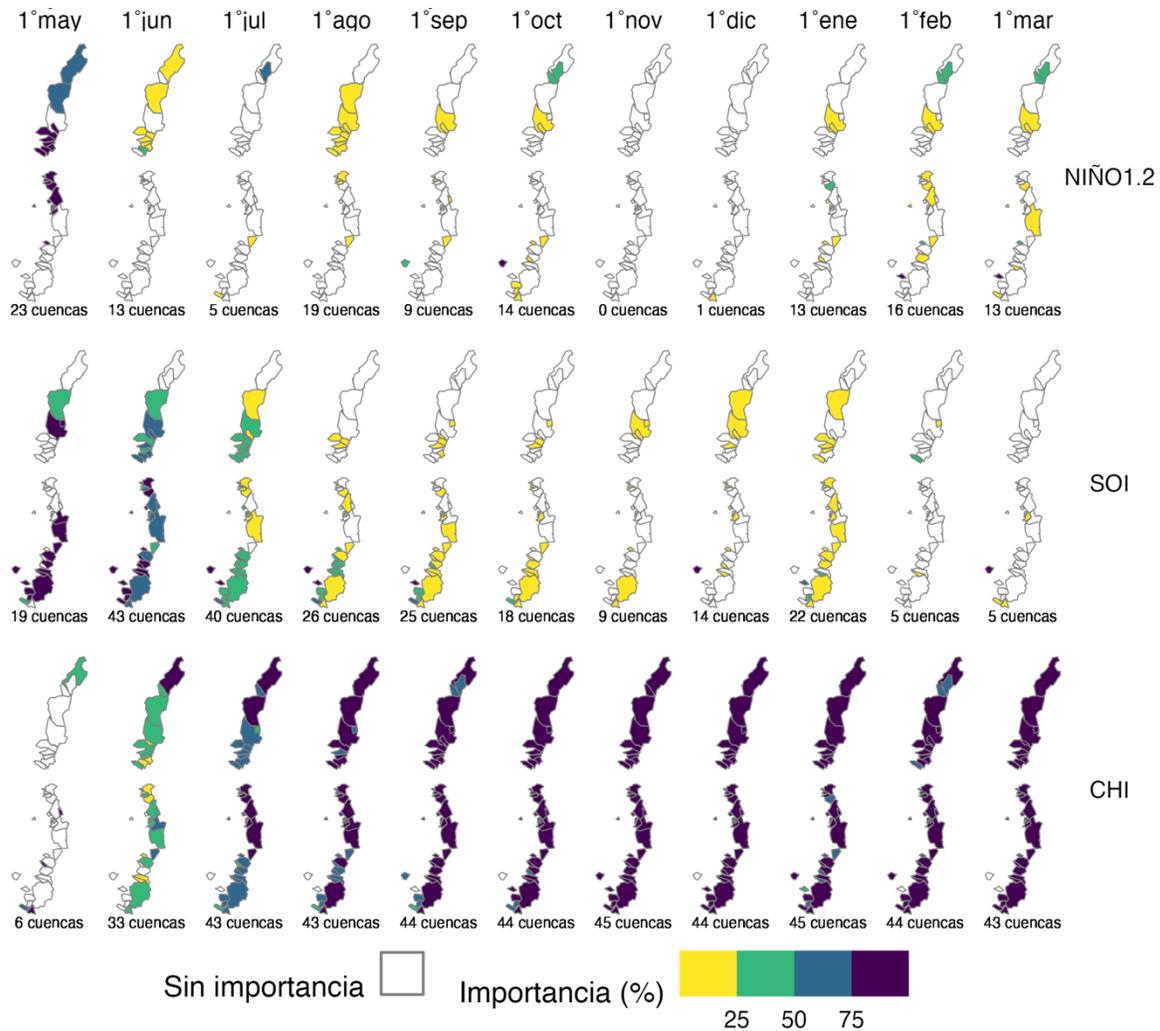


Figura 3. Importancia relativa (%) de distintos predictores climáticos en un modelo de regresión lineal múltiple, donde el predictando es el volumen de caudal estacional.

3.3 Evaluación de los modelos híbridos

A continuación, se presentan los resultados de la evaluación de la metodología de pronóstico. En cada caso, la fecha en el eje de las abscisas representa el día en que se emite el pronóstico, y los *box-plots* representan la dispersión y tendencia de los resultados en todas las cuencas en análisis. En cada caso, se presentan dos familias de pronósticos: unos, donde las variables predictoras solamente son los almacenamientos hidrológicos estimados mediante el modelo de simulación hasta la fecha inmediatamente anterior a la emisión del mismo; el segundo grupo representa aquellos pronósticos donde los predictores también incluyen los índices climáticos de mayor correlación con el volumen estacional. En el caso de los pronósticos emitidos después del 1 de septiembre, la variable pronosticada es el volumen de escorrentía entre la fecha de emisión y el 1 de marzo.

