

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



**EVALUACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO CEMANEIGE-GR6J PARA
LA CUENCA DEL RÍO AYSÉN**

ALEXIS NICOLÁS ROGEL OYARZÚN

PROYECTO DE TÍTULO
PRESENTADO A LA FACULTAD DE
INGENIERÍA AGRÍCOLA DE LA
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN,
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL AGRÍCOLA

CHILLÁN-CHILE

2025

**EVALUACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO CEMANEIGE-GR6J PARA
LA CUENCA DEL RÍO AYSÉN**

Aprobado por:

Sebastián Krogh Navarro
Ingeniero Civil, Ph. D.
Profesor Asociado

Profesor Guía

José Luis Arumí
Ingeniero Civil, Ph.D.
Profesor Titular

Profesor asesor

Nicole Uslar Valle
Ingeniero Civil Agrícola, Ph. D.
Evaluador externo

Asesor externo

José Luis Arumí
Ingeniero Civil, Ph.D.
Profesor Titular

Director de Departamento

Octavio Lagos Roa
Ingeniero Civil Agrícola, Ph. D.
Profesor Titular

Decano

ÍNDICE DE MATERIAS

| | |
|--|----|
| RESUMEN | 1 |
| ABSTRACT | 3 |
| 1. INTRODUCCIÓN | 5 |
| 1.1 ANTECEDENTES DEL ÁREA DE ESTUDIO | 9 |
| 1.1.1 Ubicación | 9 |
| 1.1.2 Red hidrometeorológica | 12 |
| 1.1.3 Clima | 14 |
| 1.1.4 Descripción demográfica | 15 |
| 1.1.5 Régimen hidrológico | 16 |
| 2. HIPÓTESIS | 18 |
| 3. OBJETIVOS | 18 |
| 3.1 Objetivos generales | 18 |
| 3.2 Objetivos específicos | 18 |
| 4. METODOLOGÍA | 19 |
| 4.1 Datos de entrada del modelo | 19 |
| 4.2 Modelo hidrológico CemaNeige-GR6J | 22 |
| 4.3 Distribución de las rutinas | 27 |
| 4.4 Calibración del modelo hidrológico | 31 |
| 4.5 Creación de escenarios para validación cruzada | 33 |
| 4.6 Caracterización de tipos de año | 34 |
| 4.7 Análisis de sensibilidad del modelo hidrológico | 36 |
| 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 38 |
| 5.1 Evaluación de validación cruzada | 38 |
| 5.2 Evaluación por tipo de año | 58 |
| 5.3 Respuesta al análisis de sensibilidad a los parámetros | 63 |
| 5.4 Evaluación de la rutina de nieve | 69 |
| 6. CONCLUSIONES | 77 |
| 7. REFERENCIAS | 80 |

ÍNDICE DE TABLAS

| En texto | Pagina |
|---|--------|
| Tabla 1. Información de las 5 subcuencas contenidas en el área de estudio..... | 11 |
| Tabla 2. Información de las estaciones fluviométricas presentes en la cuenca del Río Aysén. Sistema de coordenadas World Geodetic System 1984, UTM (Universal Transverse Mercator), uso 18 sur..... | 12 |
| Tabla 3. Información de las estaciones meteorológicas presentes en la cuenca del Río Aysén. Sistema de coordenadas World Geodetic System 1984, UTM (Universal Transverse Mercator), uso 18 sur..... | 13 |
| Tabla 4. Localidades presentes en la cuenca del Río Aysén y su cantidad aproximada de habitantes..... | 15 |
| Tabla 5. Información de los parámetros de las distintas rutinas del modelo CemaNeige-GR6J..... | 22 |
| Tabla 6. Periodos de calibración y validación para cada escenario a evaluar..... | 31 |
| Tabla 7. Clasificación climática de los años del periodo 1996–2020 según percentiles de precipitación y temperatura..... | 33 |
| Tabla 8. Parámetros utilizados en el modelo CemaNeige-GR6J y su valor inicial..... | 35 |
| Tabla 9. Métricas para evaluar el desempeño del modelo, comparando caudal simulado y caudal observado para cada escenario y periodo..... | 36 |
| Tabla 10. Caracterización de los tipos de año presentes en el periodo evaluado de 1996 a 2020..... | 54 |
| Tabla 11. Rendimiento del modelo para el escenario 1 en función de los tipos de año, métricas calculadas para todo el periodo de estudio..... | 55 |
| Tabla 12. Rendimiento del modelo para el escenario 2 en función de los tipos de año, métricas calculadas para todo el periodo de estudio..... | 55 |
| Tabla 13. Rendimiento del modelo para el escenario 3 en función de los tipos de año, métricas calculadas para todo el periodo de estudio..... | 55 |
| Tabla 14. Respuesta en las métricas de evaluación del modelo, a la variación del valor inicial del parámetro coeficiente de escorrentía directa (X2) (Periodo 1996 a 2020) | 63 |

| | | |
|----------|--|----|
| Tabla 15 | Respuesta en las métricas de evaluación del modelo, a la variación del valor inicial del parámetro tiempo de retardo (X4) (Periodo 1996 a 2020)..... | 63 |
|----------|--|----|

ÍNDICE DE FIGURAS

| En texto | | Pagina |
|-----------|---|--------|
| Figura 1 | La zona de estudio, donde se ve en la figura de la izquierda y destaca en color amarillo la ubicación de la región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo en Chile y, a la derecha, se puede observar azul la ubicación de la cuenca del Río Aysén, contenida dentro de la región mencionada. Sistema de coordenadas World Geodetic System 1984, UTM (Universal Transverse Mercator), uso 18 sur..... | 10 |
| Figura 2 | Cuenca del río Aysén, red hidrográfica, cuerpos lacustres, estaciones hidrometeorológicas de la DGA. Sistema de coordenadas World Geodetic System 1984, (Universal Transverse Mercator), uso 18 sur..... | 11 |
| Figura 3 | Caudal medio mensual para la cuenca del Río Aysén, datos de caudal recopilados de la estación del Río Aysén en Puerto Aysén. (Elaborado a partir de datos recopilados entre los años 1996 y 2020, información extraída del explorador de cuencas hidrográficas de CAMELS-CL) | 16 |
| Figura 4 | Modelo digital de elevación (DEM) correspondiente a la cuenca del río Aysén, generado a partir de la información del satélite ALOS PALSAR..... | 20 |
| Figura 5 | Curva hipsométrica de la cuenca del río Aysén, delimitada a partir de modelo de elevación digital (DEM) proveniente del satélite ALOS PALSAR..... | 20 |
| Figura 6 | Diagrama de flujo de la rutina CemaNeige (Rutina de nieve). Fuente: Adaptado de Valéry et al. 2014..... | 23 |
| Figura 7 | Diagrama de flujo de GR6J (Rutina hidrológica). Fuente: Adaptado de Valéry et al. 2014..... | 23 |
| Figura 8 | Diagrama de la distribución espacial en la rutina CemaNeige, en la cuenca del río Aysén..... | 27 |
| Figura 9 | Curva hipsométrica dividida en las porciones correspondientes a cada banda de elevación utilizada por la rutina CemaNeige..... | 27 |
| Figura 10 | Serie de caudales medios anuales simulados para cada escenario y caudales observados del río Aysén (1996 a 2020) | 38 |
| Figura 11 | Serie de caudales medios mensuales simulados para cada escenario y caudales observados del río Aysén..... | 38 |

| | | |
|-----------|---|----|
| Figura 12 | Comparación de caudales observados y simulados en los distintos escenarios durante el periodo de abril – julio del 2007..... | 39 |
| Figura 13 | Comparación de caudales observados y simulados en los distintos escenarios durante el periodo de agosto– noviembre del 2007..... | 39 |
| Figura 14 | Comparación de caudales observados y simulados en los distintos escenarios durante el periodo de diciembre 2007 a marzo 2008..... | 40 |
| Figura 15 | Comparación de caudales observados y simulados en los distintos escenarios durante el periodo de abril– julio del 2017..... | 40 |
| Figura 16 | Comparación de caudales observados y simulados en los distintos escenarios durante el periodo de agosto– noviembre del 2017..... | 41 |
| Figura 17 | Comparación de caudales observados y simulados en los distintos escenarios durante el periodo de diciembre 2017 a marzo del 2018..... | 41 |
| Figura 18 | Diferencia de caudal simulado y observado en cada año del periodo de evaluación (1996 a 2020), utilizando calibración del escenario 1..... | 47 |
| Figura 19 | Ajuste lineal entre caudales diarios simulados y observados para el primer escenario..... | 49 |
| Figura 20 | Ajuste lineal entre caudales diarios simulados y observados para el segundo escenario..... | 50 |
| Figura 21 | Ajuste lineal entre caudales diarios simulados y observados para el tercer escenario..... | 50 |
| Figura 22 | Curva de duración de caudal diario, para las series simuladas y observadas de caudal para el periodo de estudio 1996 a 2020. Eje Y de magnitud de caudal en escala logarítmica..... | 53 |
| Figura 23 | Distribución del Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) según los tipos de año, para el escenario 1..... | 56 |
| Figura 24 | Distribución del Kling-Gupta Efficiency (KGE) según los tipos de año, para el escenario 1..... | 56 |
| Figura 25 | Distribución del Root Mean Square Error (RMSE) según los tipos de año, para el escenario 1..... | 57 |
| Figura 26 | Distribución de los valores de NSE en función de la variación de los parámetros del modelo, métricas calculadas en el periodo 1996 a 2020..... | 61 |
| Figura 27 | Distribución de los valores de RMSE en función de la variación de los parámetros del modelo, métricas calculadas en periodo 1996–2020..... | 62 |

| | | |
|-----------|--|----|
| Figura 28 | Distribución de los valores de KGE en función de la variación de los parámetros del modelo, métricas calculadas en periodo 1996–2020..... | 62 |
| Figura 29 | Equivalente en agua medio diario, para el periodo de evaluación que va desde 1996 a 2020, Escenario 1 de calibración..... | 67 |
| Figura 30 | Respuesta del derretimiento simulado a la variabilidad térmica diaria durante 2007–2008, bajo los tres escenarios de calibración del modelo..... | 69 |
| Figura 31 | Caudal observado, caudal simulado y derretimiento diario en la cuenca del río Aysén (Abril 2007–Marzo 2008), (Escenario 1) | 69 |
| Figura 32 | Respuesta del derretimiento simulado a la variabilidad térmica diaria durante 2017–2018, bajo los tres escenarios de calibración del modelo..... | 70 |
| Figura 33 | Caudal observado, caudal simulado y derretimiento diario en la cuenca del río Aysén (Abril 2017–Marzo 2018), (Escenario 1) | 70 |

EVALUACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO CEMANEIGE-GR6J PARA LA CUENCA DEL RÍO AYSÉN

EVALUATION OF THE CEMANEIGE-GR6J HYDROLOGICAL MODEL FOR BASINS IN THE AYSÉN REGION

Palabras clave: Modelación Hidrológica, Cuenca Río Aysén, CemaNeige-GR6J, Análisis de sensibilidad, Calibración cruzada.

RESUMEN

La cuenca del río Aysén, ubicada en una zona montañosa del sur de Chile, presenta un régimen pluvio-nival influenciado por procesos de acumulación y derretimiento de nieve. Su difícil acceso, topografía abrupta y limitada cobertura de estaciones dificultan el monitoreo directo y hacen de esta cuenca un sistema desafiante para modelar. Este estudio evalúa el modelo conceptual CemaNeige-GR6J como herramienta simplificada para representar su respuesta hidrológica.

Se utilizaron datos grillados de temperatura, precipitación y evapotranspiración potencial del producto CR2MET (1979–2020), junto con caudales observados de la DGA (1996–2020). La caracterización de la cuenca consideró la curva hipsométrica para aplicar la rutina nival. La calibración se realizó bajo tres escenarios temporales mediante el algoritmo de Michel, utilizando el coeficiente de eficiencia de Nash–Sutcliffe (NSE) como función objetivo.

El modelo mostró mejor desempeño en años fríos y húmedos, con valores de NSE y KGE superiores a 0,75 y un RMSE promedio de 1,15 mm/día. Se

identificó una subestimación sistemática de eventos extremos. El análisis de sensibilidad destacó a X2 (escorrentía directa) y X4 (tiempo de retardo) como los parámetros más influyentes.

Pese a su estructura conceptual simple y al uso de datos no calibrados localmente, CemaNeige-GR6J demostró ser una herramienta confiable para representar la dinámica hidrológica de una cuenca compleja. Su desempeño depende del tipo de año y de una calibración adecuada. Se concluye que su aplicación en contextos con datos limitados aporta valor a la gestión hídrica en zonas de montaña sujetas a alta variabilidad climática.

EVALUATION OF THE CEMANEIGE-GR6J HYDROLOGICAL MODEL FOR BASINS IN THE AYSÉN REGION

Keywords: Hydrological modeling, Aysén River Basin, CemaNeige-GR6J, Sensitivity Analysis, Cross-validation

ABSTRACT

The Aysén River basin, located in a mountainous region of southern Chile, has a pluvio-nival regime influenced by snow accumulation and melt. Its steep topography, limited accessibility, and scarce monitoring make it particularly difficult to model. This study evaluates the conceptual model CemaNeige-GR6J as a simplified yet effective tool for representing the basin's hydrological response.

Inputs included gridded data from CR2MET (1979–2020): temperature, precipitation, and potential evapotranspiration, along with observed streamflow from DGA (1996–2020). Hypsometric analysis supported the elevation-based application of the snow routine. Calibration was conducted using the Michel algorithm under three temporal scenarios, with NSE as the objective function

The model showed better performance in cold and wet years, with NSE and KGE above 0.75 and average RMSE around 1.15 mm/day. X2 (runoff coefficient) and X4 (routing time) were identified as the most sensitive parameters. A correction factor was proposed to address underestimation of peak flows. Despite its conceptual simplicity, CemaNeige-GR6J proved to be a

reliable tool for simulating hydrological behavior in complex mountainous basins with limited data availability. Its capacity to represent daily streamflow depended on the type of year, with wet years having the best performance. This study highlights the need for more meteorological and snow stations in the region to assess the snowmelt and accumulation dynamics simulated by the model.

1. INTRODUCCIÓN

Chile posee una gran heterogeneidad de climas y paisajes, además de poseer muchos recursos naturales, destacando el agua por ser un recurso vital para el desarrollo económico y social, especialmente en sectores clave como la agricultura y la minería, fundamentales para la economía nacional (DGA 2022). La geografía que presenta Chile genera dificultades en la administración de los recursos hídricos.

A pesar de que Chile tiene una disponibilidad promedio de agua de 55.640 m³ por persona al año, muy superior al valor de 2.000 m³ por persona al año que se toma como umbral para el desarrollo sostenible (OCDE, 2018), en muchas zonas del país los recursos hídricos son limitados. Durante el último tiempo hemos visto como por efecto del cambio climático se experimenta una alteración del aporte de precipitaciones y registro de temperaturas (SNU, 2021), generando incertidumbre para la cuantificación de la disponibilidad futura de los recursos hídricos. Según los desafíos nacionales, como el efecto del cambio climático y el aumento sostenido de la demanda por agua, toma relevancia el mejoramiento continuo de la cuantificación, planificación y gestión de los recursos hídricos. Lo anterior requiere de la aplicación de nuevas tecnologías y estrategias para obtener mediciones hidrometeorológicas más precisas y con mayor representatividad espacial, las cuales apoyen de mejor manera la toma de decisiones. Se necesitan datos

confiables y fáciles de usar para entender mejor los desafíos del cambio climático y los eventos extremos (Aguayo y otros 2024).

El organismo del estado que debe preocuparse por el cuidado de los recursos hídricos y su gestión es la Dirección General de Aguas (DGA), la cual tiene como una de sus funciones mantener y operar el servicio hidrométrico nacional, proporcionar y publicar la información correspondiente. El monitoreo en Chile, a través de mediciones de datos hidrometeorológicos, ayuda a comprender y a llevar la cuenta de la cantidad de agua disponible a lo largo del país. Son 650 estaciones con las que opera el servicio hidrométrico nacional de la dirección general de aguas (DGA 2024), las cuales registran parámetros fluviométricos (caudal, nivel y temperatura del agua), meteorológicos (precipitación, temperatura, humedad del aire, entre otros), calidad de agua (pH, oxígeno disuelto y turbiedad del agua), nivométricos (altura de nieve y equivalente en agua de la nieve), glaciológicos, además de los niveles y volúmenes de embalses y lagos. Estos datos se transmiten en línea a través de un sistema satelital o General Packet Radio Service (GRPS). Dentro de estas estaciones las que se encuentran en menor cantidad son las estaciones nivométricas (DGA 2024). La información que se genera con el monitoreo es vital para la gestión y planificación de los recursos hídricos en Chile.

Los modelos hidrológicos, los cuales simulan el ciclo hidrológico, permiten disponer de estimaciones de caudales en cuencas con escasos datos, como

también realizar análisis de cambio climático (Cabrera J, 2017) y usos de suelo, entre otros. Existen modelos hidrológicos que usan ecuaciones matemáticas basadas en principios físicos para representar procesos hidrológicos como escorrentía, evapotranspiración o infiltración. Estos últimos son se denominan modelos de base física. Los modelos conceptuales representan simplificada los procesos hidrológicos, típicamente en base a una serie de embalses lineales conectados en serie o paralelo. Y finalmente, los modelos empíricos que usan ecuaciones empíricas simplificadas para representar los procesos del ciclo del agua. Estos dos últimos modelos requieren de la calibración de sus parámetros, mientras que los modelos de base física poseen parámetros que se pueden medir en terreno típicamente. Los modelos además se pueden clasificar por criterios como su complejidad, escala espacial, escala temporal y el propósito de la modelación (Chow V, 1994). El uso de modelos genera la ventaja de comprender y predecir el comportamiento del sistema hidrológico. Para utilizarlos se requieren de datos precisos y actualizados para la calibración y validación, además de necesitan recursos computacionales para su ejecución.

Cuando se habla de la reserva de agua dulce en Chile, se tiende a relacionar con la Patagonia, donde aún podemos encontrar cuencas prístinas, además del 98% de la superficie de los glaciares de Chile continental (campo de hielo norte y sur) y unos de los lugares con mayores precipitaciones a nivel nacional, todo esto hace que se pueda nombrar a la Patagonia como la mayor reserva

de agua dulce del país (CIEP, 2023). Por lo tanto, el estudio y monitoreo en lugares estratégicos como la Patagonia es vital para entender los desafíos hídricos que tendrá el país bajo escenarios de calentamiento global (SNU, 2021). En este trabajo se evaluará el desempeño del modelo CemaNeige-GR6J en la cuenca del Río Aysén, siendo una cuenca importante para la región por contener a las dos ciudades más pobladas en la Región de Aysén (Aysén y Coyhaique) y las actividades que ahí se desarrollan (INE, 2017).

1. 1 ANTECEDENTES DEL ÁREA DE ESTUDIO

1.1.1 Ubicación

El estudio se realizará sobre la cuenca de Río Aysén, la cual, pertenece a la Región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo como se observa en la Figura 1. La cuenca se extiende entre los paralelos 45° y 46°16' latitud sur y meridianos 71°20' y 73° longitud oeste, posee una superficie de 11.456 Km², esta área contiene 5 subcuencas y 30 subsubcuencas. La cuenca cubre parcialmente las provincias de Aysén y Coyhaique, Las subcuencas que componen la superficie de la cuenca del río Aysén se describen en Tabla 1, donde se identifica el código del banco nacional de aguas (BNA), el nombre y la superficie que corresponde a cada subcuenca.

Además, en la figura 2 se observa el área de estudio la cuenca del río Aysén, la cual corresponde a una cuenca exorreica, donde, presenta una hidrografía en la cual destacan los ríos Mañihuales y Simpson, los cuales confluyen para formar el río Aysén, que fluye en dirección este a oeste hasta su desembocadura en el fiordo Aysén. Otros afluentes relevantes incluyen el río Riesco, el río Blanco Oeste y el río Pangal. Al observar la elevación, el área de estudio posee superficie al nivel del mar en el sector oeste y hasta más de 2.200 metros sobre el nivel del mar en la cordillera oriental, generando un marcado gradiente altitudinal que condiciona los procesos hidrológicos presentes. La cuenca alberga varios cuerpos lacustres importantes como los lagos Elizalde, Riesco y La Paloma, siendo el primero el más extenso, con una

superficie superior a 25 km². Estos lagos se concentran mayormente en el sector sur de la cuenca. Además, la red hidrometeorológica incluye estaciones fluviométricas y meteorológicas distribuidas de forma heterogénea, con presencia limitada de estaciones nivométricas.

