

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXVI CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

MODELACIÓN GLACIOHIDROLÓGICA EN LA CUENCA RIO JUNCAL EN JUNCAL

ALEKOS SANLLEHI¹
LINA CASTRO¹
ALVARO OSSANDÓN¹

RESUMEN

En este trabajo, se desarrolla e implementa un modelo glacio-hidrológico integrando los modelos “*Utah Energy Balance*” y “*Enhanced Temperature-Index*” al modelo de escorrentía de Migueles de carácter semi-distribuido y conceptual (Migueles, 1994), evaluando el rendimiento final del modelo y la confiabilidad de los resultados de derretimiento nivoglaciario simulados para la cuenca Río Juncal en Juncal. El modelo desarrollado es calibrado por etapas utilizando múltiples fuentes de información, llegando a valores de métricas de eficiencia elevados para los modelos nival y glaciario, y aceptables para el modelo de escorrentía ($KGE_{cal} = 0.67$; $KGE_{val} = 0.59$). Se determina del análisis comparativo de los resultados de derretimiento nivoglaciario con diversos estudios anteriores que el modelo genera una posible subestimación del derretimiento nivoglaciario en la zona de alta montaña junto a una sobrestimación de la precipitación líquida en gran parte de la cuenca, provocada por sobrestimaciones importantes de temperatura en alta montaña, generando desfases en la temporalidad estacional del flujo de escorrentía generado, junto a incertidumbre en cada paso y resultado de la modelación. Esto remarca nuevamente la necesidad de contar con mayor información de calidad en alta montaña para el forzamiento de los estudios de modelación glacio-hidrológica de la zona.

¹ Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile.

1 INTRODUCCIÓN

La seguridad hídrica de la zona de Chile central depende en demasía del derretimiento del manto nival acumulado en los meses de invierno, y el derretimiento glaciar, el cual, toma mayor relevancia a finales del periodo de ablación y más aún en los años secos (Á. Ayala et al., 2020; Cornwell et al., 2016; Masiokas et al., 2010; Mendoza et al., 2014). En los últimos años, el aporte hídrico del deshielo se ha visto mermado debido a importantes disminuciones del volumen de nieve caída (Masiokas et al., 2010) y un retroceso acelerado de los glaciares de la zona (Barcaza et al., 2017; Masiokas et al., 2020). Esto ha incentivado un gran número de estudios de modelación glacio-hidroológica aplicados en la zona central de Chile para el estudio del ciclo glacio-hidroológico. Respecto a modelación glacio-hidroológica distribuida, Ayala et al. (2017) entrega resultados detallados de derretimiento y sublimación de forma distribuida en el Glaciar Juncal Norte para dos meses de modelación (12-2007 a 02-2008). Años más tarde, Ayala et al. (2020) realiza una modelación glacio-hidroológica distribuida para la cuenca Río Maipo en el Manzano de larga extensión (1955 a 2016), obteniendo el balance másico de 26 glaciares y su contribución a la escorrentía, pero no entregando el detalle del derretimiento distribuido y su variabilidad espaciotemporal para el largo periodo de análisis.

El objetivo del presente estudio es acoplar los modelos “*Utah Energy Balance*” (UEB) (Tarboton & Luce, 1996) y “*Enhanced Temperature-Index*” (ETI) (Pellicciotti et al., 2005) al modelo de escorrentía de Migueles (1994), de carácter conceptual y semi-distribuido. Posterior a esto, se aplica el modelo resultante en la cuenca del Río Juncal en Juncal para el periodo entre los años 2000 y 2020 con el fin de analizar el rendimiento del modelo total en función de la correcta descripción de los procesos glacio-hidroológicos. Para la calibración de los modelos, se realiza un proceso de calibración por etapas, donde se calibra primero el modelo nival, seguido del modelo glaciar, para finalizar con la calibración del modelo de escorrentía. Los modelos nival y glaciar son calibrados de un trabajo anterior, por lo que se detalla solamente la calibración del modelo de escorrentía, el cual, es calibrado evaluando la métrica de eficiencia de Kling Gupta Efficiency (KGE) (Gupta et al., 2009) utilizando series de caudal diario en la cuenca de análisis. Posterior a la calibración, se analiza la eficiencia del modelo en función de las métricas de eficiencia obtenidas y resultados de estudios anteriores de modelación glacio-hidroológica.