3.3.1 Métricas determinísticas

La Figura 4 muestra un incremento sostenido del R2 a medida que los pronósticos se emiten más tardíamente en el año, desde mayo a septiembre. Después de esa fecha, la calidad de los pronósticos se degrada, levemente en octubre, pero más significativamente en los meses posteriores. Asimismo, se aprecia que la inclusión de los índices climáticos Niño1.2 y SOI mejora la correlación entre pronóstico y caudales observados, y que este efecto es más significativo para las emisiones entre junio y septiembre. El pronóstico emitido el 1 de septiembre tiene el mejor desempeño, con una mediana de R2 del orden de 0,72.

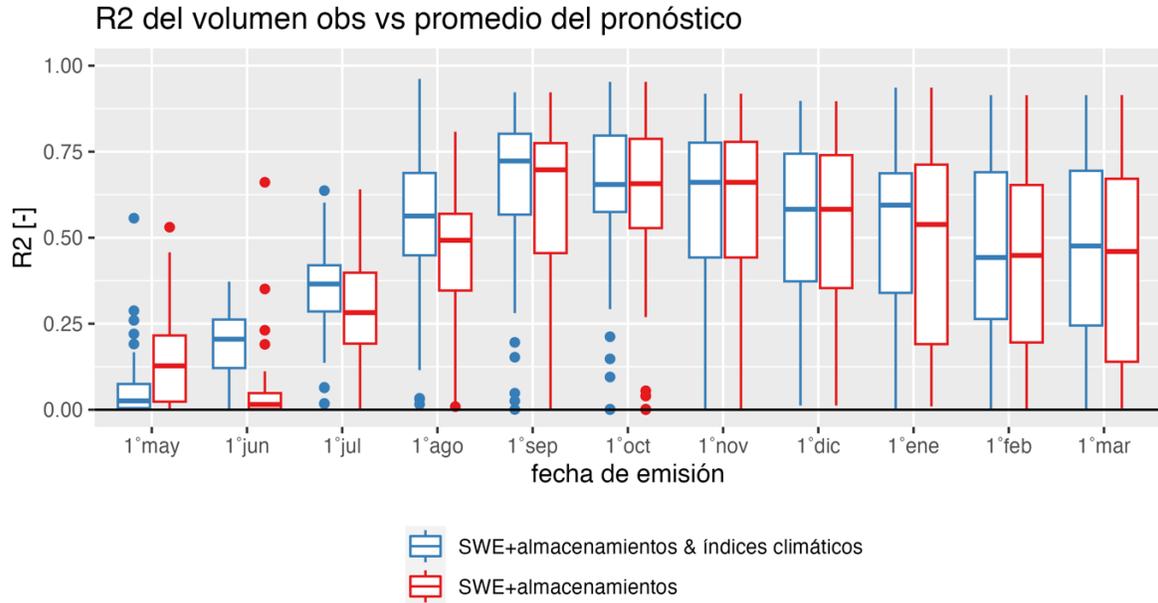


Figura 4. Evaluación determinística (coeficiente de determinación) de pronósticos retrospectivos de volúmenes de deshielo, comparando el método híbrido versus un modelo más simple sin índices climáticos.

La Figura 5 muestra el error absoluto medio entre volúmenes pronosticados y observados. En este caso el efecto de incluir los índices climáticos es menos evidente, pero sí es notorio el impacto de la fecha de emisión del pronóstico. Los pronósticos emitidos hasta el mes de agosto tienen un error absoluto mayor que aquellos emitidos de septiembre en adelante. Ahora bien la variable predicha después de septiembre va cambiando en magnitud, por lo que el error absoluto de baja magnitud podría representar un error porcentual mayor hacia el final de la temporada. La Figura 6, que ilustra el comportamiento de la raíz del error cuadrático medio, presenta un panorama muy similar al del error absoluto.