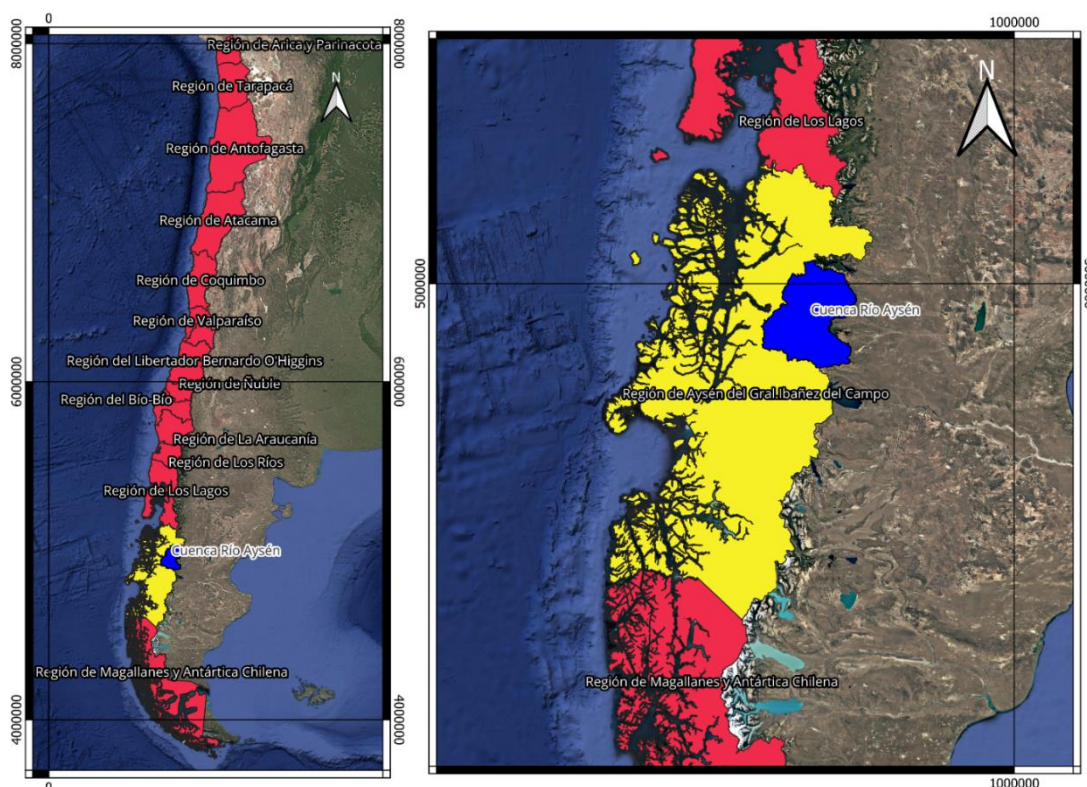


Figura 1. La zona de estudio, donde se ve en la figura de la izquierda y destaca en color amarillo la ubicación de la región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo en Chile y, a la derecha, se puede observar azul la ubicación de la cuenca del Río Aysén, contenida dentro de la región mencionada. Sistema de coordenadas World Geodetic System 1984, UTM (Universal Transverse Mercator), uso 18 sur.

Tabla 1. Información de las 5 subcuencas contenidas en el área de estudio.

| Código | Nombre subcuenca | Área (km ²) |
|---------------|--|-------------------------|
| Subcuenca BNA | | |
| 1131130 | Río Mañihuales | 4232,0 |
| 1131131 | Río Simpson | 3358,8 |
| 1131132 | Río Aysén bajo Junta Mañihuales-Simpson y Río Riesco | 66,3 |
| 1131133 | Río Riesco | 2902,1 |
| 1131134 | Río Aysén entre Río Riesco y Desembocadura | 897,6 |

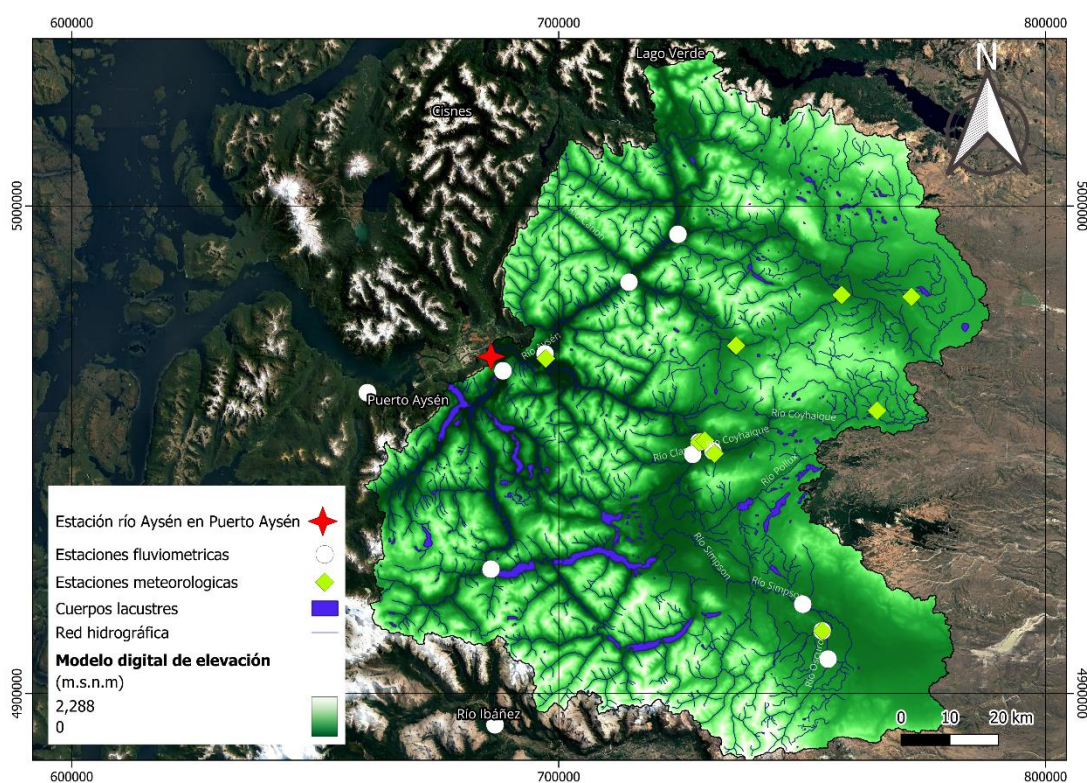


Figura 2. Cuenca del río Aysén, red hidrográfica, cuerpos lacustres, estaciones hidrometeorológicas de la DGA. Sistema de coordenadas World Geodetic System 1984, (Universal Transverse Mercator), uso 18 sur.

1.1.2 Red hidrometeorológica

La cuenca contiene una serie de nueve estaciones meteorológicas y nueve estaciones fluviométricas, las cuales son las utilizadas para monitoreo de datos hidrometeorológicos, la información de las coordenadas y código del banco nacional de aguas de cada estación están descritas en Tabla 2 y 3, los datos hidrometeorológicos obtenidos en estas estaciones ayudan a describir el comportamiento de la cuenca, existen registros desde el año 1969.

Tabla 2. Información de las estaciones fluviométricas presentes en la cuenca del Río Aysén. Sistema de coordenadas World Geodetic System 1984, UTM (Universal Transverse Mercator), uso 18 sur.

| Nombre de la estación fluviométrica | Código BNA | Coordenada Este | Coordenada Norte |
|--|------------|-----------------|------------------|
| Río Coyhaique En Tejas Verdes | 11316001-2 | 731677 | 4949739 |
| Río Claro En Piscicultura | 11315001-7 | 727525 | 4949047 |
| Río Huemules Frente Cerro Galera | 11310001-K | 284233 | 4919588 |
| Río Blanco En Desagüe Lago Caro | 11335002-4 | 686084 | 4925498 |
| Río Oscuro En Camino Cerro Portezuelo | 11310002-8 | 290256 | 4908761 |
| Río Ñireguao En Villa Mañihuales | 11302001-6 | 724498 | 4994183 |
| Río Emperador Guillermo Antes Junta Mañihuales | 11307001-3 | 714428 | 4984355 |
| Río Mañihuales Antes Junta Río Simpson | 11308001-9 | 697207 | 4969635 |
| Río Blanco Antes Junta Río Aysén | 11337001-7 | 688566 | 4966189 |

Tabla 3. Información de las estaciones meteorológicas presentes en la cuenca del Río Aysén. Sistema de coordenadas World Geodetic System 1984, UTM (Universal Transverse Mercator), uso 18 sur.

| Nombre de la estación meteorológica | Código BNA | Coordenada Este | Coordenada Norte |
|--|------------|--------------------|------------------|
| ÑIREHUAO | 11302002-4 | 287446 | 4983444 |
| VILLA ORTEGA | 11307002-1 | 266633 | 4971463 |
| COYHAIQUE ALTO | 11316004-7 | 296460 | 4960351 |
| COYHAIQUE (ESCUELA AGRICOLA) | 11316003-9 | 732010 | 4949233 |
| RIO SIMPSON BAJO JUNTA COYHAIQUE | 11317001-8 | 728844 | 4951583 |
| COYHAIQUE CONAF | 11317005-0 | 729985 | 4951860 |
| RIO BLANCO CHICO ANTES JUNTA OSCURO | 11310003-6 | 288629 | 4914439 |
| RIO AYSÉN EN PUERTO AYSÉN | 11342001-4 | 685996 | 4969032 |
| EL BALSEO | 11318002-1 | 697342 | 4968711 |

1.1.3 Clima

En la zona de estudio predomina un clima frío oceánico, con altas precipitaciones y temperaturas bajas, además de fuertes vientos y alta humedad. Las características del relieve provocan una diferencia de climas en los distintos sectores de la cuenca, el sector hacia el Oeste está formado por islas y archipiélagos, y en el sector Este predomina la cordillera (BCN, 2024).

Las precipitaciones que se generan en el sector Oeste de la cuenca están influenciadas por el clima frío oceánico y fluctúan entre los 3.000 mm anuales, además se presentan temperaturas bajas, teniendo un promedio anual de 8 a 9 °C. Para el sector este de la cuenca, bajan considerablemente las precipitaciones por el efecto de la cordillera, como es el caso de la comuna de Coyhaique la cual presenta una precipitación promedio cercana a los 1.000 mm anuales, la temperatura sigue siendo bajas y registrando el mes más frío (julio) con una temperatura promedio de 2 °C (BCN, 2024).

En la Región de Aysén se observa un valor de la isoterma 0 entre los 1.200 a 1.500 metros sobre el nivel del mar en invierno y en verano alcanzar un valor de 2.000 metros sobre el nivel del mar, pero esto depende de las condiciones meteorológicas y topografía, el valor puede variar por factores como la humedad atmosférica o las precipitaciones (Montecinos, 2020).

1.1.4 Descripción demográfica

La cuenca del Río Aysén contiene a las ciudades de Coyhaique (Capital regional) y Puerto Aysén, además de otras localidades importantes por su número de habitantes como lo son Villa Mañihuales, Balmaceda y Villa Simpson, visible en la Tabla 4. Las ciudades de la cuenca están cerca del punto de salida de la cuenca (sector oeste) para Puerto Aysén y Coyhaique al centro, ubicándose en el sector este, cercano a la cordillera, ambas ciudades son asentamientos junto a un curso de agua, como el Río Aysén para Puerto Aysén y en el caso de la ciudad de Coyhaique es el Río Simpson.

Tabla 4. Localidades presentes en la cuenca del Río Aysén y su cantidad aproximada de habitantes.

| Localidad | Cantidad de habitantes |
|---------------|------------------------|
| Coyhaique | 57.818 |
| Puerto Aysén | 23.959 |
| Mañihuales | 3.000 |
| Balmaceda | 600 |
| Valle Simpson | 500 |

Para la ciudad de Coyhaique, la población se divide en 29.055 mujeres y 28.763 hombres, mientras que en la ciudad de Puerto Aysén se divide en 11.240 mujeres y 12.719 hombres. La cuenca contiene a la mayoría de población de la Región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Capo, ya que, la región posee un aproximado de 103.158 habitantes, según el Censo

realizado el año 2017. Además, por el mismo Censo se determina un porcentaje de población rural del 20,4%. Otra cifra interesante es la población perteneciente a pueblo indígenas u originarios de la región con un porcentaje de 28,7% de la región (INE, 2017).

1.1.5 Régimen hidrológico

El régimen hidrológico de la cuenca es pluvio-nival, marcado por las abundantes precipitaciones, que, al combinarse con la topografía montañosa presente en la región, generan numerosos ríos y otros cuerpos de agua. En la figura 3 podemos ver el caudal medio mensual del río Aysén y la precipitación media mensual presente en la cuenca, durante los años 1996 – 2020.

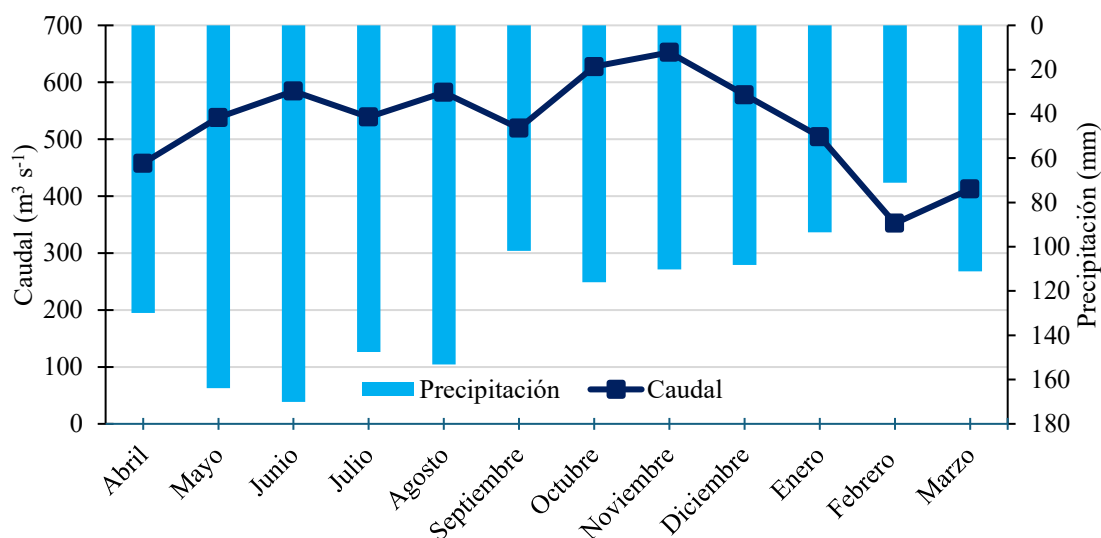


Figura 3. Caudal medio mensual para la cuenca del Río Aysén, datos de caudal recopilados de la estación del Río Aysén en Puerto Aysén. (Elaborado a partir de datos recopilados entre los años 1996 y 2020, información extraída del explorador de cuencas hidrográficas de CAMELS-CL).

Como se puede observar en la Figura 3, La cuenca del río Aysén presenta un régimen hidrológico pluvio-nival, caracterizado por la combinación de abundantes precipitaciones y acumulación de nieve durante el invierno. Observando la Figura 3, el caudal medio mensual incrementa desde abril, alcanzando su punto máximo en noviembre con un valor de $652 \text{ m}^3/\text{s}$. Este aumento se relaciona con el inicio de primavera donde parte el proceso de derretimiento de nieve acumulada durante el invierno. Durante ese mismo mes, la precipitación promedio alcanza los 110 mm.

En contraste, el valor mínimo de caudal medio mensual ocurre en febrero, con $352 \text{ m}^3/\text{s}$, coincidiendo con la menor precipitación promedio mensual (71 mm) y con el periodo estival. Se observa una relación directa entre el régimen de precipitaciones y la respuesta del caudal, aunque en los meses fríos, parte de esa precipitación se almacena como nieve, lo que afecta al impacto sobre el caudal. Esta dinámica refleja la influencia significativa de la componente nival sobre la hidrología estacional de la cuenca y se puede observar en el grafico desde el mes de junio hasta septiembre, donde empieza la transición a primavera.

2. HIPÓTESIS

El modelo hidrológico CemaNeige-GR6J es capaz de representar de manera razonable la hidrología de cuencas Patagónicas como la cuenca del río Aysén, donde los procesos de acumulación y derretimiento de nieve son fundamentales.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivos generales

Evaluar el desempeño del modelo hidrológico CemaNeige-GR6J en la cuenca del Río Aysén.

3.2 Objetivos específicos

- Evaluar el impacto al utilizar distintos períodos de calibración/validación en el desempeño del modelo
- Evaluar la sensibilidad de los parámetros del modelo CemaNeige-GR6J aplicado en la cuenca del río Aysén.
- Identificar para qué tipo de años (ej., húmedo vs seco, y cálido vs frío) el modelo tiene un mejor desempeño.

4. METODOLOGÍA

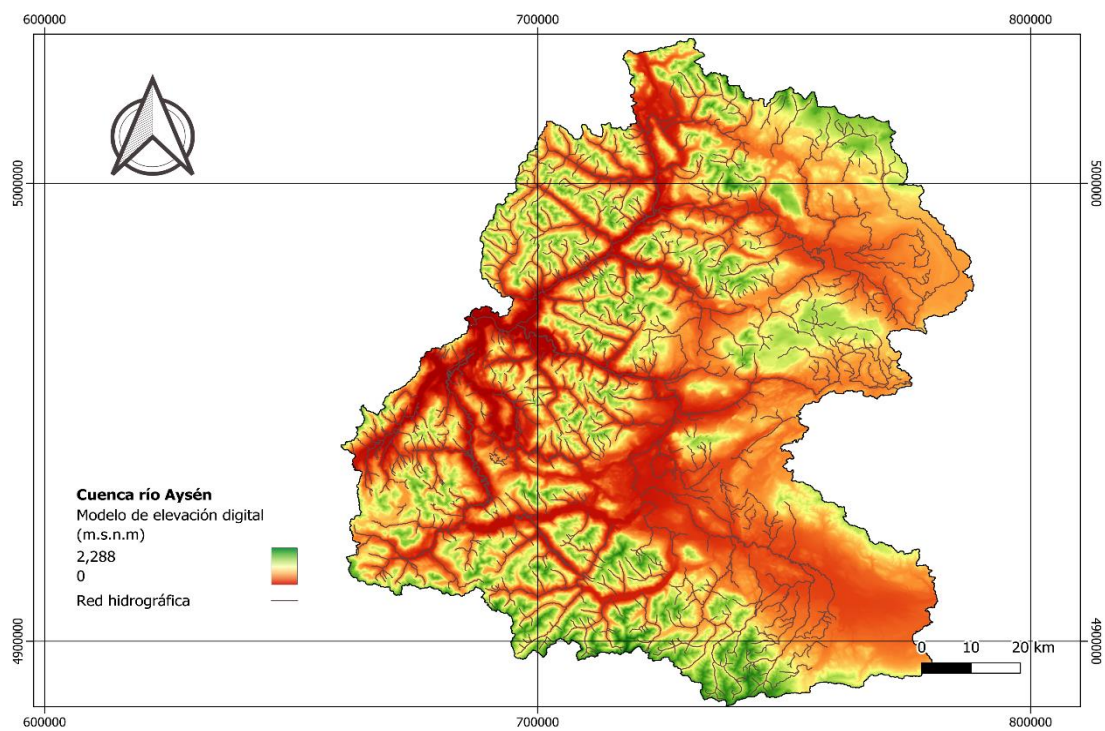
4.1 Datos de entrada del modelo

Para llevar a cabo la modelación hidrológica con el modelo CemaNeige-GR6J, se requiere de un conjunto de datos diarios que incluyen precipitación, temperatura media del aire y evapotranspiración potencial. Además, es necesario contar con información morfométrica de la cuenca, como su área, altitud media, y la curva hipsométrica, la cual describe la distribución del área en función de la elevación. Estos parámetros permiten configurar el modelo para representar los flujos de nieve y de agua en la cuenca del río Aysén. Los datos meteorológicos utilizados provienen del producto grillado CR2MET, desarrollado por el Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (Alvarez-Garretón et al., 2018). Este conjunto de datos cubre el período de 1979 a 2020, con una resolución espacial de 5 km x 5 km y una resolución temporal diaria. Las variables meteorológicas consideradas incluyen la precipitación diaria, las temperaturas máximas y mínimas diarias, y la evapotranspiración potencial. Para su uso en el modelo, las temperaturas máximas y mínimas se promediaron para obtener la temperatura media diaria. Estos datos meteorológicos fueron seleccionados por su alta resolución y cobertura temporal completa, lo que los hace ideales para modelar la cuenca del río Aysén donde no se presenta una linealidad de los datos observados, teniendo en consideración que existen años sin datos o sin medición en muchas de las estaciones meteorológicas y fluviométricas presentes en la cuenca. Por su

parte, la información de caudales fue extraída desde la base de datos CAMELS-CL, desarrollada por Alvarez-Garretón et al. (2018), la cual recopila datos de 516 cuencas chilenas con base en los registros de la Dirección General de Aguas (DGA). En este caso, se utilizó la estación de Río Aysén en Puerto Aysén con código 11342001 del Banco Nacional de Aguas (BNA), cuyos registros de caudales diarios abarcan el período de 1996 a 2020. Los datos de caudales poseen vacíos en su información, los cuales se dejaron de esa forma para efectos de la calibración del modelo (más adelante). El caudal en m^3/s fue convertido a $\text{mm}/\text{día}$ para su compatibilidad con el modelo CemaNeige-GR6J.