2 ZONA DE ESTUDIO

La cuenca del Río Juncal en Juncal (en adelante **RJJ**) es una cuenca andina de la región de Valparaíso, y una de las cuencas cabeceras de la cuenca del Río Aconcagua (Figura 1). Se encuentra contenida entre las coordenadas 32°43' y 33°3' latitud sur y meridianos 69°59' y 70°10', con un rango de elevación entre los 2273-5919 [msnm], y una elevación media de 3662 [msnm]. Presenta una superficie de drenaje de 343.1 [km²], con un 7.5 % de dicha superficie correspondiente a zona glaciada, donde destacan los glaciares Juncal Norte (A y B) y Monos de Agua.

3 METODOLOGÍA

3.1 MODELO DE ESCORRENTÍA

El modelo de escorrentía de Migueles (1994) es un modelo de escorrentía de tipo semi-distribuido (dividido en bandas de elevación), conceptual y almacenamiento de tipo estanque de resolución temporal diaria que recibe el derretimiento nival/glaciar de otros modelos y simula el balance de humedad del suelo y posterior escurrimiento del agua. En específico, el modelo de escorrentía de Migueles simula el balance de humedad de la capa superficial del suelo y de la capa inferior a esta (subsuelo), infiltración de capa superficial a capa de subsuelo, evapotranspiración y escorrentía superficial y subsuperficial.

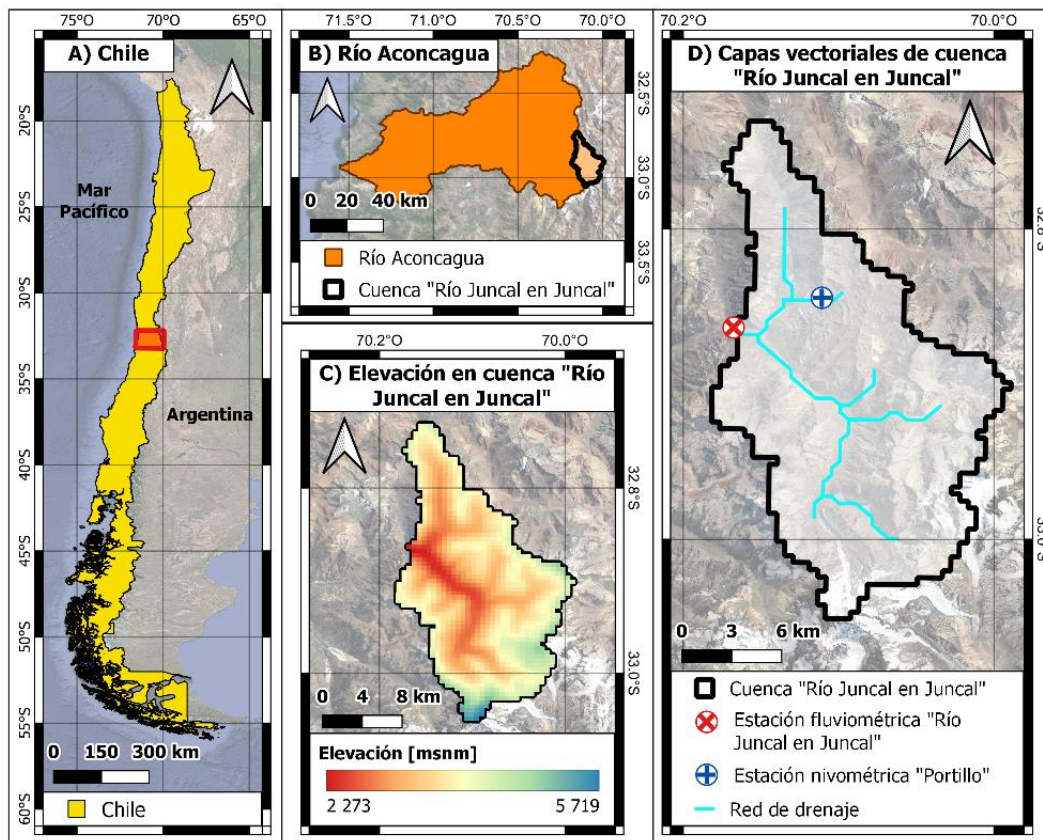


Figura 1. Mapa de zona de estudio, cuenca Río Juncal en Juncal y su distribución de elevación