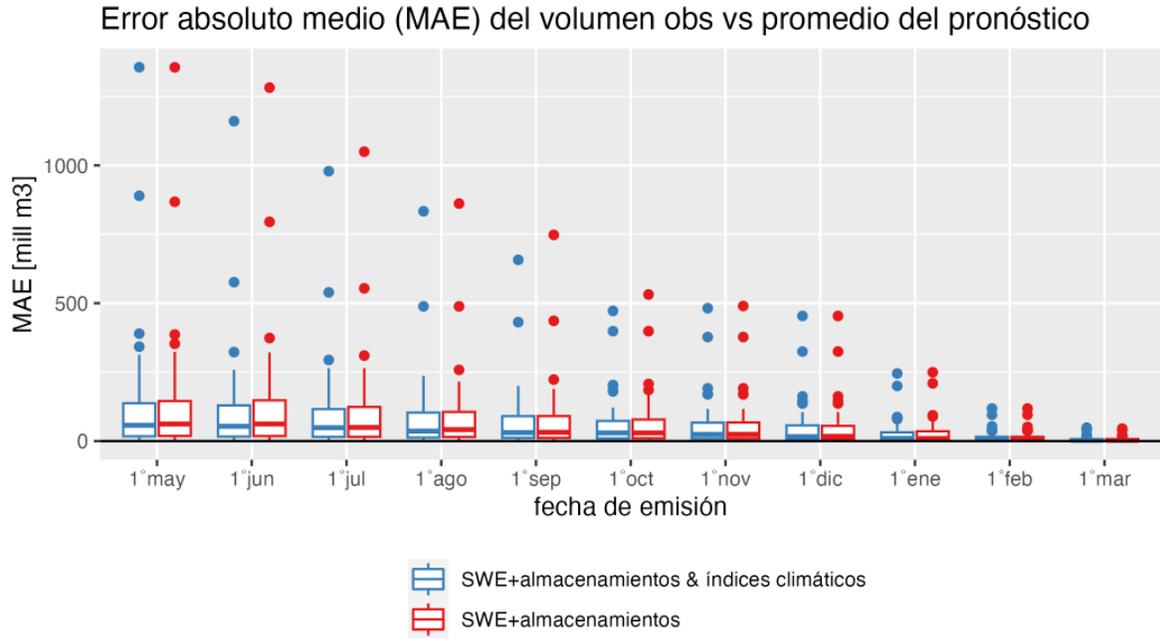


Figura 5. Evaluación determinística (error absoluto medio) de pronósticos retrospectivos de volúmenes de deshielo, comparando el método híbrido versus un modelo más simple sin índices climáticos.