A diferencia de los datos meteorológicos que cubren todo el período de estudio, los datos de caudales presentan vacíos, por lo que se decidió no rellenarlos, utilizando solo los días con registros completos para evaluar el modelo.

La delimitación de la cuenca del río Aysén se realizó utilizando el software de sistema de información geográfica (SIG) QGIS, complementado con datos georreferenciados proporcionados por la Dirección General de Aguas (DGA). Esta información incluye la red hidrográfica, estaciones meteorológicas y fluviométricas relevantes para el análisis. El punto de salida de la cuenca se definió en la ubicación de la estación fluviométrica río Aysén en Puerto Aysén (código BNA 11342001). A partir de esta referencia, y con el apoyo de las herramientas del módulo GRASS (Complemento de QGIS), se llevó a cabo la



curva hipsométrica, la cual relaciona la altura con el porcentaje de área y

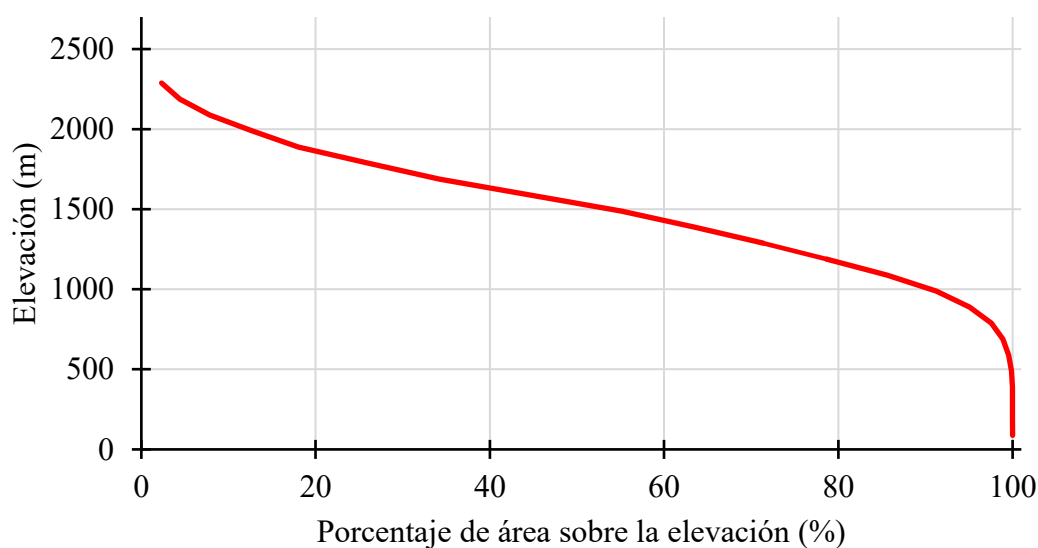
permite dividir la cuenca en bandas de elevación para el modelo CemaNeige.

Figura 4. Modelo digital de elevación (DEM) correspondiente a la cuenca del río Aysén, generado a partir de la información del satélite ALOS PALSAR.

Figura 5. Curva hipsométrica de la cuenca del río Aysén, delimitada a partir de modelo de elevación digital (DEM) proveniente del satélite ALOS PALSAR.

4.2 Modelo hidrológico CemaNeige-GR6J

El modelo aplicado en este estudio es una extensión del GR6J, el cual integra el módulo nival CemaNeige para representar procesos de acumulación y derretimiento de nieve en cuencas con régimen pluvio-nival. CemaNeige funciona de manera semi-distribuida, dividiendo la cuenca en bandas



altitudinales que permiten una representación espacial simplificada del manto nival. Por esto, el modelo requiere información sobre la elevación media y la distribución altitudinal de la cuenca, obtenida de la curva hipsométrica, lo que

permite aplicar un gradiente térmico y un gradiente de precipitación definidos por el usuario. El proceso de acumulación y fusión de nieve se modela a través del método grado-día, que estima la cantidad de nieve derretida en función de la temperatura media del aire. El modelo utiliza datos diarios de temperatura media, precipitación (líquida y sólida) y evapotranspiración potencial para estimar el balance hídrico y generar series simuladas de caudal, acumulación de nieve y fusión nival. Al ser un modelo conceptual, se requiere calibración y validación mediante datos observados para ajustar sus parámetros y mejorar la precisión de las simulaciones (Valéry et al., 2010; Coron et al., 2017).

Los parámetros necesarios para hacer correr el modelo están separados por los del módulo de GR6J que contempla 6 parámetros y el módulo CemaNeige que presenta 2 parámetros, en la tabla 5 se observa la información de cada uno de los parámetros utilizados en el modelo. Además, en las figuras 6 y 7 se puede observar el diagrama de flujo de cada rutina.

Tabla 5. Información de los parámetros de las distintas rutinas del modelo CemaNeige-GR6J.

| Nombre del parámetro | Parámetro | Unidad | Descripción |
|---|-----------|--------------|--|
| Capacidad del reservorio de producción | X1 | mm | Capacidad máxima del depósito de producción, relacionada con la infiltración. |
| Coefficiente de escorrentía directa | X2 | adimensional | Controla la proporción de precipitación que genera flujo directo sin infiltración. |
| Capacidad del reservorio de escorrentía lenta | X3 | mm | Almacenamiento subterráneo asociado a caudales de base. |
| Tiempo de retardo | X4 | días | Tiempo característico para la respuesta de la cuenca (constante del hidrograma unitario). |
| Percolación (coeficiente de ajuste) | X5 | mm/día | Tasa de transferencia entre reservorios, influye en el equilibrio entre escorrentía superficial y subterránea. |
| Coefficiente de escorrentía subterránea | X6 | mm/día | Controla la forma de vaciado del almacenamiento exponencial. |
| Umbral de temperatura para precipitación sólida | CNX1 | °C | Determina si la precipitación es sólida o líquida. |
| Tasa máxima de derretimiento de nieve | CNX2 | mm/ (°C día) | Controla la velocidad de derretimiento del manto nival según temperatura. |

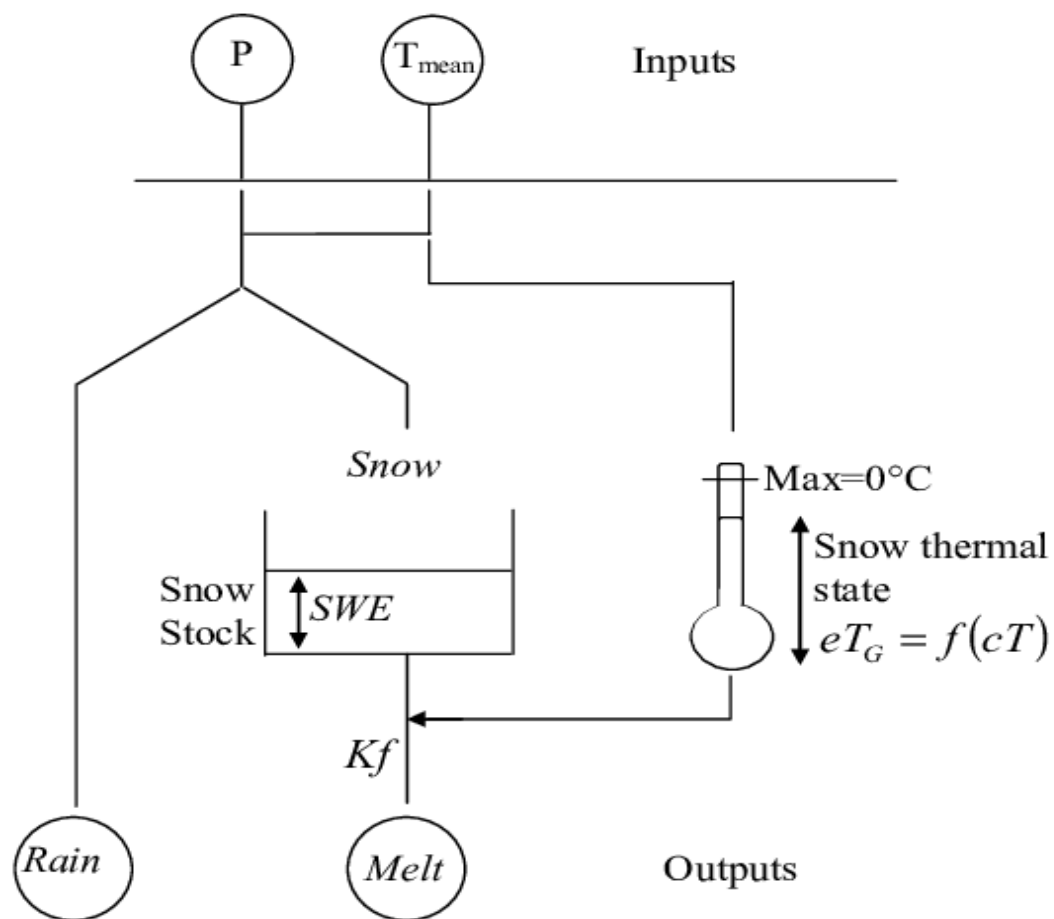


Figura 6. Diagrama de flujo de la rutina CemaNeige (Rutina de nieve).
Fuente: Adaptado de Valéry et al. 2014.

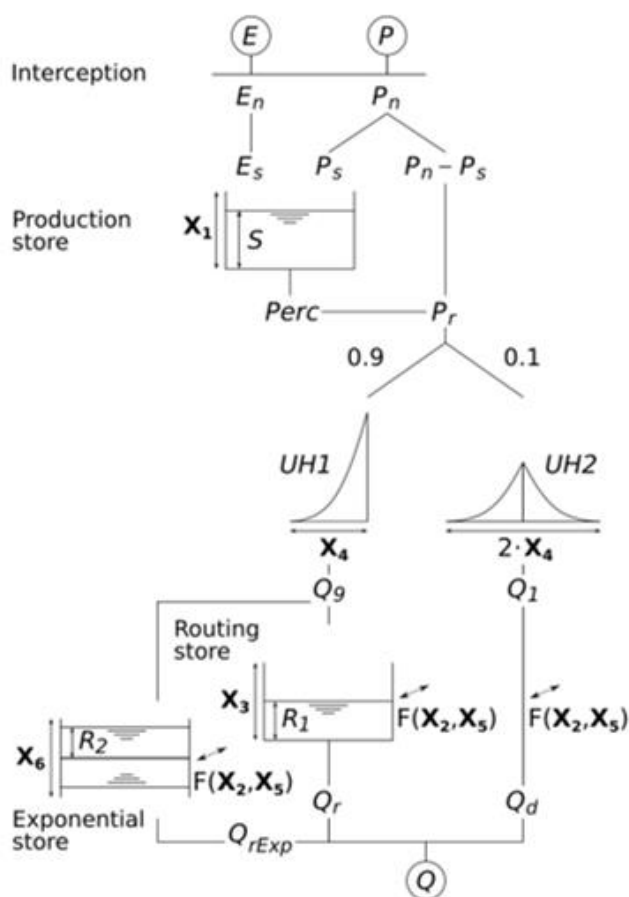


Figura 7. Diagrama de flujo de GR6J (Rutina hidrológica). Fuente: Adaptado de Valéry et al. 2014.

La Figura 6 contiene el diagrama de la rutina CemaNeige, donde se representan las entradas meteorológicas necesarias para la simulación del proceso nival, siendo estas la precipitación (P) y la temperatura media del aire (T_{mean}). Con la temperatura el modelo distribuye la precipitación entre componente sólida y líquida, permitiendo simular adecuadamente los procesos nivosos. A partir de esta separación, el modelo calcula el equivalente en agua de nieve acumulada (SWE) y el estado térmico del manto nival (eTG). Luego, mediante el coeficiente de fusión (K_f) y utilizando el enfoque grado-día,

se estima el volumen de nieve derretida (Melt), el cual alimenta directamente la rutina hidrológica igual que la precipitación líquida que no forma parte de la acumulación.

En cuanto a la rutina GR6J, que se representa en la Figura 7, el flujo de agua se modela mediante una estructura conceptual compuesta por una serie de compartimentos que simulan los principales procesos hidrológicos de una cuenca. El modelo recibe como entradas la precipitación neta (P) y la evapotranspiración potencial (E). Estas variables alimentan el reservorio de producción (S), donde se almacena temporalmente el agua infiltrada antes de generar escorrentía. A partir de este almacenamiento, el modelo calcula la precipitación efectiva (Pr), la cual se divide en diferentes rutas de flujo.

Parte del agua se transfiere a través de dos hidrogramas unitarios ($UH1$ y $UH2$), que representan la respuesta rápida y retardada de la cuenca, respectivamente. Otra parte se pierde por percolación ($Perc$) hacia un reservorio de base subterráneo, desde el cual se genera el caudal de base o escorrentía lenta (Qd). A su vez, el flujo que sigue el camino superficial produce un caudal rápido (Qr). Finalmente, la suma de ambos flujos constituye la escorrentía total simulada (Qs), que representa la salida del sistema y corresponde al caudal diario generado por la cuenca.

4.3 Distribución de las rutinas

Las rutinas se distribuyen de diferente forma en el uso del modelo hidrológico, el módulo CemaNeige funciona de manera semi-distribuida dividiendo la

cuenca en bandas de elevación, definidas a partir de la curva hipsométrica. En cada banda, el usuario puede definir un gradiente térmico y un gradiente de precipitación, los cuales modifican las condiciones meteorológicas en función de la altitud. Estos gradientes permiten ajustar, respectivamente, la temperatura media del aire y la cantidad de precipitación que recibe cada banda, generando una distribución diferenciada y más realista según la elevación. Para este estudio utilizó un gradiente térmico de $-0,6\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ que ajusta la temperatura media en función de la altitud, y un gradiente de precipitación que aumenta el valor de las precipitaciones en un $+10\%$ cada 100 m adicionales de elevación, de modo que en las áreas más altas se represente el aumento progresivo de nieve acumulada (SWE) y las variaciones en las tasas de fusión (Valéry et al., 2010). Estos valores de gradiente son típicos en bibliografía, pero pueden cambiarse según información local para generar una mejor representación de la dinámica de los procesos nivales en las bandas de elevación (Valéry et al., 2010). Gracias a este esquema en bandas altitudinales, la precipitación puede separarse en su componente sólida y líquida de forma más realista, y el modelo simula la evolución de la nieve (acumulación y derretimiento) en cada banda de elevación. Para este trabajo se utilizaron 5 bandas de elevación las cuales parten en 5 porciones el área de la cuenca.

En el caso de la rutina hidrológica se comporta como un modelo agregado, asumiendo la cuenca como una sola unidad (Perrin et al., 2003). En este

esquema las entradas de precipitación efectiva (tras descontar la parte que corresponde a la nieve) y evapotranspiración potencial se introducen a un conjunto de reservorios conceptuales y transferencias internas que representan, de forma integrada, la dinámica de producción y enrutamiento del caudal. Donde, a diferencia de la división en bandas altitudinales que se hace en el módulo nival, no se distingue espacialmente y por esto la salida es un caudal único diario a la salida de la cuenca, resultado de la combinación de todos los procesos hidrológicos internos

La distribución de la rutina se CemaNeige se puede observar en la figura 8, sabiendo que en la rutina de nieve el área total de la cuenca está separada en 5 bandas de elevación que entregaran una respuesta distinta en cada una, por la aplicación de los gradientes. Mientras que en la rutina hidrológica (GR6J) se observa una sola respuesta para toda la cuenca (modelo agregado).

Además, la Figura 9 contiene la curva hipsométrica, cuya información es necesaria en el modelo para generar las bandas de elevación e identificar las variaciones de precipitación y temperatura según la altitud. Esta curva permite definir la distribución altitudinal de la cuenca, lo que es fundamental para la rutina de nieve de CemaNeige, ya que los gradientes térmicos y pluviométricos se aplican sobre estas bandas para ajustar las condiciones meteorológicas a cada zona de elevación.

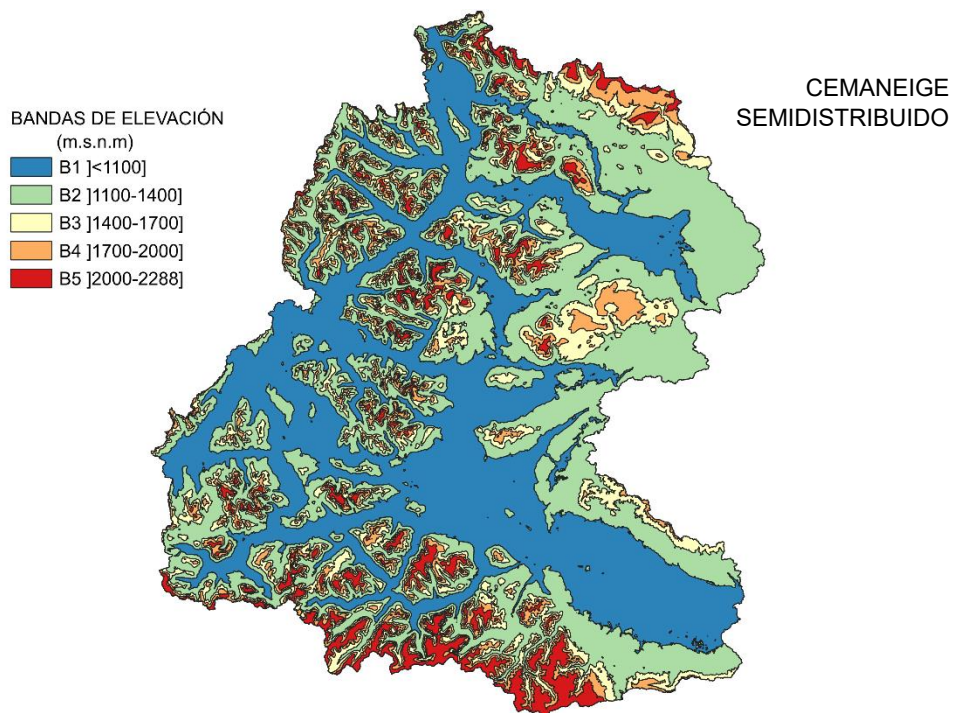


Figura 8. Diagrama de la distribución espacial en la rutina CemaNeige, en la cuenca del río Aysén.

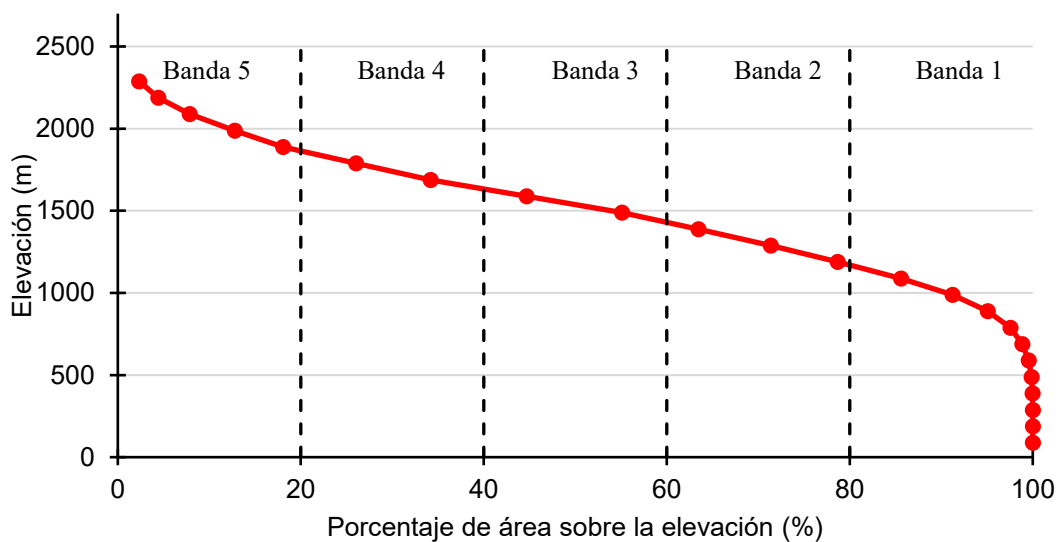


Figura 9. Curva hipsométrica dividida en las porciones correspondientes a cada banda de elevación utilizada por la rutina CemaNeige.

4.4 Calibración del modelo hidrológico

Para asegurar una simulación hidrológica representativa, se incorporó un período de calentamiento previo a cada simulación. Esta etapa tiene como objetivo estabilizar los estados internos del modelo, tales como el contenido de agua en los reservorios conceptuales y la nieve acumulada, evitando así problemas con las condiciones iniciales las que influyan en los resultados de la simulación. Esta práctica es fundamental en modelos conceptuales como GR6J y CemaNeige, donde la respuesta hidrológica depende de procesos acumulativos en el tiempo (Coron et al., 2017).