3.2 CONFIGURACIÓN DE LA MODELACIÓN

Se presenta en la Tabla 1 la configuración general de la modelación glacio-hidrológica aplicada, donde se detallan los modelos utilizados, la resolución espacial y temporal de la simulación, la extensión temporal de esta y las forzantes utilizadas, que corresponden a los productos grillados del CR2MET (Alvarez-Garretón et al., 2018), correspondientes a los productos de precipitación y temperatura máxima y mínima diaria, versión v2.0, con extensión de registro desde 1979-2020.

De un análisis comparativo de los registros de temperatura máxima y mínima diaria con estaciones meteorológicas cercanas a la cuenca de estudio, se determina que los productos presentan sesgos importantes, por lo que se les aplica una corrección a los registros de temperatura del producto grillado en función de un ajuste que relaciona el promedio de los sesgos mensuales multianuales de la temperatura máxima y mínima en el píxel del producto grillado y la estación meteorológica, y la elevación del píxel donde se ubica la estación. Dicho ajuste se presenta en la Figura 2, de donde

se aprecia que para píxeles con elevaciones contenidas entre los 1100 msnm y 3000 msnm, el producto grillado presenta subestimaciones importantes de temperatura, mientras que más arriba de dicha elevación no se cuenta con registros observados de larga duración, por lo que se decide no corregir las temperaturas de los puntos sobre dicha elevación.

Tabla 1. Configuración general de modelación glacio-hidroológica.

	Modelo Nival	Modelo Glaciar	Modelo Escorrentía
Nombre de modelo	Modelo UEB	Modelo ETI	Modelo de escorrentía de Migueles
Autor	Tarboton & Luce (1996)	Pellicciotti et al. (2005)	Migueles (1994)
Resolución espacial	Píxeles 500 [m]		12 bandas de elevación
Resolución temporal	1 [hr]		1 [d]
Extensión temporal	[01/04/2000 - 31/03/2020] (20 años de simulación)		
Forzantes meteorológicas	Productos grillados de precipitación y temperatura diaria de CR2MET de extensión 1979 a 2020 (versión v2.0)		

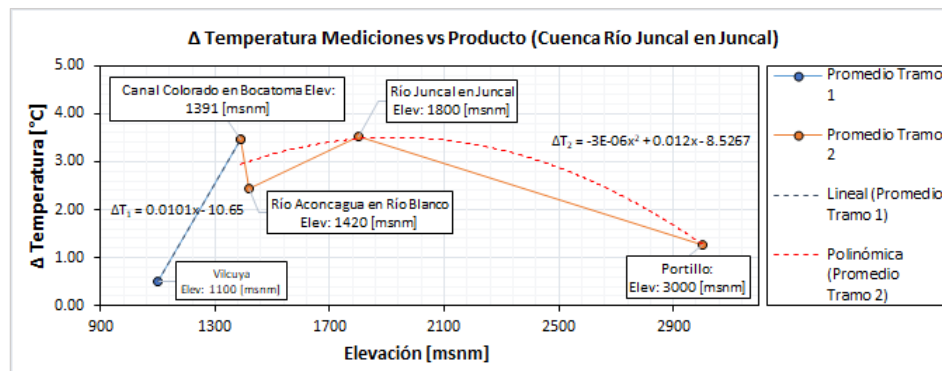


Figura 2. Ajuste del sesgo promedio entre mediciones de temperatura máxima y mínima diaria de estaciones meteorológicas y producto grillado de CR2MET en función de la elevación.