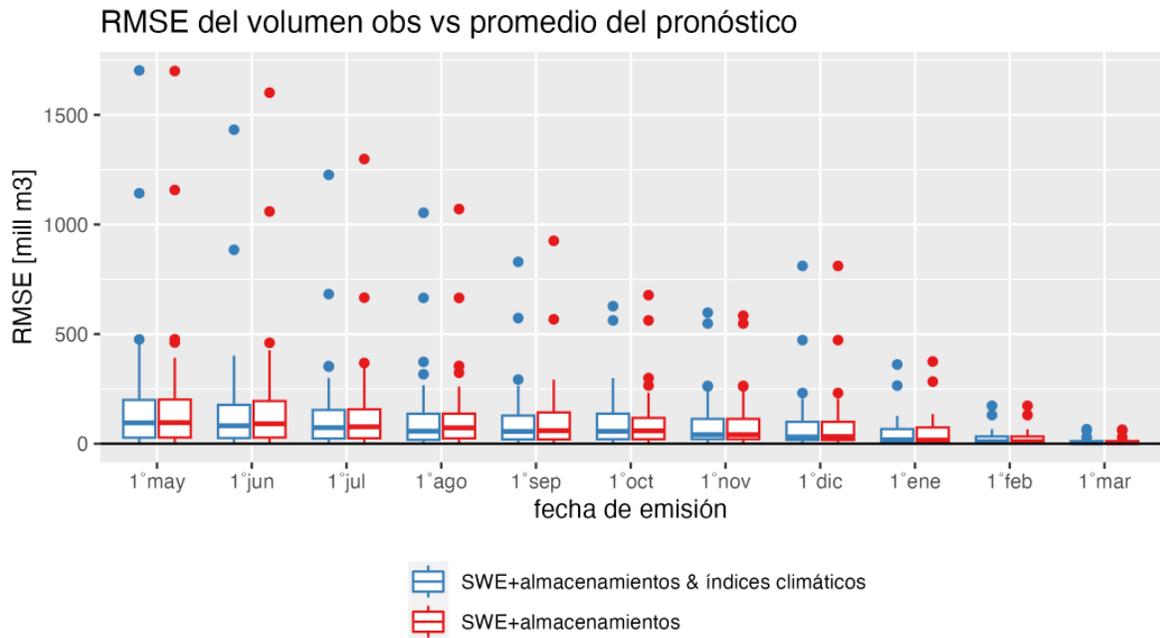
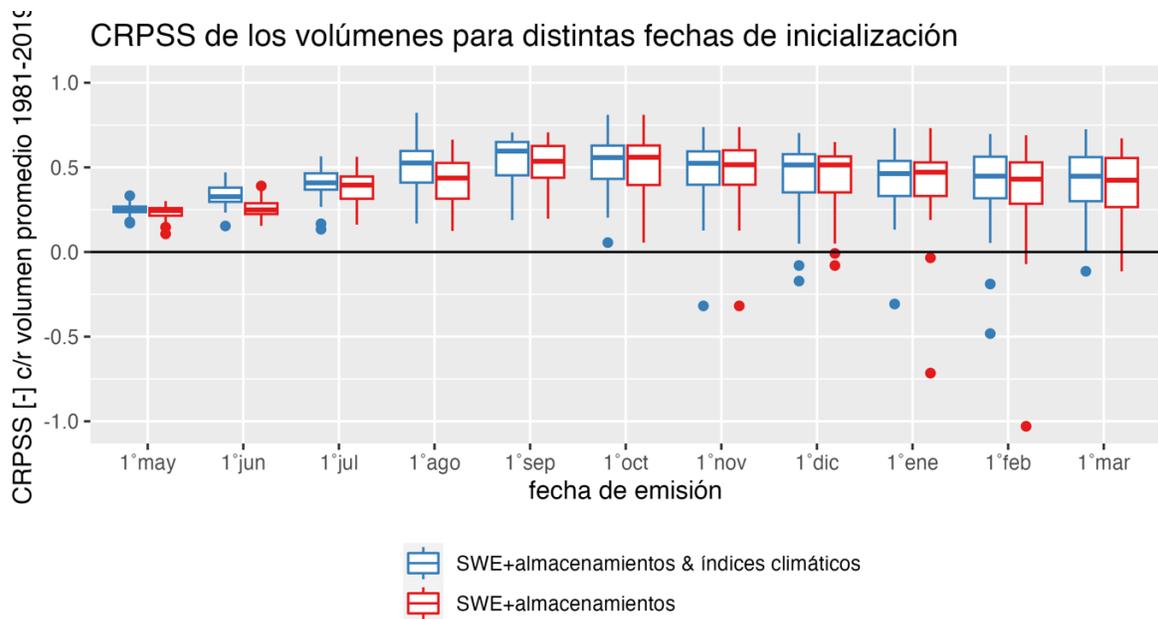


Figura 6. Evaluación determinística (raíz del error cuadrático medio) de pronósticos retrospectivos de volúmenes de deshielo, comparando el método híbrido versus un modelo más simple sin índices climáticos.

3.3.2 Métricas probabilísticas

La evaluación probabilística del pronóstico usando el índice CRPSS da cuenta de un comportamiento similar al de las métricas determinísticas mostradas antes. El desempeño del pronóstico aumenta respecto de la referencia (el volumen promedio histórico) sostenidamente desde mayo a septiembre, luego de lo cual el desempeño disminuye levemente, con mayor dispersión. La inclusión de índices climáticos mejora el pronóstico ostensiblemente hasta el mes de septiembre, luego de lo cual el impacto de esta información no es relevante. Para unas pocas cuencas, la metodología de pronóstico propuesta genera un desempeño aún peor que el volumen histórico, pero este fenómeno se observa en muy pocos casos y solamente hacia el final de la temporada de deshielo. El mayor valor de CRPSS es un poco inferior a 0,75 para el mejor mes de emisión (septiembre) en la cuenca de mejor desempeño.