En este estudio, el período de calentamiento fue definido por el usuario y tuvo una duración de dos años previos al inicio de cada simulación. Por ejemplo, si un periodo de simulación va desde el año 2000 a 2016, el calentamiento se realizaría utilizando datos desde 1998. Durante esta etapa, el modelo utiliza los mismos datos meteorológicos de entrada (precipitación, temperatura y evapotranspiración potencial) que se utilizan en la simulación. Sin embargo, los resultados generados durante el warm-up no se consideran en la evaluación del desempeño del modelo, ya que su propósito es únicamente preparar al sistema para condiciones estables.

Al ser un modelo conceptual, requiere de este tipo de cuidados para generar simulaciones más reales, otros procesos necesarios son la calibración y validación para ajustar sus parámetros y mejorar la precisión de las simulaciones. Por esto se utilizó un algoritmo de optimización llamado método

Michel, el cual es utilizado en la calibración de modelos hidrológicos como el GR4J (Mouelhi et al., 2006). Este método, desarrollado por Claude Michel, optimiza los parámetros del modelo minimizando la diferencia entre los caudales simulados y observados, utilizando como criterio de ajuste el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE), el cual fue seleccionado para este trabajo. El NSE mide la capacidad del modelo para reproducir la variabilidad de los caudales observados, donde un valor de 1 indica un ajuste perfecto, valores iguales a 0 representan un desempeño igual al de la media observada, y valores negativos reflejan una predicción peor que tomar simplemente el promedio de los datos observados. La calibración se genera en dos etapas, primero se genera un conjunto de combinaciones de parámetros dentro de un rango predefinido mediante una búsqueda en malla gruesa (Grid-Screening), lo que permite explorar eficientemente el espacio de soluciones, para que después, se aplique una optimización por descenso del gradiente (Steepest Descent) para refinar los valores obtenidos y mejorar la precisión del modelo (Andréassian et al., 2023). Este enfoque híbrido permite encontrar parámetros óptimos de manera eficiente, evitando mínimos locales y mejorando la capacidad predictiva del modelo sin un alto costo computacional. Su simplicidad y robustez lo convierten en una herramienta clave para la calibración de modelos conceptual-parámétricos, especialmente en cuencas con datos hidrológicos limitados (Mouelhi et al., 2006; Perrin et al., 2003).

4.5 Creación de escenarios para validación cruzada

Para evaluar la capacidad del modelo CemaNeige-GR6J de generalizar sus predicciones y garantizar su estabilidad en distintos períodos de observación, se implementó un proceso de validación cruzada, en el cual se varían los períodos de calibración y validación manteniendo siempre la proporción de 2/3 de los datos observados para calibración y 1/3 para validación. Este método permite analizar la sensibilidad del modelo ante cambios en los períodos de ajuste, reduciendo la dependencia de una única partición de datos y proporcionando una evaluación más robusta del desempeño del modelo. Esta técnica de validación cruzada fue ejecutada para el periodo de datos de caudal observado que van desde 1996 hasta el 2020, y los escenarios generados a partir de la combinación de periodos de calibración y validación se muestran en la Tabla 6, donde se ve que para cada escenario hay distintas distribuciones de periodos de calibración y validación para un mismo rango de años.

Tabla 6. Periodos de calibración y validación para cada escenario a evaluar.

| Escenario | Calibración | Validación |
|-----------|-------------|--------------------------|
| 1 | 1996 - 2011 | 2012 - 2020 |
| 2 | 2004 - 2020 | 1996 - 2003 |
| 3 | 2001 - 2015 | 1996 - 2000, 2016 - 2020 |

Para evaluar el ajuste entre los caudales simulados y observados, se utilizaron métricas de desempeño como el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE), el error cuadrático medio (RMSE) y el Kling-Gupta Efficiency (KGE), las

cuales permiten cuantificar la precisión y confiabilidad del modelo en diferentes períodos de simulación. El RMSE mide la diferencia promedio entre los valores simulados y observados, penalizando los errores más grandes debido a su naturaleza cuadrática, donde valores más bajos indican una mejor precisión en la estimación de caudales. El KGE considera simultáneamente la correlación, la razón de desviaciones estándar y el sesgo entre los valores simulados y observados, proporcionando una evaluación más equilibrada del desempeño del modelo a diferencia con el NSE. La aplicación de las métricas busca generar un modelo robusto y generalizable, evitando que el desempeño dependa del período seleccionado para la calibración y proporcionando una mejor comprensión de su capacidad predictiva en distintos contextos hidrológicos (Arlot & Celisse, 2010; Bergmeir & Benítez, 2012).

4.6 Caracterización de tipos de año

Para evaluar el desempeño del modelo en función de las condiciones climáticas y responder a los objetivos específicos del estudio, se realizó una caracterización de los años según la precipitación y la temperatura media anual, en conjunto con la aplicación de la validación cruzada en tres escenarios. La caracterización climática se llevó a cabo calculando el promedio anual de precipitación y temperatura para cada año dentro del período de estudio (1996-2020), utilizando los datos del CR2MET con estos datos se establecieron umbrales basados en los percentiles 33 y 66 de la distribución de temperatura promedio y precipitación acumulada para cada año

del periodo de evaluación (1979-2020), definiendo así tres categorías: húmedo, normal y seco en términos de precipitación, y cálido, normal y frío en términos de temperatura media anual. Por lo tanto, se clasifica como húmedo o cálido si su promedio de temperatura o su precipitación en cada año superaba el percentil 66, como seco o frío si se encuentra por debajo del percentil 33, y normal si esta entre ambos umbrales. Para facilitar la comprensión de cómo se clasificaron los años en función de sus condiciones climáticas, se construyó una tabla que cruza las categorías de temperatura y precipitación definidas según los percentiles 33 y 66 del periodo (1979–2020). Esta clasificación ayuda a identificar combinaciones como años húmedo-fríos, seco-cálidos, y analizar cómo varía el desempeño del modelo bajo cada uno de estos contextos. La siguiente tabla (Tabla 7) resume las nueve posibles combinaciones climáticas utilizadas en la evaluación.

Tabla 7. Clasificación climática de los años del periodo 1996–2020 según percentiles de precipitación y temperatura.

| Clasificación | Cálido ($T > P66$) | Normal ($P33 \leq T \leq P66$) | Frío ($T < P33$) |
|-------------------------------------|----------------------|-------------------------------------|--------------------|
| Húmedo ($P > P66$) | Húmedo-Cálido | Húmedo-Normal | Húmedo-Frío |
| Normal ($P33 \leq P \leq P66$) | Normal-Cálido | Normal-Normal | Normal-Frío |
| Seco ($P < P33$) | Seco-Cálido | Seco-Normal | Seco-Frío |

Esta estrategia permite evaluar la sensibilidad del desempeño del modelo ante distintos regímenes hidrometeorológicos, lo que es fundamental en estudios

hidrológicos, ya que un modelo que muestra un buen desempeño en condiciones climáticas diversas tiende a ser más robusto y generalizable (Moriassi et al., 2007). Además, la combinación de esta caracterización con la validación cruzada en tres escenarios de calibración y validación permite una evaluación integral del modelo, garantizando que los resultados obtenidos no dependan de un único período de ajuste y que el modelo sea capaz de simular correctamente la escorrentía bajo distintos contextos hidrológicos. (Klemeš, 1986; Seibert, 2003).

4.7 Análisis de sensibilidad del modelo hidrológico

Se realizó un análisis de sensibilidad para determinar la influencia de cada parámetro en el desempeño del modelo CemaNeige-GR6J. Esta evaluación permite identificar cuáles parámetros tienen mayor impacto en los resultados simulados, ayudando a optimizar el proceso de calibración y mejorar el comportamiento del modelo (Song et al., 2015).

Para este estudio, se aplicó el método One-At-a-Time (OAT), el cual consiste en variar un solo parámetro mientras los demás se mantienen constantes. La variación se realizó de manera iterativa en un rango de $\pm 50\%$ respecto a su valor inicial, con incrementos del 10%, permitiendo evaluar cómo cada parámetro afecta las simulaciones de caudales. El método OAT es ampliamente utilizado debido a su simplicidad y eficiencia computacional, ya que permite analizar el impacto de cada parámetro de forma aislada sin la necesidad de realizar combinaciones complejas de variación múltiple (Hamby,

1994). Aunque no considera interacciones entre parámetros, proporciona una primera aproximación robusta sobre la sensibilidad de cada uno y su impacto en la precisión del modelo.

Los parámetros analizados en el estudio de sensibilidad corresponden a aquellos utilizados en la rutina hidrológica GR6J y la rutina nival CemaNeige, los cuales tienen un rol clave en la modelación hidrológica y nival de la cuenca. La tabla 8 contiene los parámetros que utiliza el modelo y el valor inicial de cada uno de ellos.

Tabla 8. Parámetros utilizados en el modelo CemaNeige-GR6J y su valor inicial.

| Parámetro | Nombre | Valor inicial | Unidad |
|-----------|---|---------------|--------------|
| X1 | Capacidad del reservorio de producción | 18,73 | mm |
| X2 | Coefficiente de escorrentía directa | 0,52 | adimensional |
| X3 | Capacidad del reservorio de escorrentía lenta | 49,40 | mm |
| X4 | Tiempo de retardo | 1,71 | días |
| X5 | Percolación (coeficiente de ajuste) | -0,55 | mm/día |
| X6 | Coefficiente de escorrentía subterránea | 21,98 | mm/día |
| CNX1 | Umbral de temperatura para precipitación sólida | 0,01 | °C |
| CNX2 | Tasa máxima de derretimiento de nieve | 6,18 | mm/°C día |

Estos parámetros son fundamentales para capturar los procesos de acumulación y derretimiento de nieve en la cuenca, influyendo directamente en la disponibilidad de agua y en la respuesta hidrológica del sistema. Además, su calibración es crucial para mejorar la precisión de las

simulaciones, dado que influyen en la dinámica del almacenamiento y liberación de agua a lo largo del ciclo hidrológico.

Para evaluar la respuesta del modelo a las variaciones, se utilizaron las métricas del coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE), el error cuadrático medio (RMSE) y el Kling-Gupta Efficiency (KGE). Estas métricas permitieron cuantificar cómo la variabilidad de cada parámetro influye en la diferencia entre los caudales simulados y observados, proporcionando información sobre el impacto de los parámetros en la precisión del modelo.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Evaluación de validación cruzada

Tabla 9. Métricas para evaluar el desempeño del modelo, comparando caudal simulado y caudal observado para cada escenario y periodo.

| Escenario | Calibración | Calibración | | | Validación | | |
|-----------|-------------|-------------|---------------------------------|------|------------|---------------------------------|------|
| | | NSE | RMSE (mm día ⁻¹) | KGE | NSE | RMSE (mm día ⁻¹) | KGE |
| Primero | 1996–2011 | 0,75 | 1,36 | 0,80 | 0,67 | 1,38 | 0,79 |
| Segundo | 2004–2020 | 0,77 | 1,15 | 0,82 | 0,69 | 1,69 | 0,66 |
| Tercero | 2001–2015 | 0,79 | 1,15 | 0,83 | 0,65 | 1,68 | 0,69 |

Valores de NSE y KGE superiores a 0,75 se consideran indicadores de buen ajuste hidrológico, ya que reflejan una adecuada correspondencia entre caudales observados y simulados. El NSE mide la eficiencia del modelo en reproducir la variabilidad temporal, mientras que el KGE combina correlación, sesgo y error relativo. Para el RMSE, se buscan valores bajos, próximos a

ceros, que indiquen un menor error promedio diario. Estas métricas son ampliamente aceptadas y recomendadas para la evaluación de modelos hidrológicos (Moriasi et al., 2007).

El desempeño general del modelo, evaluado con las métricas presentadas en la Tabla 9, muestra un ajuste hidrológico robusto durante el periodo de calibración, con valores de NSE entre 0,75 y 0,79 y KGE entre 0,80 y 0,83, lo que indica una buena simulación del volumen y forma del caudal simulado. El RMSE en este periodo es relativamente bajo (1,15–1,36 mm/día). Estas métricas son consistentes con lo propuesto por Moriasi et al. (2007) como indicadores de un desempeño satisfactorio. En validación, si bien hay una disminución del ajuste (NSE entre 0,65 y 0,69, y KGE entre 0,66 y 0,69), el modelo mantiene un comportamiento aceptable en todos los escenarios, lo que hace ver una razonable capacidad predictiva.

Al comparar los escenarios, se observa que el tercer escenario (calibrado en 2001–2015) presenta los mejores indicadores de calibración (NSE = 0,79, KGE = 0,83), pero también la mayor pérdida de ajuste en validación (NSE = 0,65, KGE = 0,69), lo que sugiere una mayor sensibilidad a cambios en las condiciones hidrológicas externas al periodo calibrado. A diferencia, el primer escenario (calibrado en 1996–2011) muestra la menor caída entre calibración y validación, lo que podría indicar una mayor estabilidad en el modelo cuando se calibra en un periodo que incluye una mayor diversidad climática (años

secos, húmedos y normales). Esta diversidad podría favorecer una mejor generalización del modelo.

Además, la comparación de los RMSE en validación (1,38 a 1,69 mm/día) revela que los errores absolutos aumentan con respecto a la calibración, en aproximadamente 0,2–0,5 mm/día. La variación observada entre los distintos escenarios deja ver la importancia de una adecuada asignación de los periodos de calibración y validación. Esto resalta la necesidad de seleccionar intervalos representativos del régimen hidrológico de la cuenca, para evitar sesgos en la capacidad predictiva del modelo. Asimismo, pone en evidencia que, si bien el modelo es estructuralmente simple, su desempeño puede ser sensible a la calidad y diversidad del periodo de entrenamiento, especialmente en cuencas con alta variabilidad climática como la del río Aysén.

Con el objetivo de evaluar el comportamiento del modelo en diferentes escalas temporales. Las Figuras 10 y 11 presentan los caudales medios anuales y mensuales respectivamente, permitiendo identificar cómo los distintos escenarios reproducen las diferencias en el periodo de prueba. En las Figuras 12 a 117 se puede observar el comportamiento del modelo cada cuatro meses del año hidrológico, representativos de los años 2007-2008 y 2017-2018, donde se muestra la evolución diaria del caudal observado y simulado en los tres escenarios, junto con la precipitación utilizada para la simulación.

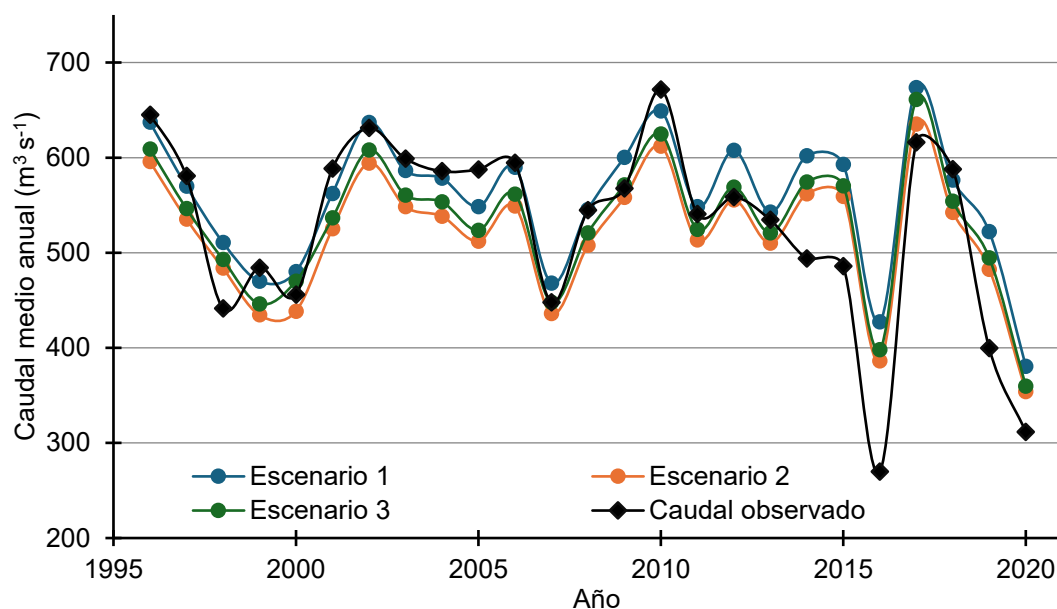


Figura 10. Serie de caudales medios anuales simulados para cada escenario y caudales observados del río Aysén (1996 a 2020).

Las Figuras 10 y 11 permiten evaluar cómo el modelo representa los patrones hidrológicos a escalas anual y mensual. En la Figura 11, se observa que los escenarios modelados siguen correctamente las tendencias del caudal medio anual, aunque con algunas desviaciones en años extremos, particularmente en periodos muy secos o húmedos, donde el modelo tiende a suavizar los valores observados. Esta suavización muestra cierta dificultad del modelo conceptual para capturar la variabilidad interanual bajo condiciones climáticas extremas. Estas limitaciones pueden explicarse, por el uso de datos grillados (CR2MET), al promediar espacialmente las variables meteorológicas, atenúan eventos críticos, como podrían ser crecidas súbitas de caudal.

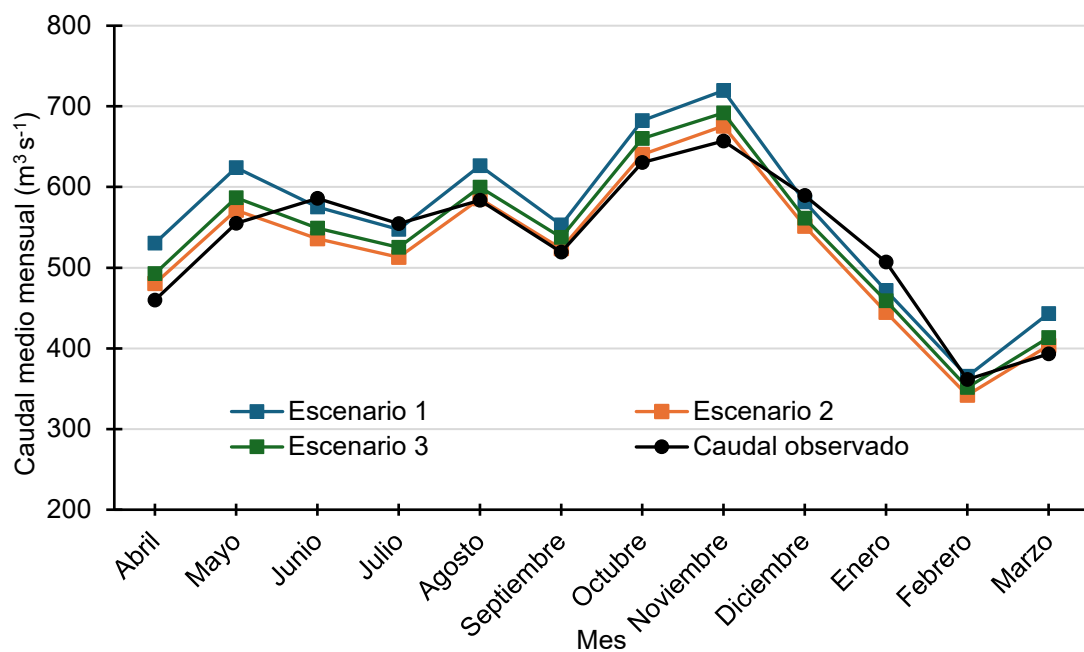


Figura 11. Serie de caudales medios mensuales simulados para cada escenario y caudales observados del río Aysén.

En cuanto a la Figura 11, se aprecia una correcta representación de la estacionalidad general, reproduciendo adecuadamente los máximos invernales y los mínimos estivales. Durante los meses de transición (primavera y otoño) presentan diferencias más marcadas, indicando limitaciones del modelo para capturar cambios estacionales rápidos. Esto podría explicarse debido a que durante estos períodos es más difícil obtener una respuesta hidrológica clara y consistente, dado que las condiciones meteorológicas presentan mayor variabilidad. En primavera y otoño pueden ocurrir cambios rápidos como días cálidos a fríos, así como periodos secos o lluviosos, generando transiciones abruptas entre los procesos de acumulación y

derretimiento de nieve, además de respuestas inmediatas ante eventos puntuales de precipitación. Entonces una cierta dificultad del modelo para capturar con precisión estas dinámicas es esperable y debe considerarse al interpretar sus resultados.