3.3 PROCESO DE CALIBRACIÓN POR ETAPAS

Para la calibración y validación de los modelos implementados se realiza un proceso de calibración por etapas, en donde se calibra primero el modelo nival utilizando información de series de tiempo de cobertura nival (SCA) obtenida de imágenes MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) de Índice Normalizado de Cobertura Nival (NDSI) diarias de los satélites Aqua (Hall & Riggs., 2021a) y Terra (Hall & Riggs., 2021b), y mediciones puntuales de equivalente agua-nieve (SWE) de Estación Portillo evaluando la métrica de eficiencia KGE. Posterior a esto, se procede a calibrar el modelo glaciar dejando fijos los parámetros del modelo nival, utilizando información de tasa de variación de elevación glaciar (obtenido de Dussailant et al. (2019)) y evaluando de métrica de eficiencia el coeficiente de determinación (R^2). Finalmente, con los parámetros del modelo nival y glaciar fijos se procede a calibrar el modelo de escorrentía utilizando series de tiempo de caudal medio diario escurrido en el punto de aforo extraído de la base de datos de CAMELS del CR2MET, los cuales provienen de la base de datos de la red hidrométrica de la Dirección General de Aguas (DGA), evaluando nuevamente la métrica de eficiencia KGE.

Cabe destacar que, para los modelos nival y de escorrentía se consideró el primer año de simulación de *spin-up*, mientras que para el modelo glaciar esto no fue posible debido a que la información utilizada para calibración de modelo es un valor medio entre los años 2000 y 2018, por lo que se tuvo que considerar el mismo periodo de análisis para la comparación. Además de esto, para el modelo nival y de escorrentía, considerando el impacto que puede tener la condición hidroclimática en la calibración de modelos hidrológicos (Merz et al., 2011), se separan los periodos de calibración y validación según una clasificación del nivel de humedad del año de análisis dependiendo del caudal anual total escurrido en la cuenca RJJ, de tal manera de asegurar que la calibración considere ambas condiciones hidroclimáticas (seca y húmeda).

Es importante señalar que los modelos nival y glaciar se calibraron en un proceso previo presentado en un trabajo paralelo, por lo que solamente se muestran los resultados de calibración del modelo de escorrentía (para más detalle de las etapas anteriores, consultar la primera parte de esta investigación).

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 RESULTADOS CALIBRACIÓN DE MODELO DE ESCORRENTÍA

Para la serie de caudal diario medido y simulado presentado en la Figura 3 se puede apreciar valores de KGE aceptables ($KGE_{cal} = 0.67$; $KGE_{val} = 0.59$). Con respecto al análisis a nivel mensual-multianual presentado en la Figura 4, se puede ver un adelantamiento del *peak* de caudal en 2 meses, generando sobrestimaciones importantes de caudal a inicios de primavera (sep-oct), y también entre otoño-invierno (may-jun-jul). De estos resultados se observa que el modelo presenta problemas para simular correctamente la estacionalidad de los flujos, provocado posiblemente por un adelantamiento del derretimiento nival y/o una sobrestimación del aporte pluvial a lo largo del año y más específico, en los meses de mayo, junio y julio. Considerando que después la escorrentía baja para subir otra vez, se descarta que la sobrestimación en los meses de mayo a julio se deba a derretimiento nival. Para complementar este análisis y determinar las posibles razones de este comportamiento del modelo, se realiza un análisis comparativo de los resultados de derretimiento obtenidos del modelo nival y glaciar y aporte pluvial con estudios anteriores.