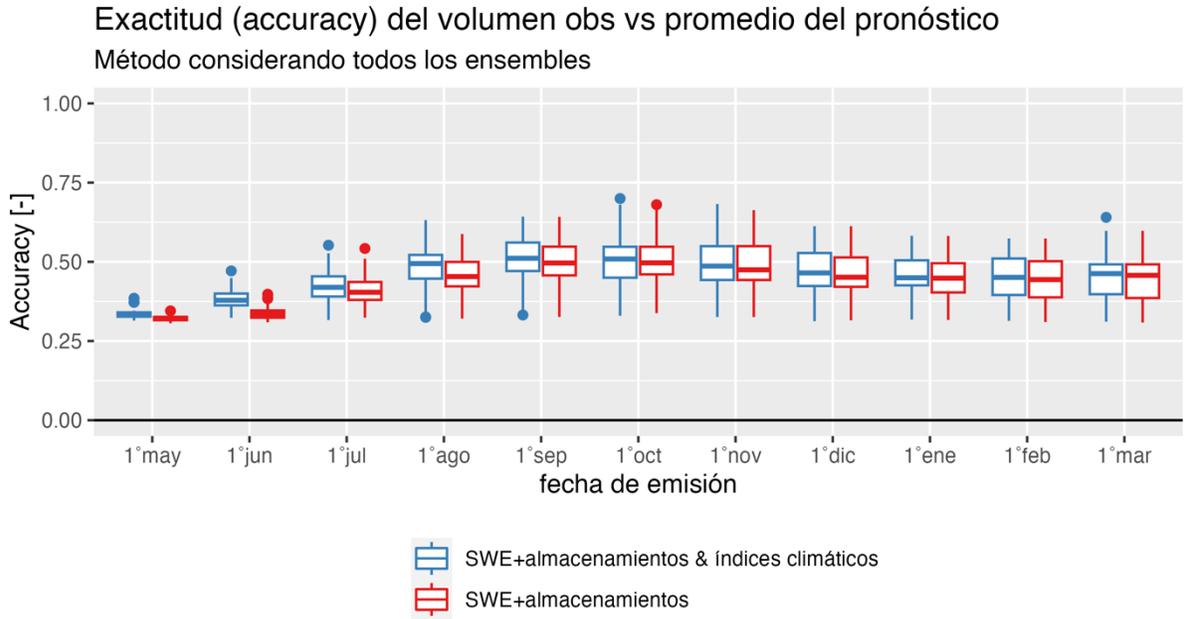


Cada boxplot agrupa 45 cuencas

Figura 7. Evaluación probabilística (CRPSS) de pronósticos retrospectivos de volúmenes de deshielo, comparando el método híbrido versus un modelo más simple sin índices climáticos. Puntajes mayores a 0 indican valor agregado con respecto a la referencia (volumen climatológico o promedio), menores a 0 indica que el modelo no tiene valor agregado respecto a la referencia, y 1 es puntaje perfecto.

3.3.3 Métricas de clasificación por tipo de año

Estas métricas se refieren a la capacidad del modelo de pronóstico para diagnosticar las condiciones hidrológicas (húmedas, normales o secas) en una temporada dada. La Figura 8 muestra la *exactitud* de la metodología, con una mediana en torno a 0,5 para todas las cuencas en el pronóstico emitido el mes de septiembre. Esto significa que la mitad de las temporadas y cuencas, el modelo es capaz de acertar al tipo de año hidrológico. El desempeño y la dispersión de los resultados disminuyen para el pronóstico emitido después de octubre.



Cada boxplot agrupa 45 cuencas

Figura 8. Evaluación de clasificación (Exactitud) de pronósticos retrospectivos de volúmenes de deshielo, comparando el método híbrido versus un modelo más simple sin índices climáticos.

La Figura 9 muestra la métrica de precisión, y se observa que el modelo es más hábil en diagnosticar años húmedos (valores entre 0,5 y 0,7) mientras que existen mayores dificultades para diagnosticar años normales y años secos en general. La Figura 10 complementa esta información con los resultados del *recall*, es decir la fracción de años observados de cada tipo que fueron correctamente pronosticados. En este caso las diferencias entre años normales y años secos son más notorias, y el modelo tiene mayores dificultades para diagnosticar correctamente los años *normales*.

En general vemos que, para todas las métricas, el desempeño del modelo de pronóstico decae cuando es emitido posteriormente al 1 de octubre. En esos casos, el volumen de escorrentía remanente (es decir, entre el momento de emisión del pronóstico y el 1 de marzo) depende de la condición hidrológica inicial de manera más débil para un grupo importante de cuencas, lo que se visualiza en la mayor dispersión de los *boxplots* correspondientes. Las razones para este fenómeno son múltiples y escapan al alcance de este estudio. Por una parte, la mayor importancia de la energía disponible en cuencas de alta montaña y la variabilidad que incorporan las fluctuaciones de nubosidad, sobre todo en la primavera temprana, introducen mayor varianza en los caudales cuando el período de agregación es más corto. Por otro lado, desde el punto de vista estadístico, al reducirse la magnitud de la variable dependiente, la variabilidad interanual cobra mayor peso, y debilita la correlación lineal con las variables predictoras. Finalmente, las variables predictoras (condición hidrológica inicial) simuladas con el modelo hidrológico están sometidas a mayor error a medida que avanza la temporada de deshielo, porque es conocida la mayor dificultad que tienen los modelos hidrológicos para

capturar la dinámica del derretimiento de nieve, en comparación con su proceso de acumulación.