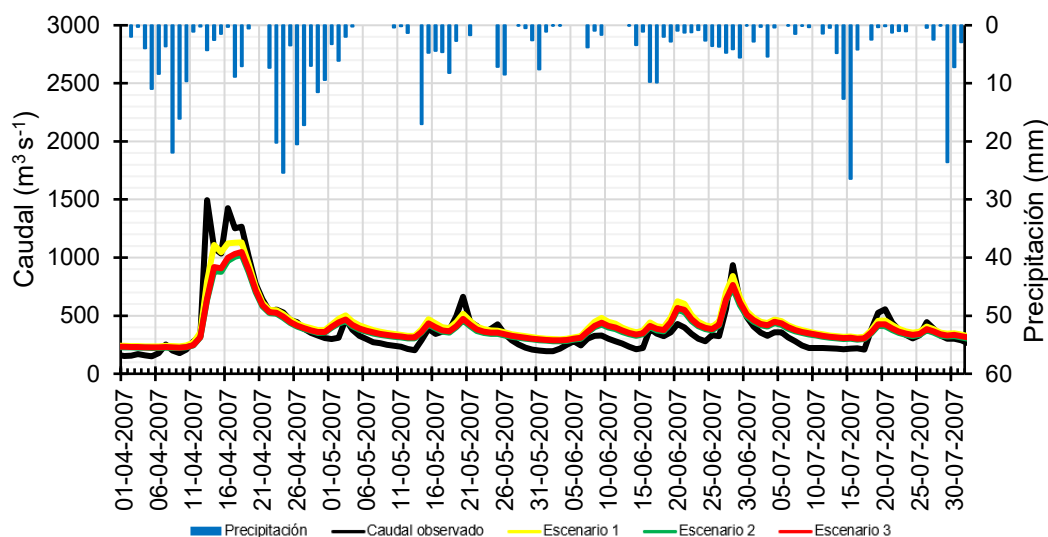


Figura 12. Comparación de caudales observados y simulados en los distintos escenarios durante el periodo de abril – julio del 2007.

En la Figura 12, correspondiente al año 2007, se observa que el modelo reproduce de forma razonable la dinámica general de las crecidas de caudal, pero muestra limitaciones en su capacidad de representar respuestas rápidas y puntuales. Por ejemplo, el modelo subestima claramente respuestas rápidas frente a eventos de precipitación significativos, como el 11 de abril o el 28 de junio, pero luego, sobreestima caudales ante precipitaciones menores, como cuando precipitan cerca de 5 mm. Esta diferencia sugiere que el modelo tiene una respuesta simplificada o lineal respecto al umbral de activación de la

escorrentía directa. Porque pequeñas precipitaciones podrían estar activando la generación de escorrentía antes de lo esperado, al alcanzar rápidamente el umbral que el modelo considera suficiente para llenar el suelo y generar escorrentía superficial, cuando en realidad el suelo aún podría tener capacidad para almacenar agua antes de generar una respuesta hidrológica.

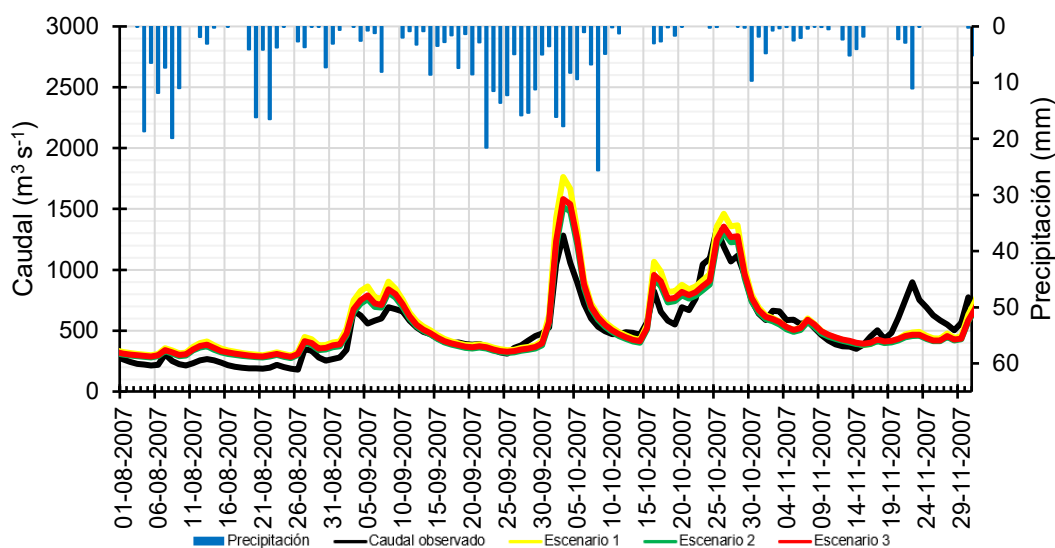


Figura 13. Comparación de caudales observados y simulados en los distintos escenarios durante el periodo de agosto – noviembre del 2007.

La Figura 13, también para el año 2007, evidencia una sobreestimación sistemática de caudales en crecidas pluviales. Sin embargo, destaca especialmente un aplanamiento notorio de las crecidas en primavera, visible en el evento del 24 de noviembre, cuya crecida parece originada por el proceso de derretimiento nival. Aquí, se observa que la subestimación del caudal simulado podría deberse a una parametrización insuficiente o poco sensible en la rutina nival del modelo, específicamente en parámetros que controlan la

tasa máxima de derretimiento (CNX2) o el umbral de temperatura para precipitación sólida (CNX1). Esta diferencia sugiere que el modelo presenta limitaciones para capturar la dinámica real del derretimiento en condiciones específicas, posiblemente por no representar adecuadamente la inercia térmica del manto nival o por una distribución errónea de las fases de precipitación. La baja sensibilidad en estos eventos compromete la capacidad del modelo para simular con precisión los aportes nivales, lo que resulta especialmente crítico en zonas donde el derretimiento constituye una fracción relevante del caudal total en primavera.

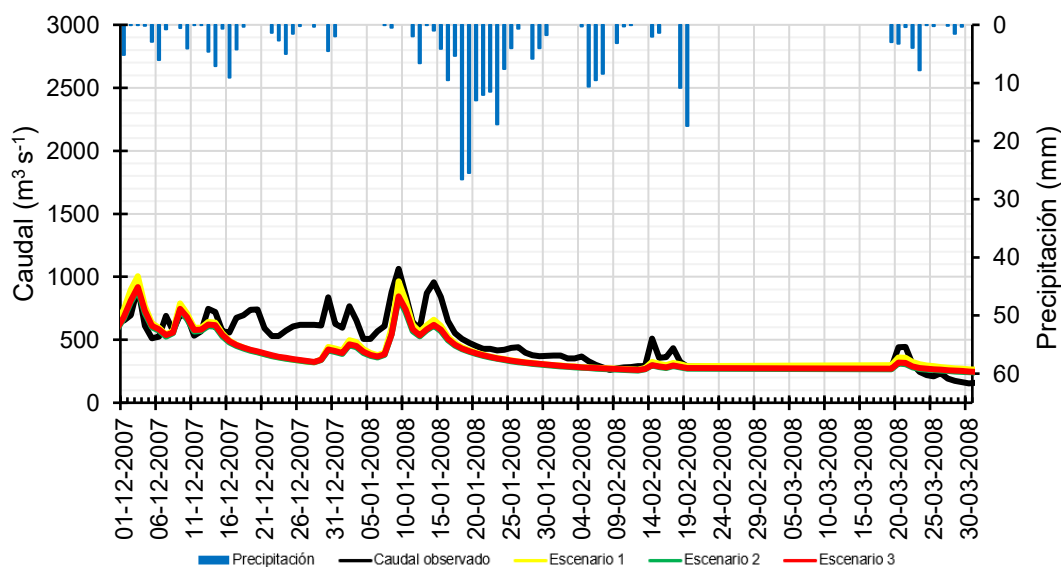


Figura 14. Comparación de caudales observados y simulados en los distintos escenarios durante el periodo de diciembre 2007 a marzo 2008.

La Figura 14, correspondiente al período 2007-2008, indica que el modelo representa bien los caudales mínimos estivales, aunque nuevamente muestra una dificultad para simular respuestas rápidas de escorrentía, tanto por

precipitaciones puntuales como por episodios de fusión nival implícitos en la figura en diciembre. Esta lentitud de respuesta puede relacionarse con la parametrización del tiempo de retardo (X4), que al ser muy alto podría generar una respuesta demasiado frenada frente a eventos rápidos.

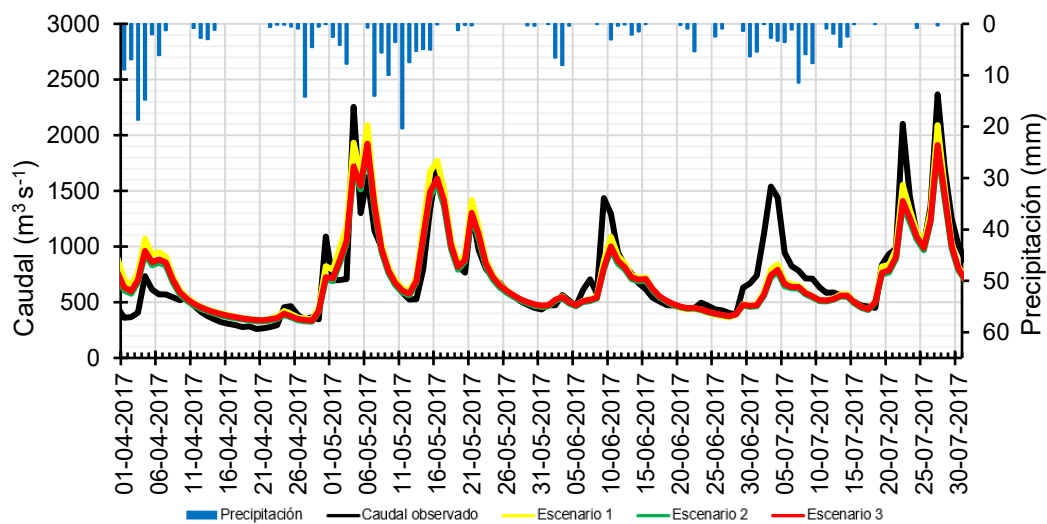


Figura 15. Comparación de caudales observados y simulados en los distintos escenarios durante el periodo de abril – julio del 2017.

La Figura 15 (año 2017) confirma esta tendencia general en el modelo, donde, la estacionalidad del caudal es capturada, pero hay subestimaciones significativas de eventos máximos invernales, como la crecida del 10 de junio o el 5 de julio, previa a precipitaciones moderadas. Este aspecto indica limitaciones adicionales en representar procesos hidrológicos rápidos relacionados con eventos mixtos de lluvia y nieve.

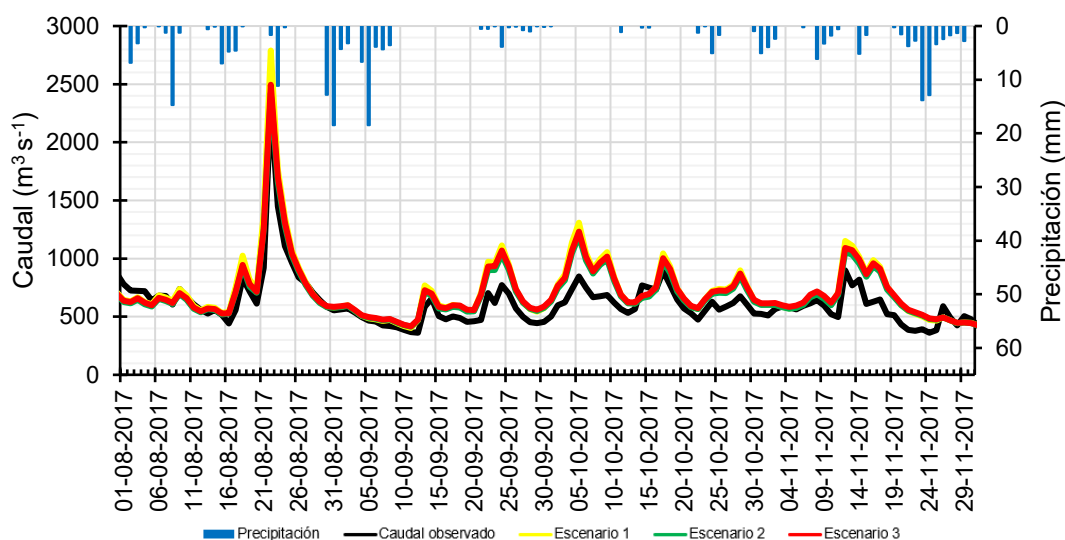


Figura 16. Comparación de caudales observados y simulados en los distintos escenarios durante el periodo de agosto – noviembre del 2017.

En la Figura 16 (2017), es visible el aumento gradual del caudal simulado desde septiembre en ausencia significativa de precipitaciones, lo cual indica claramente la importancia del derretimiento nival. Para este año cálido, la sobrestimación de caudal es visible en todos los escenarios, en especial en el escenario 1, lo que indica que posiblemente la calibración de este escenario no fue completamente adecuada para capturar el aumento de la tasa de derretimiento bajo condiciones térmicas más elevadas, como las registradas en 2017. Este comportamiento sugiere que el modelo podría estar aplicando una función de fusión nival demasiado sensible a la temperatura o con una tasa máxima de derretimiento (CNX2) sobredimensionada, lo que genera aportes simulados superiores a los observados.

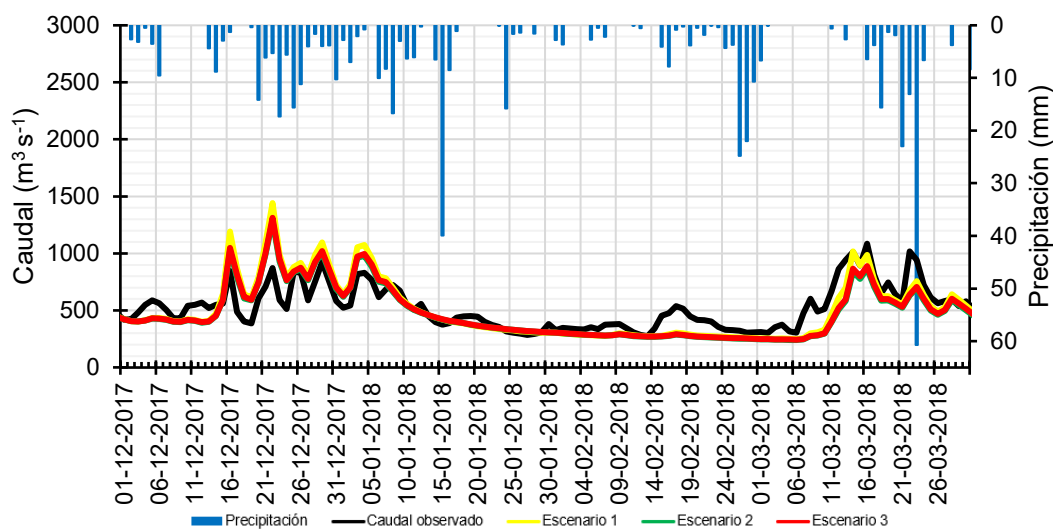


Figura 17. Comparación de caudales observados y simulados en los distintos escenarios durante el periodo de diciembre 2017 a marzo del 2018.

Finalmente, la Figura 17 del año 2017 a 2018, mantiene la subestimación y evidencia nuevamente respuestas descoordinadas ante eventos hidrológicos rápidos, lo que refuerza la necesidad de mejoras en la conceptualización del modelo y en la resolución espacial-temporal de los datos climáticos utilizados. Un ejemplo son las precipitaciones ocurridas el 15 de enero y 22 de marzo del 2018, las que tienen una magnitud superior a los 35 mm precipitados y no mostraron una respuesta, incluso para el evento del 15 de enero, el caudal disminuyó. Estas limitaciones estructurales y metodológicas evidenciadas en las figuras podrían superarse en parte mediante mejoras específicas, tales como la incorporación de una parametrización más sensible del proceso nival y ajustes específicos para eventos extremos, la integración de datos meteorológicos de mayor resolución espacial y temporal, o incluso la

aplicación de esquemas híbridos que combinen modelos conceptuales con módulos físicos más detallados para eventos críticos.

Además, aunque los tres escenarios fueron calibrados en períodos diferentes, muestran patrones generales muy parecidos, indicando que el modelo captura razonablemente bien la dinámica hidrológica promedio. Sin embargo, las deficiencias en la representación de eventos extremos revelan una vulnerabilidad importante del modelo ante cambios climáticos futuros, especialmente en cuencas como la del Río Aysén, donde las respuestas hidrológicas rápidas relacionadas con la nieve y las precipitaciones intensas pueden volverse más frecuentes bajo condiciones de calentamiento global.

Finalmente, aunque el ajuste global es aceptable según métricas estándar, el análisis detallado evidencia claramente la necesidad de robustecer la simulación de eventos hidrológicos críticos y rápidos. Esto es especialmente relevante en contextos altamente variables como la Patagonia chilena, donde la combinación de topografía abrupta, fuertes gradientes altitudinales, cambios significativos en el uso del suelo y fenómenos como el efecto de zombra de lluvia. Este último corresponde a la influencia que ejerce una barrera orográfica sobre el movimiento de masas de aire, modificando patrones de precipitación y temperatura entre sus vertientes, lo que puede provocar fuertes contrastes entre zonas húmedas y áridas en distancias relativamente cortas. Todo esto puede generar condiciones hidrológicas locales extremadamente diversas. Estas características aumentan la dificultad del modelo para responder

adecuadamente ante eventos rápidos y extremos, enfatizando la importancia de mejorar tanto la parametrización específica del modelo como la resolución y calidad de las variables climáticas utilizadas en la simulación (CR2MET), para asegurar predicciones hidrológicas más precisas, útiles y confiables en la gestión integrada de los recursos hídricos en esta región.

Para evaluar la diferencia existente en las series simuladas y observadas, se utilizó el BIAS relativo en el escenario 1, este escenario mostro la mejor capacidad predictiva en periodos de prueba (validación). El BIAS relativo es una métrica que mide el sesgo sistemático en las estimaciones del modelo. El BIAS representa la diferencia promedio entre los valores simulados y los valores observados, indicando si el modelo tiende a sobrestimar o subestimar los valores reales. Un BIAS positivo indica que el modelo sobrestima los caudales observados, mientras que un BIAS negativo indica que los subestima. Se logra observar que para eventos en los comienzos periodo de evaluación el modelo subestima el caudal real que existe en la cuenca y terminando el periodo de datos observados se observa una sobrestimación de caudal. A continuación, se presenta la Figura 19, que muestra gráficamente la diferencia anual entre caudales simulados y observados (BIAS%) para el período de evaluación (1996-2020), utilizando la calibración del escenario 1. Esta figura permite identificar claramente años específicos donde la simulación presentó mayores desviaciones, destacando tanto sobreestimaciones como

subestimaciones respecto a los valores observados, y ayudando así a visualizar la variabilidad interanual del desempeño del modelo.

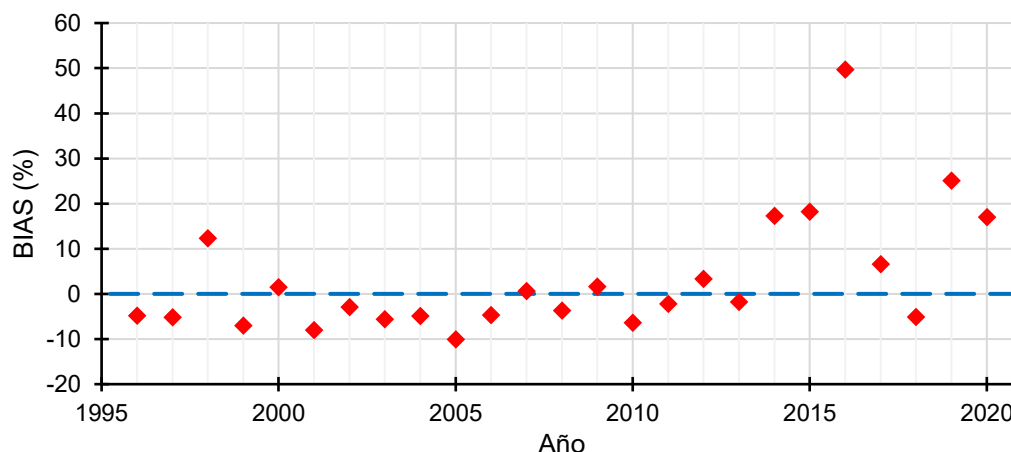


Figura 18. Diferencia de caudal simulado y observado en cada año del periodo de evaluación (1996 a 2020), utilizando calibración del escenario 1.

Para el primer escenario se calcula el BIAS relativo, donde el modelo obtiene un valor de 1,62%, indicando que en promedio existe una ligera sobreestimación del caudal simulado. El cual se debe a que hay años puntuales donde el error es demasiado y afecta el promedio (2016), en general se ve una subestimación evidente desde 1996 a 2013. También, se calcula el BIAS relativo absoluto, que mide la magnitud del sesgo sin considerar su signo, obteniendo un valor del 10,2%, lo que implica que las estimaciones del modelo se desvían en promedio $\pm 10,2\%$ respecto a los valores observados. La Figura 18 permite observar estas diferencias año a año, mostrando una clara variabilidad interanual del sesgo y destacando especialmente algunos años con desviaciones más pronunciadas, ya sea por sobreestimación o subestimación del caudal simulado. Estos resultados confirman que el modelo

es capaz de identificar adecuadamente cambios generales en el régimen hidrológico, pero presenta limitaciones en términos de precisión absoluta, aspecto que debe considerarse al interpretar resultados para escenarios específicos. Una estrategia potencial para mejorar esta precisión sería incorporar explícitamente el sesgo dentro de la función objetivo utilizada en la calibración. Por ejemplo, emplear una función objetivo combinada como NSE ajustado por el sesgo (por ejemplo, $\text{NSE} + \text{sesgo relativo}$) podría reducir algunos errores sistemáticos en la estimación del caudal, optimizando simultáneamente el desempeño global y la exactitud en los volúmenes simulados. Este enfoque podría generar que el modelo minimice no solo la variabilidad de los errores, sino también corregir la sobreestimación o subestimación sistemática observada en los resultados actuales (Moriassi et al., 2007), aunque su efectividad dependerá de las características del caso de estudio y se debería valorar cuidadosamente, ya que la introducción de métricas adicionales no garantiza por sí sola una mejora sustancial y puede incluso generar compensaciones no deseadas entre diferentes objetivos de calibración.