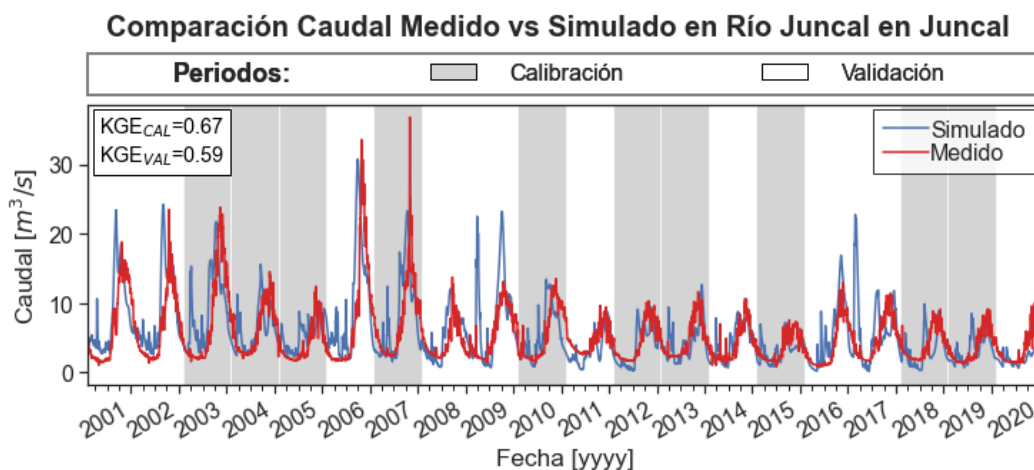


Figura 3. Caudal diario medido y simulado para cuenca RJJ.

Comparación Caudal Mensual Multianual Medido vs Simulado en Río Juncal en Juncal

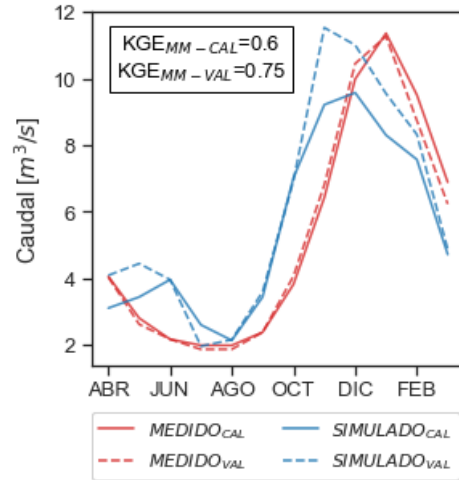


Figura 4. Caudal mensual multianual medido y simulado para cuenca RJJ.

4.2 ANÁLISIS RESULTADOS Y COMPARACIÓN ESTUDIOS ANTERIORES

Mediante la agregación de los resultados obtenidos en distintas escalas temporales y espaciales, es posible realizar comparaciones con estudios anteriores manteniendo cierto rango de validez. En primera instancia, se comparan los resultados de derretimiento nivoglaciario modelados en el glaciar Juncal Norte (en adelante, **GJN**) con los resultados obtenidos por Ayala et al. (2017) quien, mediante modelación glacio-hidroológica calcula la distribución espacial de flujos de energía y tasas de ablación en GJN entre diciembre de 2008 a febrero de 2009 a una resolución espacial de 50 [m].

En la Tabla 2 se presenta el derretimiento nivoglaciario promedio en escala glaciar ocurrido entre diciembre de 2008 y febrero de 2009, de donde se aprecia que la simulación glacio-hidroológica implementada presenta una subestimación (317.8 [mm w.e.]) del derretimiento nivoglaciario en el GJN con respecto a los resultados de Ayala et al. (2017). Si consideramos también el aporte pluvial en el GJN en los meses de análisis se obtienen un valor de 113.6 [mm w.e.], lo cual, si se sumara al derretimiento nivoglaciario aún no iguala el derretimiento modelado por Ayala et al. (2017), por lo que se le atribuye esta diferencia a subestimaciones de la precipitación del producto grillado del CR2MET en las zonas cordilleranas, las cuales ya han sido detectadas por otros autores (Alvarez-Garretón et al., 2018; Ayala et al., 2020).

Tabla 2. Tabla comparativa de derretimiento nivoglaciario media en GJN entre dic-2008 y feb-2009 simulado y presentado por Ayala et al. (2017). La ablación corresponde al derretimiento nival y glaciar sumado. Los resultados de Ayala et al. (2017) no se desglosan en nival y glaciar, por lo que las celdas asociadas al derretimiento nival y glaciar se dejan vacías.