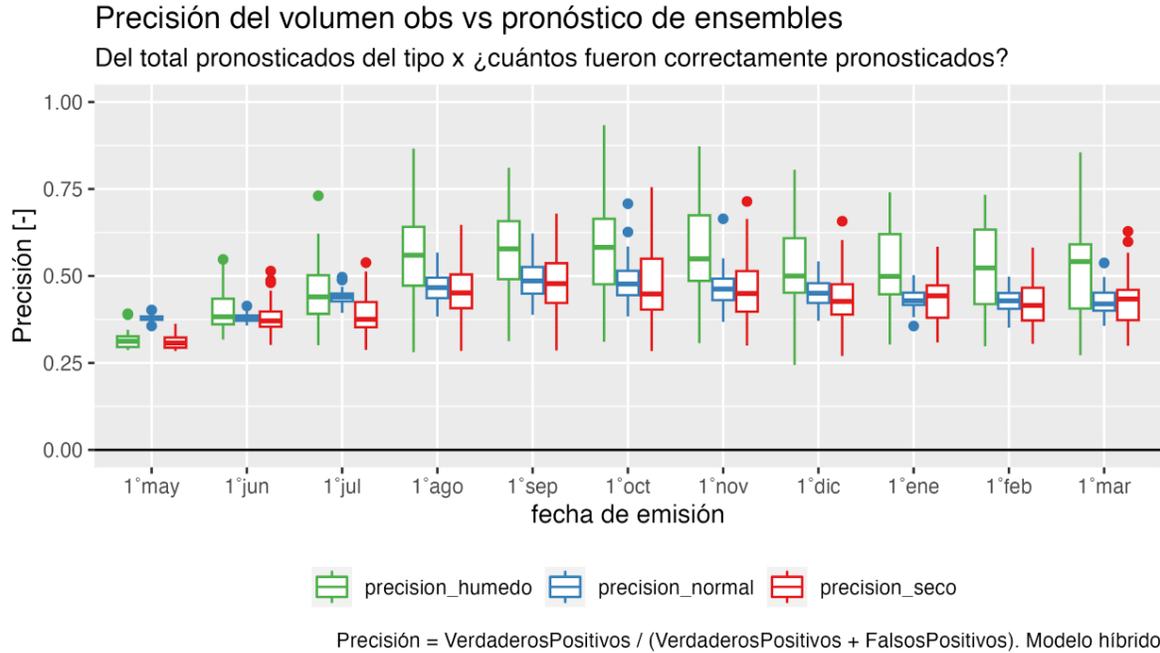


Figura 9. Evaluación de clasificación (Precisión) de pronósticos retrospectivos de volúmenes de deshielo, comparando el método híbrido versus un modelo más simple sin índices climáticos.