Se construyó una gráfica de dispersión entre caudales observados y simulados para cada escenario, como se muestra en las Figuras 19, 20 y 21. Estas figuras permiten evaluar visualmente el grado de ajuste entre los valores simulados por el modelo y los datos reales observados, proporcionando una herramienta útil para detectar patrones de error. En particular, la cercanía de los puntos a

la línea de referencia 1:1 indica un buen ajuste: mientras más alineados estén, mayor es la capacidad del modelo para replicar los valores observados. Por el contrario, desviaciones sistemáticas por encima o por debajo de dicha línea revelan la existencia de sesgos estructurales, como sobreestimación o subestimación persistente del caudal. Además, una mayor dispersión de los puntos en torno a la línea refleja una menor precisión en las simulaciones, especialmente en eventos extremos. Por tanto, estas gráficas complementan y enriquecen el análisis numérico de métricas como el BIAS, ayudando a identificar no solo la magnitud media del error, sino también su comportamiento a lo largo del rango completo de caudales.

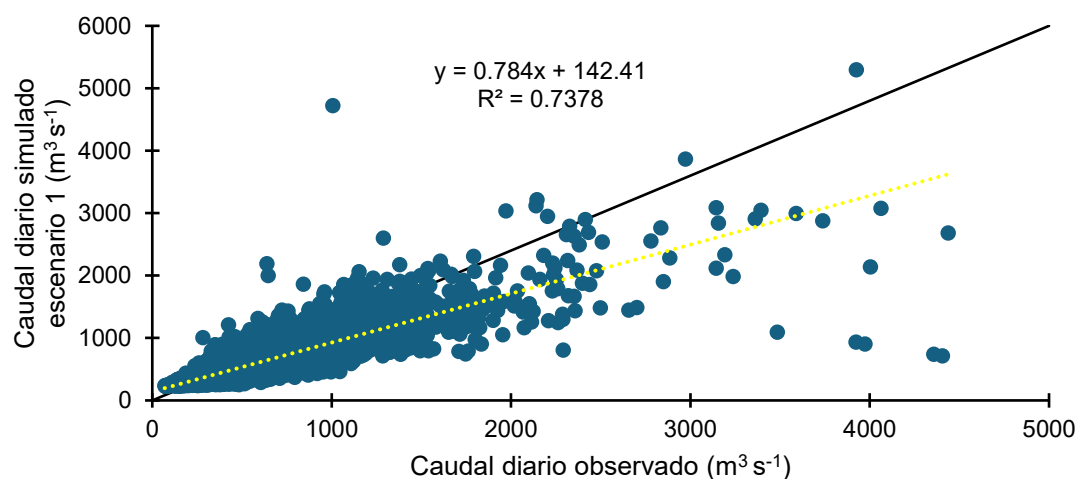


Figura 19. Ajuste lineal entre caudales diarios simulados y observados para el primer escenario (1996 a 2020).

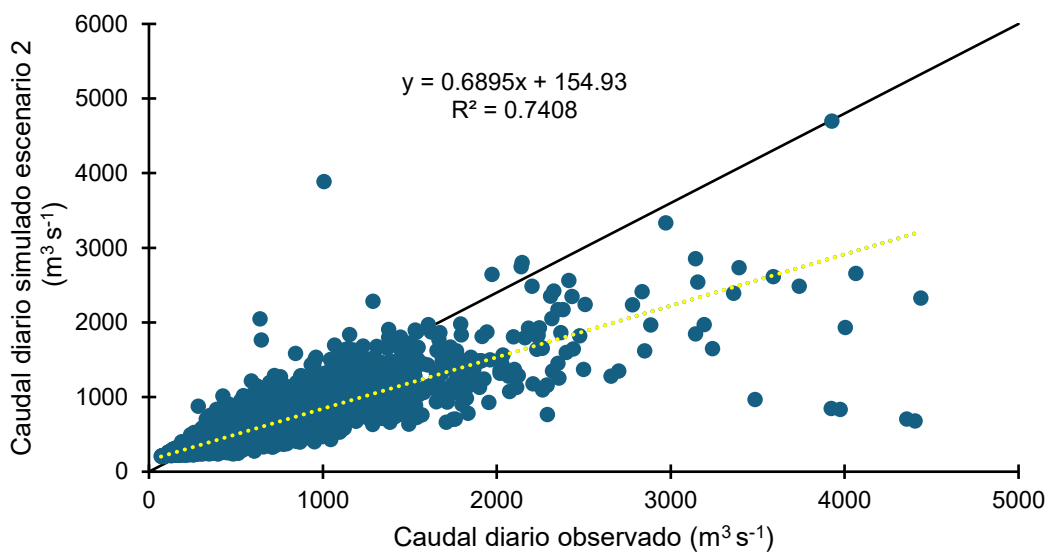


Figura 20. Ajuste lineal entre caudales diarios simulados y observados para el segundo escenario (1996 a 2020).

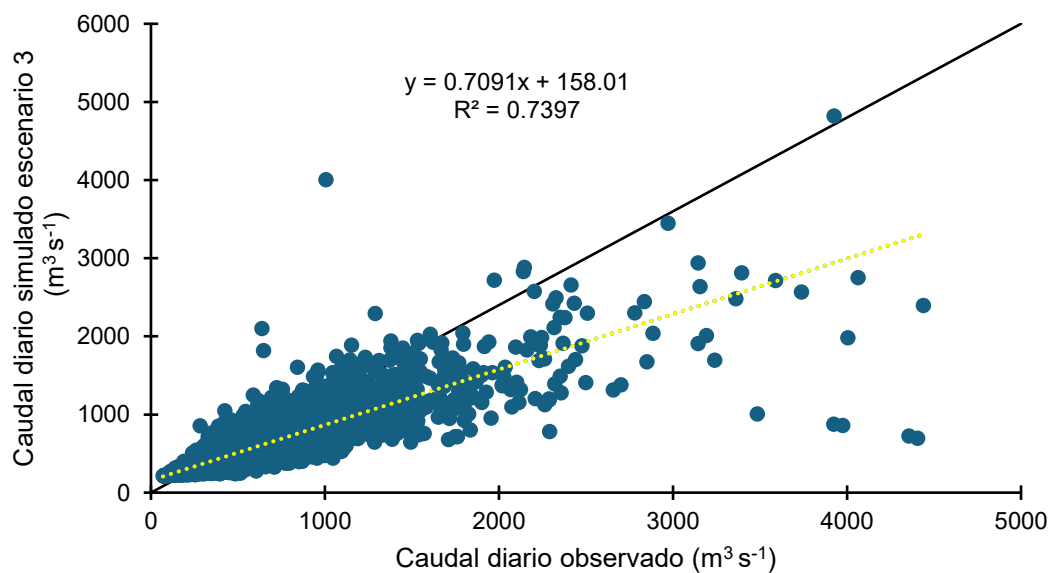


Figura 21. Ajuste lineal entre caudales diarios simulados y observados para el tercer escenario (1996 a 2020).

En general, los resultados presentados en las Figuras 19, 20 y 21 reflejan que el modelo logra representar adecuadamente la dinámica promedio del caudal, alcanzando un coeficiente de determinación (R^2) de 0,74, considerado satisfactorio en términos hidrológicos. Al analizar las pendientes de cada recta de ajuste lineal, se observa que todos los escenarios tienden a subestimar sistemáticamente los caudales (pendientes menores a 1), lo que contrasta con el sesgo positivo reflejado en el bias relativo (1,62%). Esta diferencia sugiere que, aunque en promedio los caudales simulados pueden ser levemente superiores, el modelo tiende a no capturar correctamente los valores más altos, lo que se evidencia en los puntos alejados de la línea 1:1.

La Figura 19 (Escenario 1) muestra el mejor ajuste general, con un R^2 de 0,74 y la mayor pendiente (0,78), lo que coincide con el buen desempeño observado en las métricas globales. La Figura 20 (Escenario 2) presenta una leve disminución del ajuste (pendiente = 0,69), junto con una mayor dispersión, especialmente en los extremos bajos y altos del rango de caudales. Finalmente, la Figura 21 (Escenario 3) presenta el menor ajuste, con una pendiente de 0,70.

Estas observaciones visuales complementan y refuerzan las limitaciones ya mencionadas anteriormente, como el uso de forzantes climáticas espacialmente promediadas (CR2MET), que tienden a suavizar fenómenos locales intensos, las posibles simplificaciones asociadas al modelo conceptual

que dificultan la correcta representación de eventos rápidos o extremos, y la influencia de las diferentes calibraciones realizadas en distintos periodos.

Si bien las diferencias entre escenarios son visibles, especialmente al analizar la dispersión en eventos extremos o valores atípicos, no se observan diferencias marcadas en el ajuste general. Esto sugiere que las variaciones en desempeño no dependen únicamente de los periodos de calibración, sino que reflejan limitaciones del propio modelo conceptual y de las forzantes meteorológicas utilizadas. Como se ha discutido, el uso de datos espacialmente promediados como CR2MET tiende a suavizar la variabilidad climática local, afectando la correcta reproducción de eventos críticos. Asimismo, el modelo conceptual puede no capturar en detalle procesos como la rápida escorrentía o el derretimiento nival, afectando la dinámica de respuesta en eventos intensos. De este modo, más que diferencias radicales entre escenarios, lo que se evidencia es una expresión constante de las limitaciones estructurales del sistema de modelación utilizado.

Otra forma de observar las diferencias entre los distintos escenarios es a través de la curva de duración de caudales (CDC). Esta permite evaluar no solo el ajuste general entre caudales observados y simulados, sino también detectar sesgos sistemáticos en distintos rangos de caudal. La CDC ofrece una visión que permite ver diferencias en la representación de caudales extremos y bajos, los cuales son especialmente sensibles a la parametrización del modelo y forzantes meteorológicas.

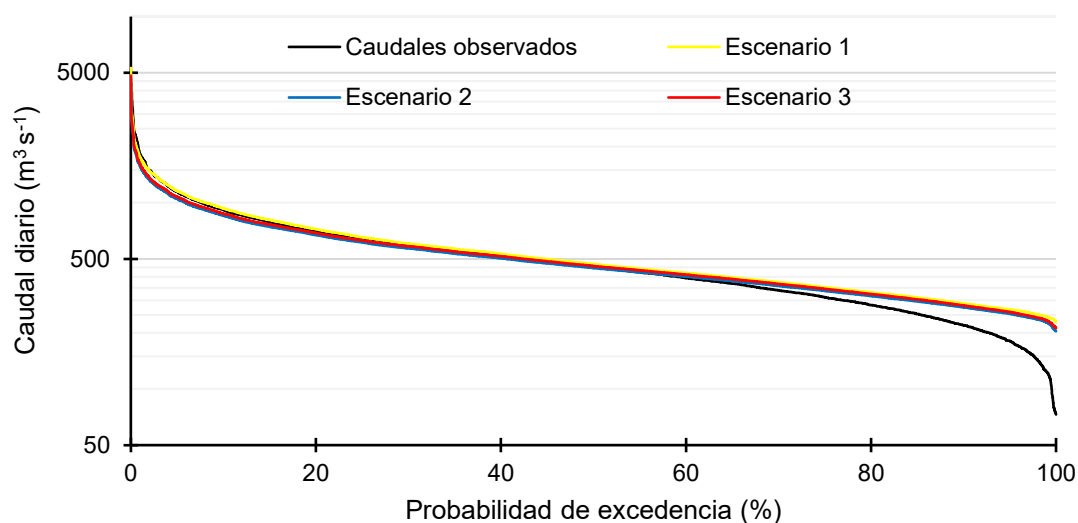


Figura 22. Curva de duración de caudal diario, para las series simuladas y observadas de caudal para el periodo de estudio 1996 a 2020. Eje Y de magnitud de caudal en escala logarítmica.

Se observa que los tres escenarios presentan un buen ajuste en el rango medio de caudales, con valores simulados muy cercanos a los observados. En el rango de alta excedencia (>90 %), los escenarios tienden a sobreestimar los caudales bajos, mientras que en baja excedencia (<10 %) subestiman los eventos extremos. Este comportamiento es coherente con lo observado en las figuras de dispersión, cuyas pendientes menores a 1 indican una subestimación general, y con las simulaciones diarias, donde el modelo no logra representar adecuadamente los extremos. En conjunto, estos resultados reflejan que el modelo es confiable para simular caudales medios, pero presenta limitaciones en los extremos del régimen hidrológico.

5.2 Evaluación por tipo de año

Por otra parte, los resultados del análisis climático y el rendimiento del modelo son generados a partir de caracterizar los años a evaluar (Tabla 10).

Tabla 10. Caracterización de los tipos de año presentes en el periodo evaluado de 1996 a 2020.

| Caracterización | Tipo de año | Número de años |
|-----------------|-------------|----------------|
| Precipitación | Húmedo | 10 |
| | Normal | 9 |
| | Seco | 7 |
| Temperatura | Cálido | 11 |
| | Normal | 6 |
| | Frío | 9 |

La clasificación de los años en función de la precipitación y la temperatura permitió evaluar el desempeño del modelo en distintos escenarios climáticos. Se calcularon las métricas NSE, RMSE y KGE para cada categoría en los tres escenarios generados en la validación cruzada. De esta forma, se logra capturar si afecta de alguna manera el tipo de año al rendimiento del modelo.

Las Tablas 11, 12 y 13 presentan los valores promedio de NSE, RMSE y KGE para los tres escenarios simulados, permitiendo evaluar el desempeño del modelo en años extremos frente a condiciones climáticas medias. Las Figuras 23, 24 y 25 muestran boxplots de estas métricas para el escenario 1, lo que facilita identificar variabilidad, sesgos y valores atípicos, complementando el análisis numérico con una visualización clara de patrones o anomalías.

Tabla 11. Rendimiento del modelo para el escenario 1 en función de los tipos de año, métricas calculadas para todo el periodo de estudio.

| Clasificación | Tipo de Año | NSE | RMSE (mm día ⁻¹) | KGE |
|---------------|-------------|------|---------------------------------|------|
| Precipitación | Húmedo | 0,75 | 1,28 | 0,82 |
| | Normal | 0,72 | 1,18 | 0,80 |
| | Seco | 0,57 | 1,37 | 0,65 |
| Temperatura | Cálido | 0,61 | 1,23 | 0,73 |
| | Normal | 0,71 | 1,55 | 0,76 |
| | Frío | 0,81 | 1,11 | 0,84 |

Tabla 12. Rendimiento del modelo para el escenario 2 en función de los tipos de año, métricas calculadas para todo el periodo de estudio.

| Clasificación | Tipo de Año | NSE | RMSE (mm día ⁻¹) | KGE |
|---------------|-------------|------|---------------------------------|------|
| Precipitación | Húmedo | 0,78 | 1,25 | 0,79 |
| | Normal | 0,73 | 1,20 | 0,74 |
| | Seco | 0,65 | 1,31 | 0,63 |
| Temperatura | Cálido | 0,70 | 1,10 | 0,75 |
| | Normal | 0,70 | 1,6 | 0,69 |
| | Frío | 0,79 | 1,17 | 0,76 |

Tabla 13. Rendimiento del modelo para el escenario 3 en función de los tipos de año, métricas calculadas para todo el periodo de estudio.

| Clasificación | Tipo de Año | NSE | RMSE (mm día ⁻¹) | KGE |
|---------------|-------------|------|---------------------------------|------|
| Precipitación | Húmedo | 0,78 | 1,25 | 0,81 |
| | Normal | 0,73 | 1,19 | 0,76 |
| | Seco | 0,63 | 1,33 | 0,63 |
| Temperatura | Cálido | 0,68 | 1,13 | 0,74 |
| | Normal | 0,71 | 1,57 | 0,71 |
| | Frío | 0,80 | 1,15 | 0,78 |

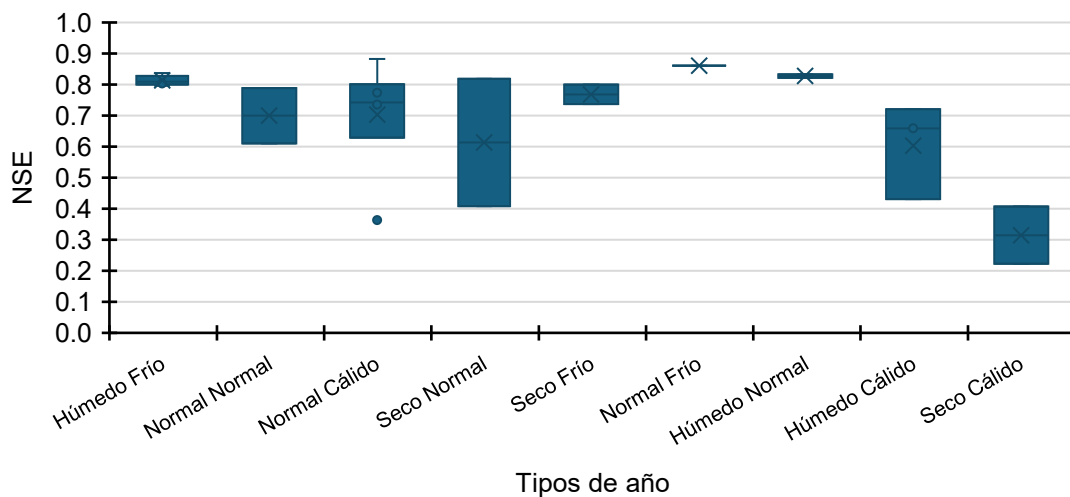


Figura 23. Distribución del Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) según los tipos de año, para el escenario 1.

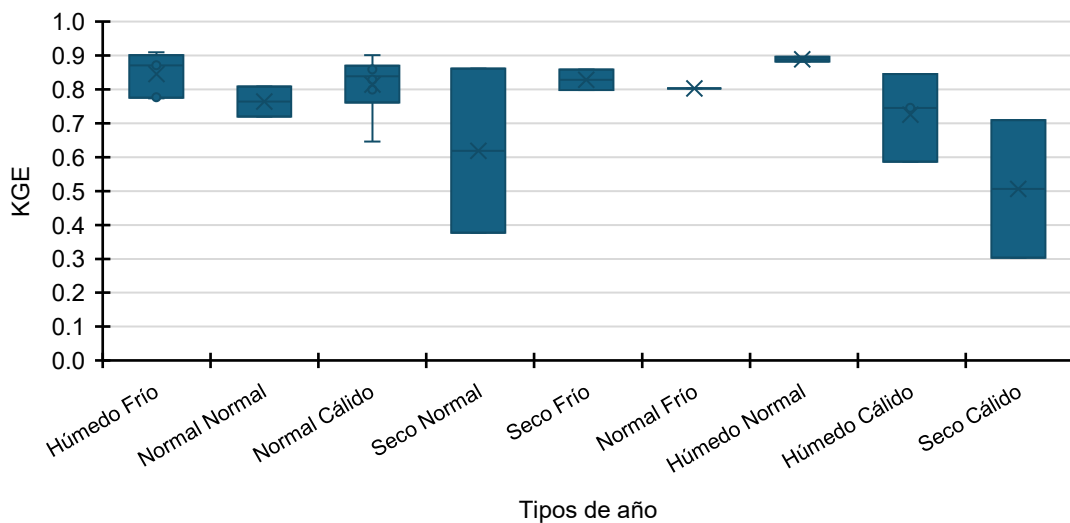


Figura 24. Distribución del Kling-Gupta Efficiency (KGE) según los tipos de año, para el escenario 1.

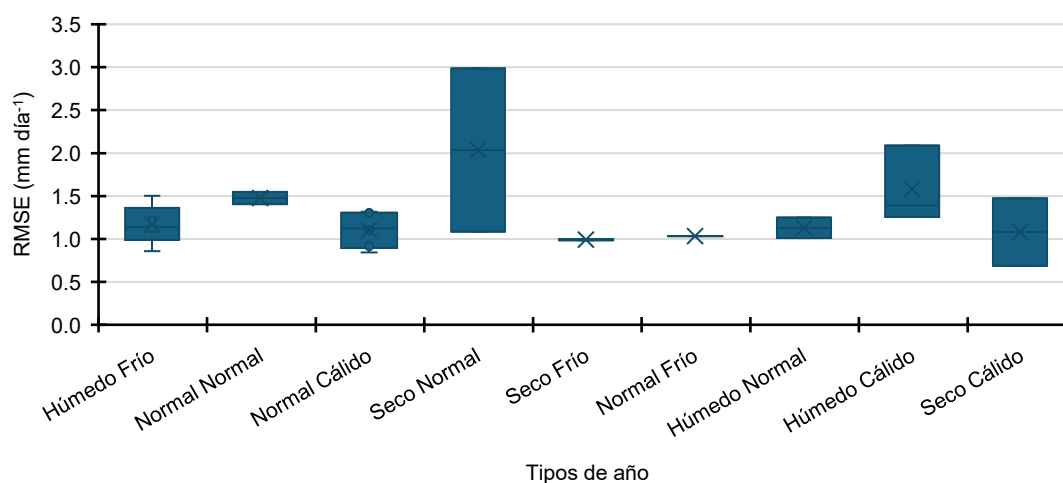


Figura 25. Distribución del Root Mean Square Error (RMSE) según los tipos de año, para el escenario 1.