Fuente	Glaciar	Periodo de análisis	Derretimiento [mm w. e.]		
			Ablación	Nival	Glaciar
Ayala et al. (2017)	GJN	dic-2008 a feb-2009	1194.1	-	-
Resultados de simulación actual			876.3	479.8	396.5

En función de la comparación realizada se infiere que al menos en zona de alta montaña (elevaciones mayores a ~ 3000 [msnm]) posiblemente se esté simulando un derretimiento nivoglaciario menor al real, provocado principalmente por subestimaciones en los registros de precipitación del producto grillado del CR2MET sumado a una posible sobrestimación de la precipitación caída en forma líquida, lo cual, provoca que caiga menor nieve en la zona de alta montaña, pudiendo afectar a otros procesos hidrológicos dentro de la modelación (inicio de derretimiento glaciario, recongelamiento nival, estacionalidad de la escorrentía, etc.). Relacionando este análisis a los resultados observados del modelo de escorrentía implementado, es posible observar que una menor cantidad de nieve en las zonas de alta montaña puede estar provocando un agotamiento temprano de la nieve estacional y un adelantamiento del *peak* de la escorrentía observado en la Figura 4.

Cabe destacar que las inferencias obtenidas de este análisis presentan cierta incertidumbre debido a la extensión temporal de esta y las diferencias en la escala de modelación (lo cual, afecta a los procesos hidrológicos modelados), sin embargo, se considera válida para el análisis de variables agregadas y solamente en escala de glaciares. Para complementar la investigación se hace necesario un análisis comparativo con estudios que presenten resultados a escala de cuencas.

Con el fin de complementar el análisis a nivel de cuenca, se comparan los resultados de importancia relativa de derretimiento nival y aporte pluvial anual a nivel de cuenca con los resultados obtenidos por Ayala et al. (2020), quien realiza una modelación glacio-hidrológica de larga duración (1955-2016) de la cuenca del Río Maipo en el Manzano (en adelante, **RMM**) y entrega las importancias relativas del derretimiento nival y aporte pluvial en la cuenca a nivel anual y para el verano de dicha cuenca. A pesar de que son distintas cuencas de análisis y no presentan completa equivalencia en el periodo de simulación, se considera válida la comparación debido a que el objetivo de ésta es inferir posibles errores en la estimación del aporte pluvial a nivel de cuenca considerando la similitud de regímenes hidrológicos (nivoglaciario).

Para realizar la comparación a nivel de cuenca, se presenta en la Tabla 3 las importancias relativas del deshielo nival y precipitación líquida para la cuenca RJJ y la cuenca RMM obtenido por Ayala et al. (2020) a nivel anual y en verano. Se aprecia que la cuenca RJJ presenta una mayor importancia relativa del derretimiento nival en comparación con la cuenca RMM, lo cual, es esperable debido a la diferencia sustancial entre rangos de elevación, donde RMM presenta un rango de elevación entre 850 a 6570 [msnm] y la cuenca RJJ un rango de elevación entre 2273 y 5919 [msnm], por lo que se espera que en RJJ el aporte nival tome la mayor importancia sobre RMM, que además, presenta mayor superficie de baja elevación donde el aporte pluvial toma mayor importancia en el año. A pesar de estos resultados, se aprecia también que la cuenca RJJ presenta un aporte pluvial de casi el doble de importancia para la escorrentía que para RMM en verano (18 ± 15 [%] en comparación a un 30 ± 15 [%] obtenido para la cuenca RJJ en este estudio), lo cual, es contra intuitivo considerando la diferencia de rango de elevación y los ciclos glacio-hidrológicos de las cuencas cabeceras. En específico para este estudio, un mayor aporte pluvial en verano es coincidente con las series de caudal mensual multianual presentado en la Figura 4, en el sentido de que hay menor importancia del derretimiento nival en la escorrentía debido a que la nieve se derrite antes debido a que cae menos, por lo cual, cuando cae precipitación, esta escurre inmediatamente.

Tabla 3. Tabla resumen de aporte relativo nival y pluvial promedio [%] a escorrentía en RJJ y cuenca de Río Maipo en el Manzano presentado por Ayala et al. (2020) a escala anual y en verano. Los símbolos más y menos se refieren a la variabilidad interanual.