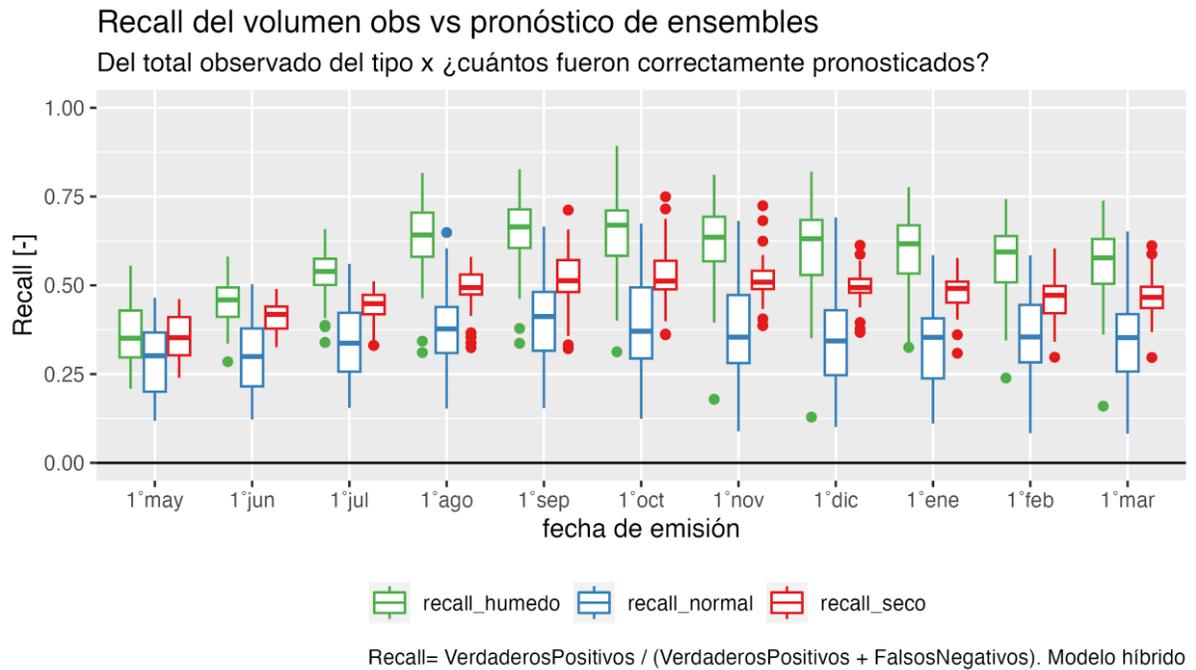


Figura 10. Evaluación de clasificación (Recall) de pronósticos retrospectivos de volúmenes de deshielo, comparando el método híbrido versus un modelo más simple sin índices climáticos.

4. CONCLUSIONES

Para cada cuenca y con distintos tiempos de adelanto del pronóstico, se construye un modelo estadístico (regresión lineal múltiple) que aprovecha ambas fuentes de predictibilidad: condición hidrológica e índices climáticos. Los resultados científicos indican que en mayo y junio la predictibilidad de volúmenes de caudal (acumulado de septiembre a marzo) es baja, mientras que en julio la predictibilidad aumenta: principalmente la predictibilidad proviene de la condición hidrológica, por sí mismos los índices climáticos no son suficiente para una buena predictibilidad, pero juegan un rol en complementar a la condición hidrológica en la regresión lineal. En agosto y septiembre la predictibilidad aumenta y se explica principalmente por el almacenamiento hidrológico, y los índices climáticos reducen progresivamente su aporte al pronóstico. Después del mes de octubre la predictibilidad disminuye levemente y aumenta la dispersión en el desempeño de los modelos de pronóstico producto del debilitamiento de la correlación lineal entre la condición hidrológica inicial y el volumen de escorrentía. Se logró la automatización del proceso de generación de pronósticos híbridos para 45 cuencas entre las latitudes 27°S y 37°S. Dados los resultados de errores determinísticos y estadísticos, se recomienda la ejecución cada mes comenzando desde agosto y finalizando en febrero, es decir, 7 meses de emisión. La metodología permitió manejar un gran volumen de datos y los códigos permiten dar flexibilidad en la ejecución para mejorar o reparar cada proceso. Después de las Conclusiones (última sección numerada), le siguen sin numerar: Agradecimientos, Referencias, Anexos, terminando con la sección Acerca del autor (o Acerca de los Autores, si es más de uno).

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo contó con el apoyo de ANID a través del proyecto FONDEF IT20I0057, y con el aporte de la Junta de Vigilancia Maule Melado y la Comisión Nacional de Riego.

REFERENCIAS

- Alvarez-Garretón, C., Mendoza, P. A., Boisier, J. P., Addor, N., Galleguillos, M., Zambrano-Bigiarini, M., ... & Ayala, A. (2018). The CAMELS-CL dataset: catchment attributes and meteorology for large sample studies—Chile dataset. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(11), 5817-5846.
- Akaike, H. (1974). A new look at the statistical model identification. *IEEE transactions on automatic control*, 19(6), 716-723.
- Boisier, J. P., Alvarez-Garretón, C., Cepeda, J., Osses, A., Vásquez, N., & Rondanelli, R. (2018). CR2MET: A high-resolution precipitation and temperature dataset for hydroclimatic research in Chile. In *EGU General Assembly Conference Abstracts* (p. 19739).
- 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.