El análisis conjunto de las Tablas 11, 12 y 13, junto con las Figuras 23 a 25, muestra que el desempeño del modelo varía de forma significativa según el tipo de año climático y el escenario de calibración considerado. En general, se observa un mejor ajuste en años fríos y húmedos, mientras que los años secos y cálidos presentan un deterioro notorio en las métricas de eficiencia.

Por ejemplo, en el Escenario 1, el NSE promedio en años húmedo-fríos alcanza 0.80, mientras que en años seco-normales apenas llega a 0.40 (Figura 23), lo que representa una caída de más de 0.35 unidades. Esta diferencia también se refleja en el KGE, con valores de 0.90 en años húmedos frente a 0.40 en años secos (Figura 24). En la Figura 23, se observa que los años “seco cálido” presentan no solo un valor promedio más bajo, sino también una dispersión considerable, con valores de NSE que descienden por debajo de 0.4 en varios casos. Esta variabilidad también es visible en el RMSE (Figura

25), donde el error absoluto puede alcanzar hasta 3.0 mm/día en años secos, en contraste con valores por debajo de 1.2 mm/día en años húmedo-fríos.

Al comparar los escenarios, se evidencia que el Escenario 1 (Calibración: 1996–2010) presenta una mayor estabilidad entre tipos de año, con diferencias de máximo 0.06 puntos en NSE entre tipos climáticos, mientras que en el Escenario 3 (2001–2015) la diferencia se amplía hasta 0.17 puntos, revelando una mayor sensibilidad a las condiciones meteorológicas del período de calibración. Esto sugiere que el Escenario 3 con mayor proporción de años húmedos favorece una calibración orientada a la reproducción de eventos de derretimiento nival, pero pierde capacidad para simular adecuadamente situaciones de escorrentía rápida asociadas a lluvias intensas.

Estas observaciones confirman que la estructura del modelo y las condiciones de calibración son menos exactos bajo los regímenes controlados por lluvias breves e intensas. Esta limitación es coherente con lo reportado por Andréassian et al. (2023), quienes advierten que los modelos conceptuales tienden a comportarse peor en situaciones dominadas por flujos rápidos.

Finalmente, si bien el modelo mantiene NSE superiores a 0.6 en la mayoría de los casos, las diferencias cuantificadas de hasta 0.58 puntos en NSE, 0.8 mm/día en RMSE y 0.6 en KGE entre años extremos evidencian que no es estrictamente robusto frente a la variabilidad interanual. Esto refuerza la necesidad de estrategias complementarias como calibraciones multiobjetivo, mejoras en la representación de procesos críticos como nieve y escorrentía

rápida, y el uso de forzantes climáticas de mayor resolución espacial y temporal, que permitan capturar adecuadamente la heterogeneidad de eventos extremos en cuencas cordilleranas como la del río Aysén.

5.3 Respuesta al análisis de sensibilidad a los parámetros

Los resultados del análisis de sensibilidad, se presentan las figuras 26, 27 y 28 (boxplot de NSE, KGE y RMSE), calculadas para el periodo 1996–2020, que permiten visualizar comparativamente la variabilidad en el desempeño del modelo ante cambios individuales de cada parámetro. Las figuras resumen el comportamiento estadístico del modelo, destacando los parámetros con mayor influencia. Además, las tablas 14 y 15 presentan los valores cuantitativos de las métricas para distintos porcentajes de variación, lo que permite observar en detalle los efectos de modificar el valor base en la simulación.

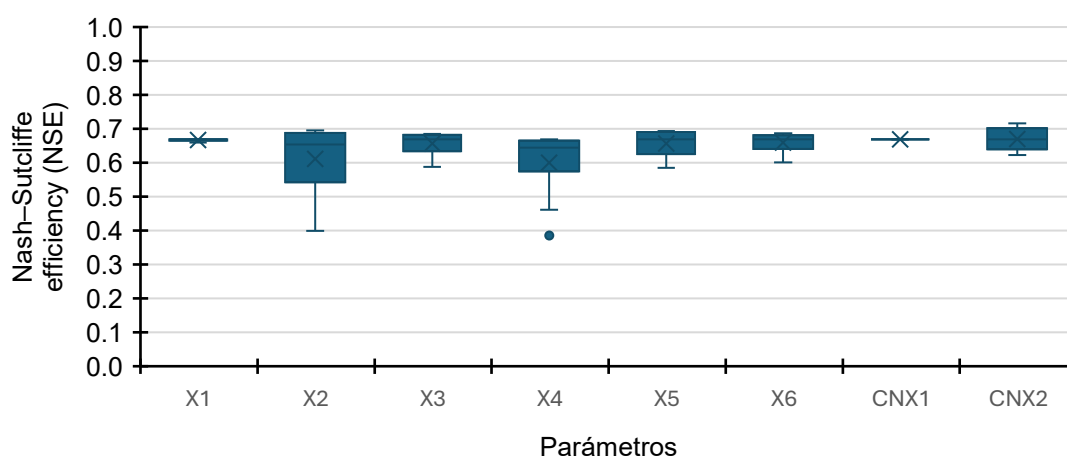


Figura 26. Distribución de los valores de NSE en función de la variación de los parámetros del modelo, métricas calculadas en el periodo 1996 a 2020.

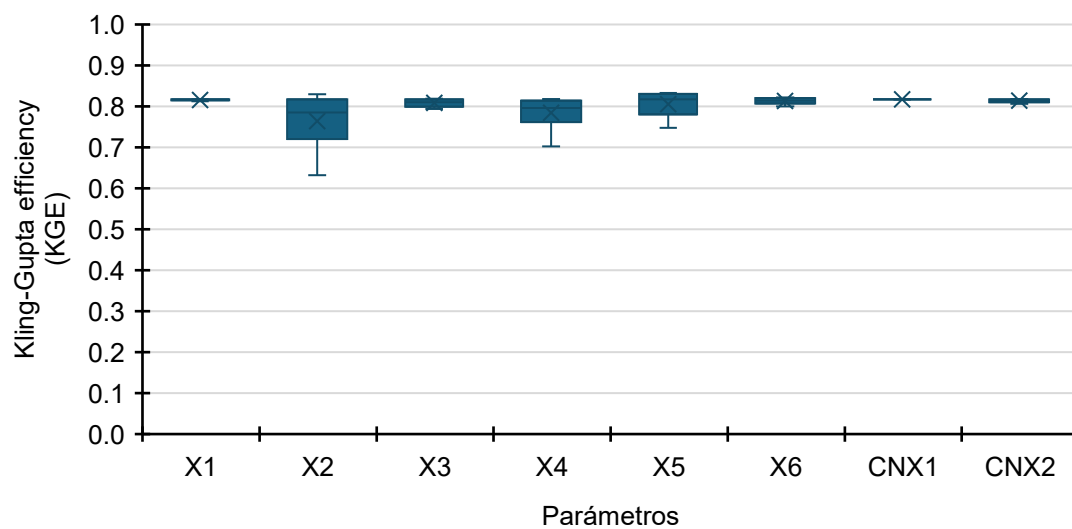


Figura 27. Distribución de los valores de RMSE en función de la variación de los parámetros del modelo, métricas calculadas en periodo 1996-2020.

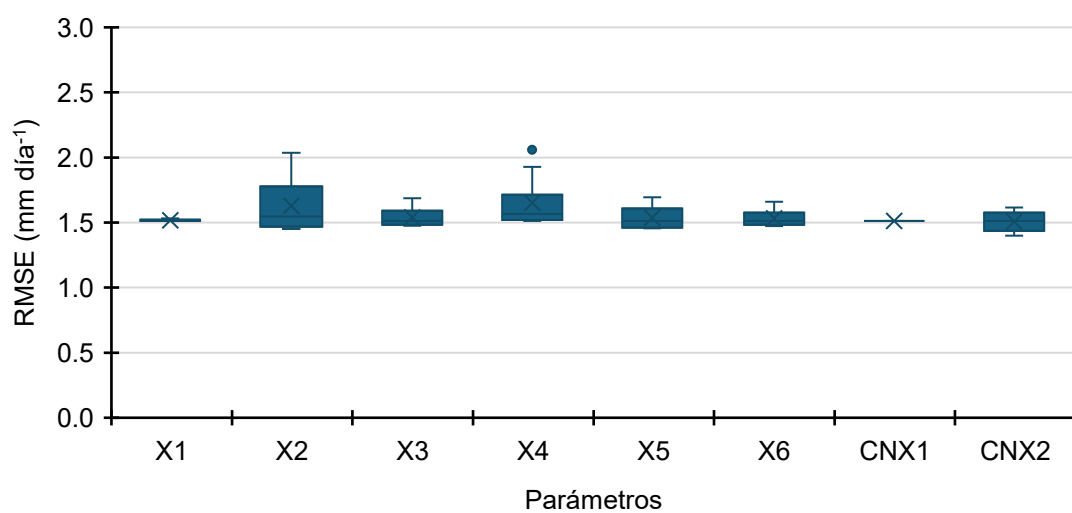


Figura 28. Distribución de los valores de KGE en función de la variación de los parámetros del modelo, métricas calculadas en periodo 1996-2020.

Tabla 14. Respuesta en las métricas de evaluación del modelo, a la variación del valor inicial del parámetro coeficiente de escorrentía directa (X2) (Periodo 1996 a 2020).

| Porcentaje de variación | Valor parámetro (mm) | NSE | RMSE (mm/día) | KGE |
|-------------------------|----------------------|------|---------------|------|
| -50% | 0.261 | 0.65 | 1.55 | 0.75 |
| -40% | 0.313 | 0.68 | 1.49 | 0.79 |
| -30% | 0.365 | 0.69 | 1.46 | 0.81 |
| -20% | 0.417 | 0.70 | 1.45 | 0.83 |
| -10% | 0.469 | 0.69 | 1.47 | 0.83 |
| Valor inicial | 0.521 | 0.67 | 1.51 | 0.82 |
| 10% | 0.573 | 0.64 | 1.58 | 0.79 |
| 20% | 0.625 | 0.60 | 1.67 | 0.76 |
| 30% | 0.677 | 0.54 | 1.78 | 0.72 |
| 40% | 0.730 | 0.48 | 1.90 | 0.68 |
| 50% | 0.782 | 0.40 | 2.04 | 0.63 |

Tabla 15. Respuesta en las métricas de evaluación del modelo, a la variación del valor inicial del parámetro tiempo de retardo (X4) (Periodo 1996 a 2020).

| Porcentaje de variación | Valor parámetro (mm) | NSE | RMSE (mm/día) | KGE |
|-------------------------|----------------------|------|---------------|------|
| -50% | 0.855 | 0.39 | 2.06 | 0.70 |
| -40% | 1.026 | 0.46 | 1.93 | 0.73 |
| -30% | 1.197 | 0.61 | 1.65 | 0.79 |
| -20% | 1.368 | 0.65 | 1.55 | 0.81 |
| -10% | 1.539 | 0.67 | 1.52 | 0.81 |
| Valor inicial | 1.710 | 0.67 | 1.51 | 0.82 |
| 10% | 1.881 | 0.67 | 1.51 | 0.82 |
| 20% | 2.052 | 0.67 | 1.52 | 0.81 |
| 30% | 2.223 | 0.64 | 1.57 | 0.80 |
| 40% | 2.394 | 0.61 | 1.64 | 0.78 |
| 50% | 2.565 | 0.57 | 1.71 | 0.76 |

La evaluación de sensibilidad desarrollada mediante el método One-At-a-Time (OAT) permitió identificar los parámetros que mayor influencia ejercen sobre el desempeño hidrológico del modelo CemaNeige-GR6J. Como se observa en las figuras de boxplot para los tres indicadores evaluados (NSE, KGE y RMSE), el comportamiento del modelo es especialmente sensible a las variaciones del coeficiente de escorrentía directa (X2) y al tiempo de retardo (X4), parámetros asociados directamente a los tiempos de respuesta de la cuenca. Esta sensibilidad se ve reflejada en amplios rangos, en el caso de X2, el NSE disminuye desde 0,70 a 0,40 cuando el parámetro aumenta 50%, con un incremento del RMSE desde 1,45 hasta 2,04 mm/día y una caída del KGE desde 0,83 a 0,63. Una tendencia similar se presenta para X4, cuyo NSE puede descender hasta 0,39 y el RMSE escalar hasta 2,06 mm/día al variar este parámetro en ± 50 %. Estos resultados reflejan que ambos parámetros son determinantes en la representación de eventos de rápida respuesta o acumulaciones sostenidas de escorrentía, como las observadas en los caudales diarios simulados, especialmente en eventos críticos analizados previamente (2007 y 2017). La importancia de estos parámetros radica en que regulan la dinámica temporal del modelo, afectando directamente la sincronía y magnitud de los picos de caudal. En escenarios donde se observaron diferencias temporales en los picos simulados, como en eventos de verano o transiciones estacionales, se puede inferir que la calibración deficiente de X2 y X4 podría haber contribuido a una respuesta hidrológica desplazada o atenuada. Esto refuerza la utilidad del análisis de sensibilidad como una

herramienta preliminar para guiar calibraciones más enfocadas. Por otro lado, parámetros como la tasa máxima de derretimiento de nieve (CNX2) muestran también una influencia moderada en los indicadores, con un rango de NSE entre 0,72 y 0,62 y un RMSE que se incrementa desde 1,40 hasta 1,62 mm/día a medida que CNX2 se aleja de su valor óptimo. Esta sensibilidad es coherente con la importancia de este parámetro en una cuenca de régimen nival, como la del río Aysén, donde el derretimiento regula buena parte de la escorrentía estacional.

En contraste, otros parámetros como el umbral de temperatura para precipitación sólida (CNX1), la capacidad del reservorio de producción (X1) o de escorrentía lenta (X3), y la percolación (X5) muestran poca variabilidad en las métricas ante sus respectivas variaciones, lo que evidencia una baja sensibilidad. Por ejemplo, CNX1 mantiene valores constantes de NSE (0,67), RMSE (1,51 mm/día) y KGE (0,81) en todo el rango de variación, lo que indica una limitada influencia directa sobre la generación de caudal. Esto no implica que el parámetro no tenga relevancia en términos físicos, sino que bajo las condiciones específicas del modelo y el periodo de análisis, sus efectos son disminuidos por otros componentes dominantes.

Desde una perspectiva metodológica, si bien el análisis OAT es una herramienta útil por su simpleza y claridad para identificar patrones iniciales, tiene limitaciones importantes al evaluar interacciones entre parámetros, lo cual puede ser crucial en modelos como GR6J donde la estructura conceptual

favorece compensaciones internas. Es posible que ciertas combinaciones de parámetros "compensen" entre sí errores individuales, generando buen ajuste pero sin garantizar realismo hidrológico. Este riesgo se acentúa al emplear algoritmos automáticos como el de Michel, que maximizan funciones objetivo pero no necesariamente preservan la coherencia física de los procesos, lo que podría explicar que parámetros poco sensibles hayan sido igualmente calibrados sin contribuir significativamente al ajuste observado. Esta situación refleja el principio de equifinalidad planteado por Beven (2006), según el cual múltiples combinaciones de parámetros pueden reproducir adecuadamente las salidas del modelo sin representar necesariamente una solución físicamente realista.

Finalmente, aunque la calibración realizada logra buenos resultados en promedio, como se ha discutido, el análisis de sensibilidad revela que una porción importante de esta eficiencia depende en un número reducido de parámetros. Esto plantea la necesidad de realizar una revisión crítica de la estructura de calibración. ¿Es más importante asegurar una correcta parametrización de los elementos sensibles o utilizar forzantes meteorológicas más representativas? La respuesta parece ser una combinación de ambas estrategias, pero sin duda este análisis evidencia que, ante un modelo conceptual limitado y forzantes promediadas como CR2MET, la elección y calibración precisa de parámetros críticos es esencial para garantizar resultados robustos.

5.4 Evaluación de la rutina de nieve

Otro aspecto por considerar, en función de los resultados obtenidos, es la influencia de la nieve. La cuenca presenta un régimen pluvio-nival, por lo que no sorprende que el modelo tenga mejor desempeño en años húmedos y fríos, donde la rutina CemaNeige representa de forma más efectiva la dinámica nival. Las métricas muestran un mayor ajuste en estos años, lo que sugiere que una adecuada simulación de los procesos de acumulación y derretimiento de nieve mejora el rendimiento del modelo. Dada la importancia de la nieve en esta cuenca, se generó un gráfico del equivalente en agua (SWE) a partir del Escenario 1, con el objetivo de evaluar el comportamiento de la acumulación nival, factor clave en la modelación hidrológica del río Aysén.

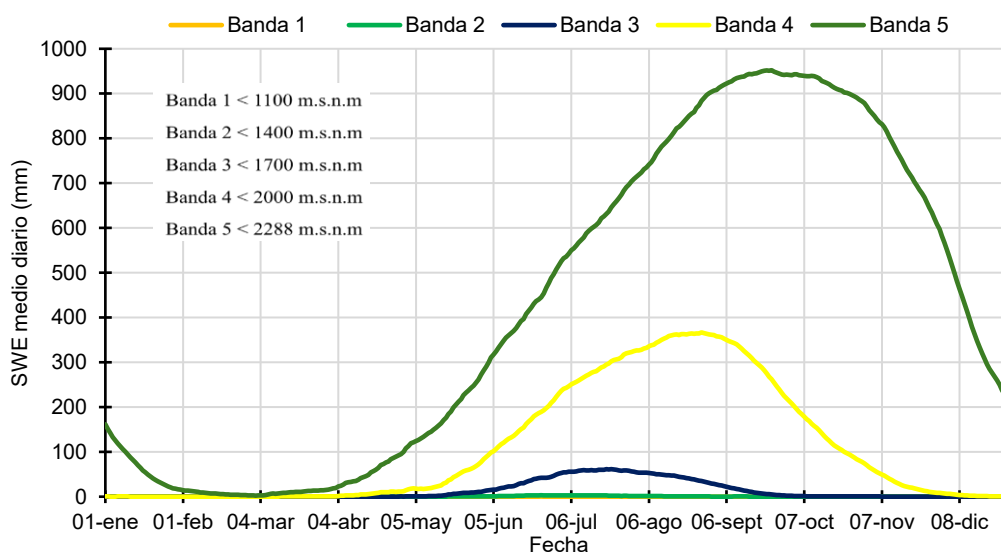


Figura 29. Equivalente en agua medio diario, para el periodo de evaluación que va desde 1996 a 2020, Escenario 1 de calibración.

Se observa que la rutina CemaNeige genera resultados razonables para los fenómenos de acumulación y ablación, que ocurren en la cuenca, donde tenemos el peak de acumulación a finales de septiembre y el comienzo del derretimiento desde octubre hasta que ya no se registra casi nieve en las bandas de elevación para finales de febrero. Esto se relaciona mucho al comportamiento del caudal observado del río Aysén, el cual sigue este mismo patrón. El modelo puede generar estas salidas de acumulación y derretimiento de nieve en cada una de las bandas de elevación, pero, para esta metodología no se cuenta con datos observados de SWE o derretimiento de nieve en la cuenca, lo que no permite una evaluación correcta de la rutina de nieve que utiliza el modelo y, por lo tanto, no es posible cuantificar el rendimiento del modelo con respecto a los procesos nivales. Pese a esta limitación, se busca evaluar si la dinámica simulada por esta rutina es coherente y aporta efectivamente a la respuesta hidrológica general, lo cual puede inferirse de forma indirecta al analizar las simulaciones de caudal diario presentadas en las Figuras 31 y 33, donde se observan incrementos de caudal en periodos sin precipitaciones significativas, lo que sugiere un comportamiento hidrológico dominado por procesos de fusión nival. Esta evaluación cualitativa permite, al menos parcialmente, validar la utilidad de la rutina de nieve dentro del modelo, en ausencia de observaciones directas. Además de identificar en las figuras 30 y 32, el efecto de la temperatura utilizada como forzante meteorológica (CR2MET), al aumento o disminución del derretimiento en los distintos escenarios.