- Clark, M., Gangopadhyay, S., Hay, L., Rajagopalan, B., & Wilby, R. (2004). The Schaake shuffle: A method for reconstructing space–time variability in forecasted precipitation and temperature fields. *Journal of Hydrometeorology*, 5(1), 243-262.
- Fowler, K., Peel, M., Western, A., & Zhang, L. (2018). Improved rainfall-runoff calibration for drying climate: Choice of objective function. *Water Resources Research*, 54(5), 3392-3408.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., ... & Thépaut, J. N. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999-2049.
- 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(1-2), 80-91.
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *Journal of hydrology*, 10(3), 282-290.
- Parajka, J., Merz, R. and Blöschl, G. (2007), Uncertainty and multiple objective calibration in regional water balance modelling: case study in 320 Austrian catchments. *Hydrol. Process.*, 21: 435-446. <https://doi.org/10.1002/hyp.6253>
- Shapiro, S. S., & Wilk, M. B. (1965). An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, 52(3/4), 591-611.
- Schefzik, R. (2015). *Physically coherent probabilistic weather forecasts using multivariate discrete copula-based ensemble postprocessing methods*. Tesis Doctoral del la Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas de la Universidad Ruprecht Karls, Heidelberg. DOI: [10.11588/heidok.00018028](https://doi.org/10.11588/heidok.00018028)
- Schefzik, R. (2016). A similarity-based implementation of the Schaake shuffle. *Monthly Weather Review*, 144(5), 1909-1921.
- Troin, Magali, Richard Arsenault, Andrew W. Wood, François Brissette, and Jean-Luc Martel. (2021). "Generating ensemble streamflow forecasts: A review of methods and approaches over the past 40 years." *Water Resources Reserach*, 57, e2020WR028392. DOI:10.1029/2020WR028392.
- Vrac, M., & Friederichs, P. (2015). Multivariate—intervariable, spatial, and temporal—bias correction. *Journal of Climate*, 28(1), 218-237.

HIDRO-GRAFÍA

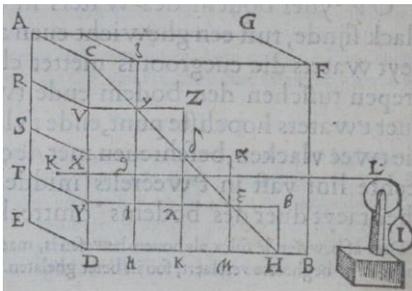
ALDO TAMBURRINO TAVANTZIS

La Hidro-Grafía de este número corresponde a una pintura del flamenco Hieronymus Francken el Joven (1578-1623), titulada “Los Archiduques en el Gabinete de un Colector”. De la pintura, es de interés el aparato sobre la mesa, que en una publicación de 1612 aparece como la imagen del lado derecho. Este aparato corresponde a:



- Un reloj accionado por el movimiento oscilatorio del agua que se encuentra en el tubo exterior (DC)
- El diseño de un péndulo para ser usado en navegación, el que se mantiene siempre vertical debido a la oscilación, inducida por el movimiento del barco, del agua en el tubo exterior
- El diseño de un aparato para determinar la densidad relativa de dos materiales sólidos con los que puede estar formado un cuerpo. La diferencia de densidades del cuerpo, ubicado al centro, atrae de distinta manera el agua a cada lado del tubo DC y el desnivel permite conocer la diferencia relativa de densidades.

NÚMERO ANTERIOR



La respuesta correcta es c): Un método para determinar analíticamente la fuerza hidrostática que se ejerce en un plano vertical, que aparece en el libro *De Beghinselen des waterwichts beschreuen* (*Los principios del peso del agua descritos*), publicado en 1586 en Leyden. Escrito originalmente en holandés (antiguo) por el flamenco Simon Stevin, el autor aborda distintos aspectos de la

hidrostática que aún se mantenían sin explicación en su época y se cuestionaba ciertos aspectos de la hidrostática de Arquímedes. Una de las conclusiones que Stevin publica en su libro es que la fuerza hidrostática sobre una pared vertical no depende de la cantidad de agua, sino que solamente de la altura de la columna líquida. Además, *supone* (no lo demuestra) que la fuerza horizontal es igual al peso. Con este supuesto, y usando la figura presentada en la Hidro-Grafía, concluye que la fuerza de presión sobre el plano vertical de la figura (ACDE) es $\gamma bH^2/2$, siendo γ la gravedad del agua (peso específico), b el ancho y H la altura del plano. El cálculo lo hace dividiendo el plano en 4 bandas horizontales (ACVR, RVXS, SXYT, TYDE), generando el escalón mostrado en la figura, luego lo subdivide en 8, 16, 32, etc., hasta que el escalón se reduce a una recta.

INVITACION A CONTRIBUIR CON ARTÍCULOS

La Revista de la Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica invita a contribuir con artículos para ser publicados en sus próximos números. Los artículos pueden ser en castellano o inglés.

Los artículos buscan difundir trabajos en el área de interés de la Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica, especialmente aquellos relativos a la hidráulica, hidrología y mecánica de fluidos en general, así como otros aspectos relacionados con el agua, como su uso, gestión, recursos, tecnologías, historia, etc. Los artículos pueden ser de investigación teórica o aplicada, soluciones novedosas a problemas de ingeniería, difusión u otros temas de interés para la comunidad hidráulica nacional.

El formato de presentación de los trabajos puede solicitarse al Editor a la dirección electrónica atamburr@uchile.cl