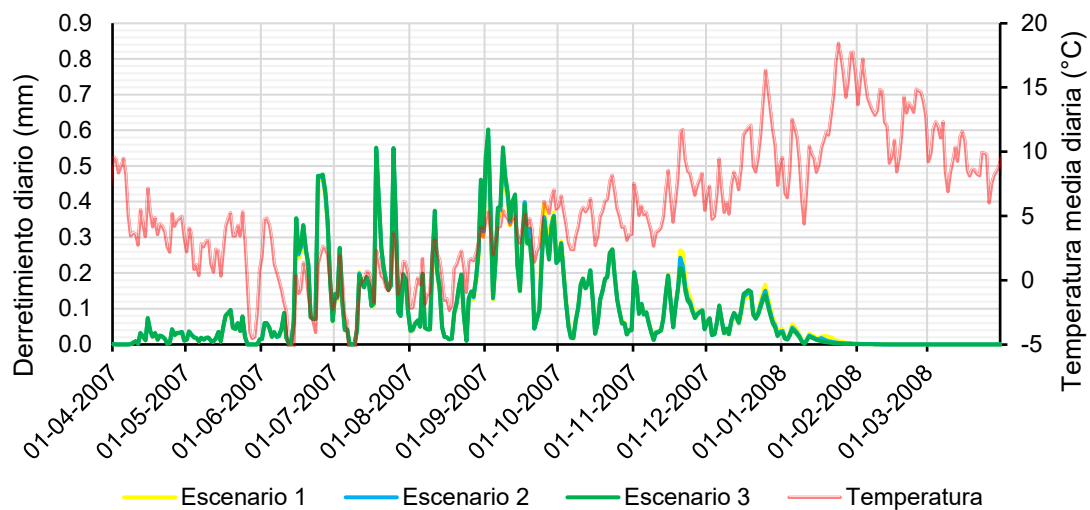


Figura 30. Respuesta del derretimiento simulado a la variabilidad térmica diaria durante 2007–2008, bajo los tres escenarios de calibración del modelo.

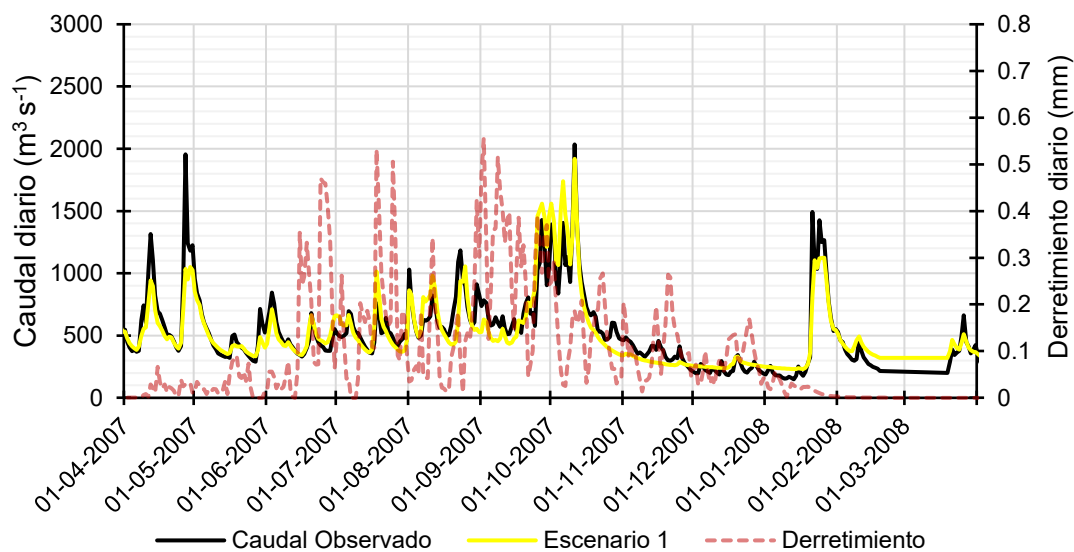


Figura 31. Caudal observado, caudal y derretimiento diario simulado en la cuenca del río Aysén (Abril 2007 – Marzo 2008), (Escenario 1).

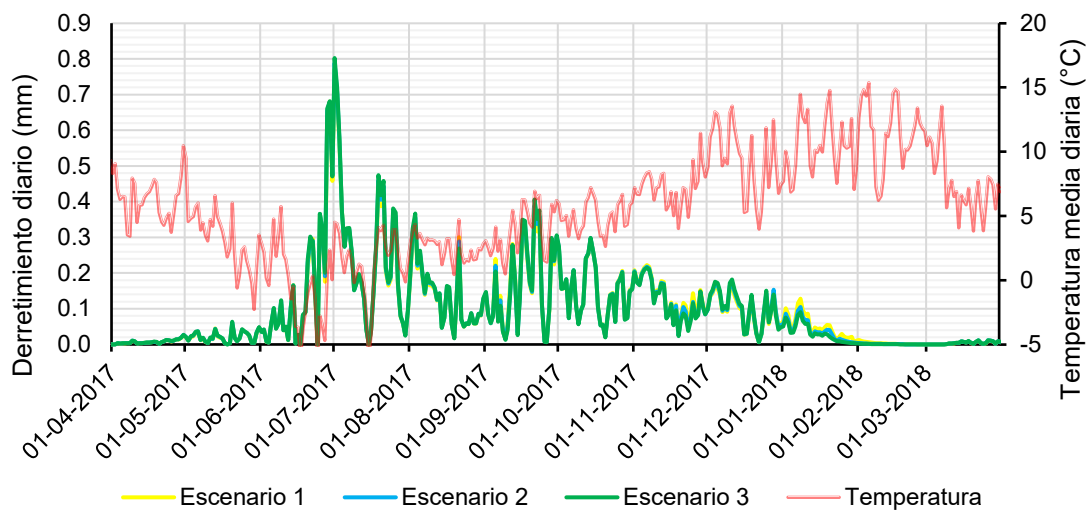


Figura 32. Respuesta del derretimiento simulado a la variabilidad térmica diaria durante 2017–2018, bajo los tres escenarios de calibración del modelo.

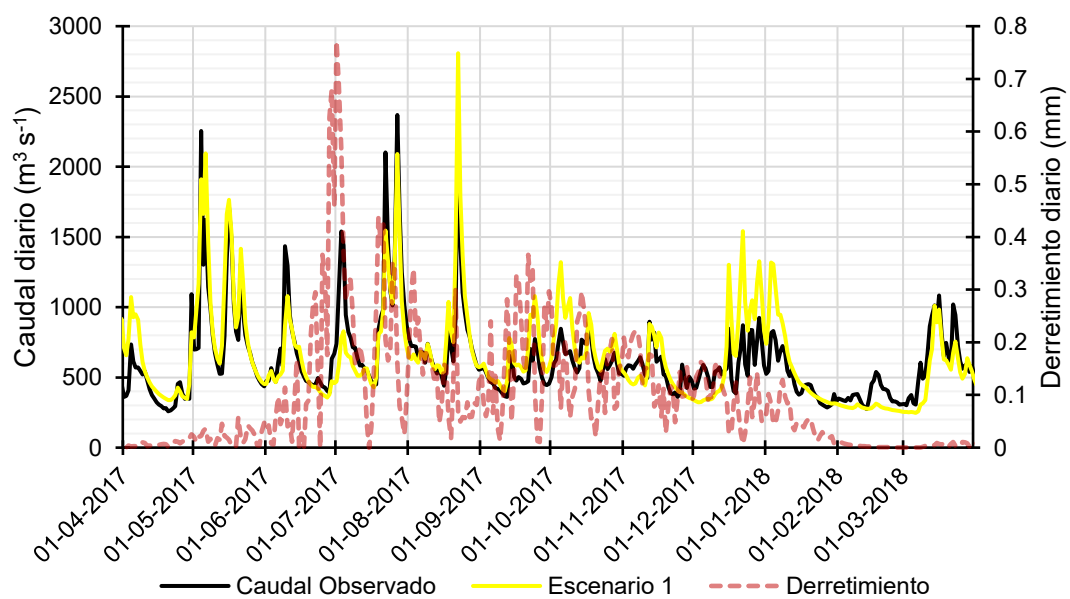


Figura 33. Caudal observado, caudal y derretimiento diario simulado en la cuenca del río Aysén (Abril 2017 – Marzo 2018), (Escenario 1).

Al observar las series de derretimiento simulado en las Figuras 30 y 32, se puede afirmar que el modelo responde al estímulo generado por las forzantes meteorológicas de temperatura, aumentando o disminuyendo el derretimiento en función de la variación de la temperatura media diaria. Además, se identifican umbrales térmicos que accionan el proceso de fusión nival en la cuenca, en general se observa que cuando la temperatura supera los 0 °C, se genera derretimiento, para el caso de temperaturas menores a los 0 °C la respuesta en el derretimiento es nula o muy limitada. De esta forma, en periodos de verano (febrero), a pesar de que las temperaturas continúan siendo mayores a 0 °C, no se registra derretimiento, lo que indicaría implícitamente que ya no queda nieve acumulada disponible.

La comparación entre los años hidrológicos 2007–2008 y 2017–2018 permite analizar la respuesta del modelo CemaNeige-GR6J frente a condiciones climáticas opuestas, representadas respectivamente por un año seco y frío (Figura 30) y un año húmedo y cálido (Figura 32). En 2007–2008 el derretimiento simulado inicia desde agosto, alcanzando su punto máximo en septiembre, con valores que superan los 0,5 mm/día, y desaparece hacia el verano, observando que para febrero no existe derretimiento en la cuenca. En cambio, el año 2017–2018 presenta un comportamiento claramente distinto, con el proceso de fusión comenzando de forma anticipada en julio, marcado por un peak temprano cercano a los 0,8 mm/día, y se prolonga de manera

sostenida hasta noviembre, lo que refleja el impacto de mayores temperaturas y mayor precipitación acumulada.

Las Figuras 31 y 33 complementan esta información mostrando la evolución compartida del caudal observado, el caudal simulado y el derretimiento. En ambos años, el modelo reproduce de forma adecuada la estacionalidad del caudal y la magnitud media del régimen. Sin embargo, se mantiene una tendencia a subestimar los eventos extremos, lo que ya había sido evidenciado en las simulaciones diarias, las figuras de dispersión y la curva de duración. En 2007–2008, existe una relación clara entre los peaks de derretimiento y las crecidas durante la primavera, aunque con un desfase de varios días, lo que refleja una respuesta hidrológica retardada, probablemente vinculada al almacenamiento en el sistema, representado por el parámetro X4 de GR6J.

En contraste, en 2017–2018, el derretimiento se inicia con un peak en julio y rápidamente va disminuyendo, siendo menos prolongado que en el año frío. También se observan aumentos de caudal incluso en días donde el derretimiento es muy bajo o cero, lo que sugiere, de forma implícita, la presencia de eventos pluviales. Si bien las precipitaciones no están representadas gráficamente en estas figuras, el desfase o la falta de correspondencia entre la fusión nival y las crecidas permite inferir que la lluvia tuvo un rol relevante en la generación de escorrentía durante ciertos eventos. En este contexto, el modelo sigue respondiendo al estímulo térmico, pero la conversión de ese derretimiento en escorrentía no siempre es inmediata ni

proporcional, especialmente bajo condiciones climáticas más dinámicas, donde se combinan lluvias intensas con procesos de fusión sostenida como los periodos de primavera.

Al comparar los tres escenarios de calibración, se observa que las curvas de derretimiento son prácticamente idénticas dentro de cada año, lo que evidencia una respuesta homogénea del modelo frente a distintos periodos de calibración. Esta escasa variabilidad puede explicarse por la baja sensibilidad de los parámetros nivosos (CNX1 y CNX2), ya identificada en el análisis de sensibilidad, y también por las limitaciones estructurales del modelo y de las entradas meteorológicas. En particular, el uso de datos grillados del producto CR2MET sin ajuste local de gradientes térmicos ni pluviométricos tiende a suavizar las señales extremas y a homogeneizar las condiciones atmosféricas en un territorio topográficamente complejo como la cuenca del río Aysén.

En este estudio se utilizaron cinco bandas altitudinales con gradientes estándar tomados de la literatura ($-0,6\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ para temperatura y $+10\%/100\text{ m}$ para precipitación, según Valéry et al., 2010). Aunque esta configuración es ampliamente utilizada, su aplicación directa en una cuenca con alta heterogeneidad topográfica puede resultar insuficiente, ya que no representa adecuadamente las variaciones microclimáticas que ocurren a escala local.

Una estrategia de mejora consiste en aumentar el número de bandas altitudinales y calibrar localmente los gradientes de temperatura y

precipitación. Esto permitiría capturar con mayor precisión las transiciones térmicas y pluviométricas dentro de la cuenca, y mejorar tanto la simulación del derretimiento como la generación de escorrentía, especialmente en eventos mixtos de lluvia y nieve. Esta mejora es especialmente relevante en el contexto del cambio climático, donde se proyecta una mayor frecuencia de eventos extremos y condiciones transitorias que demandan una representación más detallada de los procesos hidrológicos.

6. CONCLUSIONES

El presente trabajo permitió evaluar el desempeño del modelo hidrológico conceptual CemaNeige-GR6J en la simulación del régimen pluvio-nival de la cuenca del río Aysén, caracterizada por su complejidad topográfica y climática. Al generar y comparar tres escenarios distintos de calibración y validación, se pudo afirmar que el modelo sí depende del periodo al que se somete, ya que mostró diferencias en la estabilidad del ajuste y su capacidad predictiva entre escenarios, respondiendo así al primer objetivo. Además, se evaluó la influencia de los parámetros del modelo, observándose que su modificación genera diferencias claras en el rendimiento, destacando en el análisis de sensibilidad los parámetros X2 (escorrentía directa) y X4 (tiempo de retardo) como los más influyentes, lo que responde directamente al segundo objetivo. Finalmente, se analizó el comportamiento del modelo frente a distintos tipos de años hidrológicos, concluyéndose que su desempeño mejora en años fríos y húmedos, propios de cuencas con marcada influencia nival, cumpliendo el tercer objetivo propuesto.

Los resultados obtenidos muestran que, pese a utilizar una metodología relativamente simple basada en datos meteorológicos grillados, parametrización estándar sin ajustes locales, un número reducido de parámetros y calibración automática, el modelo fue capaz de representar con buena precisión la estacionalidad del caudal y una dinámica razonable de fusión y acumulación nival. En especial, se logró reproducir adecuadamente

los caudales medios y su variabilidad estacional, incluso sin una caracterización local detallada, lo que demuestra su robustez operativa.

El modelo cumplió las expectativas para las que fue diseñado, al representar el comportamiento hidrológico en cuencas de montaña con influencia nival. Esto cobra aún más valor al aplicarse en una cuenca tan compleja como la del Aysén, con fuerte heterogeneidad altitudinal, difícil acceso y limitaciones de información. Asimismo, se destaca que el modelo logra identificar umbrales térmicos coherentes con el comportamiento físico del sistema, y si bien presenta limitaciones en la representación de eventos extremos o en la respuesta rápida del caudal, su estructura modular y conceptual ofrece un amplio potencial de mejora. Con una calibración local más detallada, una mayor resolución altitudinal o una integración de datos meteorológicos con mayor precisión espacial, este modelo podría constituir una herramienta más robusta para la cuantificación de crecidas, eventos pluvio-nivales, análisis de cambio climático o balance hídrico en cuencas de difícil instrumentación.

En este sentido, contar con modelos como CemaNeige-GR6J de fácil acceso, bajo requerimiento computacional y ejecución eficiente representa una oportunidad para fortalecer la gestión de los recursos hídricos en zonas rurales, cordilleranas o con baja densidad de monitoreo. Su uso puede apoyar procesos de planificación, análisis de escenarios y alerta temprana, especialmente en contextos donde la incertidumbre climática y la presión sobre el recurso hídrico exigen herramientas funcionales y adaptables.

En definitiva, el modelo no solo cumple con su objetivo técnico, sino que también se presenta como una alternativa razonable para apoyar la estimación de disponibilidad hídrica en contextos con información limitada. Los resultados permiten validar la hipótesis planteada en este estudio, al confirmar que CemaNeige-GR6J es capaz de representar de manera razonable el funcionamiento hidrológico de una cuenca patagónica como la del río Aysén, donde los procesos de acumulación y derretimiento de nieve son determinantes. Su desempeño, versatilidad y claridad conceptual refuerzan su utilidad como herramienta de apoyo a la toma de decisiones en el ámbito técnico y académico.

7. REFERENCIAS

- Aguayo, R., León-Muñoz, J., Aguayo, M., et al. (s.f.). PatagoniaMet: un conjunto de datos hidrometeorológicos de múltiples fuentes para la Patagonia Occidental. <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02828-2>
- Alvarez-Garreton, C., Mendoza, P. A., Boisier, J. P., Addor, N., Galleguillos, M., Zambrano-Bigiarini, M., Lara, A., Puelma, C., Cortes, G., Garreaud, R., McPhee, J., & Ayala, A. (2018). The CAMELS-CL dataset: catchment attributes and meteorology for large sample studies in Chile. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(11), 5817-5846. <https://doi.org/10.5194/hess-22-5817-2018>
- Andréassian, V., Bourgin, F., Brigode, P., Le Moine, N., Mathevet, T., Mouelhi, S., Oudin, L., Pushpalatha, R., & Valéry, A. (2023). Package 'airGR'. Recuperado de <https://cran.r-project.org/web/packages/airGR/airGR.pdf>
- Beven, K. (2012). *Rainfall-Runoff Modelling: The Primer*. John Wiley & Sons Ltd. West Sussex, England Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/353832416_Hydrologically_informed_machine_learning_for_rainfall-runoff_modelling_towards_distributed_modelling
- Biblioteca Digital ODEPA. (s.f.). Recursos hídricos y cambio climático. Recuperado de <https://bibliotecadigital.odepa.gob.cl/bitstream/handle/20.500.12650/9160/RecursosHidricosCambioClimatico.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (BCN). (s.f.). Clima y vegetación Región de Aysén. Recuperado de <https://www.bcn.cl/siit/nuestropais/region11/clima.htm>

Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. (2023). Situación de los recursos hídricos en Chile. Recuperado de https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositoRío%2F10221%2F25323%2F2%2FInforme_Recursos_Hidricos_en_Chile.pdf

Cabrera, J. (2017). Modelos hidrológicos. Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil. Recuperado de https://www.imefen.uni.edu.pe/Temas_interes/modhidro_1.pdf

Centro de Investigación en Ecosistemas de la Patagonia (CIEP). (2023, 21 de marzo). Día Mundial del Agua: ¿Qué sabemos de este recurso? CIEP. Recuperado de <https://www.ciep.cl/2023/03/21/dia-mundial-del-agua-que-sabemos-de-este-recurso/>

Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). Hidrología aplicada. McGraw-Hill Interamericana, S.A. Recuperado de <https://es.scribd.com/document/447733434/Hidrologia-Aplicada-Ven-Te-Chow-pdf>

Dirección General de Aguas (DGA). (2019). Desarrollo de herramienta para el análisis de gestión en el marco del Plan Nacional de Recursos Hídricos (SIT N° 445). Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile. Realizado por DICTUC S.A. & SEI. Recuperado de <https://bibliotecadigital.ciren.cl/server/api/core/bitstreams/5d61f3b9-6330-4e9a-ae1f-7353bbf0e709/content>

Dirección General de Aguas (DGA). (2022). Informe sobre la situación de los recursos hídricos en Chile. Ministerio de Obras Públicas.

Dirección General de Aguas (DGA). (2024). Sistema hidrométrico en línea. <https://dga.mop.gob.cl/Paginas/hidrolineasatel.aspx>

Grupo Medioambiental del Sistema de las Naciones Unidas (SNU) en Chile. (2021). Escasez hídrica en Chile: desafíos pendientes. Recuperado de https://chile.un.org/sites/default/files/202103/PB%20Recursos%20H%C3%ADdricos_FINAL_17%20de%20marzo.pdf

Instituto Nacional de Estadísticas (INE). (2017). Censo 2017: Resultados Región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo. INE. Recuperado de <http://resultados.censo2017.cl/Region?R=R11>

Montecinos, A., & Aceituno, P. (2020). The Snowline and 0°C Isotherm Altitudes During Precipitation Events in the Dry Subtropical Chilean Andes. *Frontiers in Earth Science*, 8, 571806. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.571806>

Moriasi D. N., Arnold J. G., Van Liew M. W., Bingner R. L., Harmel R. D., Veith T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885–900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>

Mouelhi S., Michel C., Edijanto P., Perrin C., Andreassian V. (2006). Stepwise development of a two-parameter monthly water balance model. *Journal of Hydrology*, 318(1–4), 200–214. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.06.014>

Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA). (2019). El cambio climático y los recursos hídricos de Chile. Recuperado de <https://bibliotecadigital.odepa.gob.cl/handle/20.500.12650/9160>

Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE). (2018). Estudios de la OCDE sobre el agua: Chile 2018. Editorial OCDE.

Perrin C., Michel C., Andréassian V. (2003). Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology*, 279(1–4), 275–289. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00225-7](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00225-7)

Valéry, A., Andréassian, V., & Perrin, C. (2014). Assembling and testing a snow accounting routine (CemaNeige) in an event-based hydrological model.