Fuente	Cuenca	Periodo de análisis	Aporte nival [%]		Aporte pluvial [%]	
			Anual	Verano	Anual	Verano
Ayala et al. (2020)	RMM	1955-2016	55 ± 10	23 ± 23	29 ± 8	18 ± 15
Resultados de simulación actual	RJJ	2000-2020	81 ± 9.1	66 ± 15	17 ± 9	30 ± 15

Considerando el análisis comparativo de la contribución a la escorrentía por tipo de aporte nival, glaciar y pluvial entre los resultados obtenidos con ambos estudios de Ayala, se puede inferir que, en el glaciar Juncal Norte y posiblemente en toda la zona de alta montaña sobre los 3000 msnm, se llega a simular una leve subestimación de la magnitud de la contribución a la escorrentía por derretimiento nivoglaciar en verano, lo cual, puede estar provocado por una subestimación de la precipitación en alta montaña a lo largo del año presente en los registros del producto grillado CR2MET, la cual, no fue posible de subsanar mediante la implementación de un parámetro de calibración de mayoración de precipitación. Además de esto, del mismo análisis se detecta una posible sobrestimación del aporte pluvial para dicho glaciar, donde se simulan 113.6 [mm w.e.] caídos entre diciembre de 2008 y febrero de 2009. Si se extrapola el análisis a nivel de cuenca, y en función de la comparación con los resultados de Ayala et al. (2020), se detecta que esta sobrestimación de aporte pluvial ocurre en toda la cuenca. Esta clasificación errónea entre nieve y precipitación líquida caída transmite incertidumbre entre los distintos modelos, llegando a pasar desapercibido en los modelos nival y glaciar, pero presentando un desfase de la estacionalidad de los caudales simulados.

Considerando los criterios del modelo glacio-hidrológico para clasificar el tipo de aporte entre contribución por derretimiento nival, glaciar, y aporte pluvial, para que el modelo genere mucho aporte pluvial, se debe cumplir que el modelo no presente nieve sólida y que caiga precipitación líquida, por lo tanto, se considera que el error del modelo proviene desde la clasificación entre precipitación sólida y líquida, posiblemente debido a un sesgo importante en la temperatura que provoca que caiga más precipitación líquida de la esperada. Para verificar que este sea el caso, se comparan las temperaturas máximas y mínimas diarias utilizadas en la modelación con mediciones obtenidas de estaciones cercanas a la cuenca en la zona de valle/pre cordillera (entre elevaciones de 1100 msnm y 3000 [msnm]) y zona de alta cordillera (sobre 3000 [msnm]), separando la presentación de resultados entre elevaciones donde se aplica la corrección de la temperatura.

Para la zona de valle/pre cordillera se presenta la comparación de temperaturas de la estación Río Juncal en Juncal (Figura 5.a y 5.b) y para la zona de alta montaña, se presenta la comparación de temperaturas de la estación AWS en Monos de Agua (Figura 5.c y 5.d). Las características de las estaciones utilizadas se presentan en la Tabla 4.

Cabe destacar que la temperatura utilizada para la modelación en la estación Río Juncal en Juncal (eje vertical de gráfico) corresponde a la temperatura del CR2MET después de la corrección. Para cuantificar el sesgo presentado entre las temperaturas usadas para la simulación y medidas, se utiliza la Raíz Cuadrada del Error Medio (RMSE) y el Error Medio Positivo ($ME_{sobrestimación}$) y Negativo ($ME_{subestimación}$) según sobrestima o subestima la temperatura observada.

Tabla 4. Información de estaciones en Río Juncal en Juncal y Monos de Agua presentadas para comparación de temperatura máxima y mínima diaria con datos del CR2MET.

Nombre estación	Latitud [°]	Longitud [°]	Elevación [msnm]	Registro	
				Inicio	Final
Río Juncal en Juncal	-32.86	-70.17	1800	25/05/2004	Vigente
Monos de Agua	-32.99	-70.03	4381	1/12/2019	1/3/2022

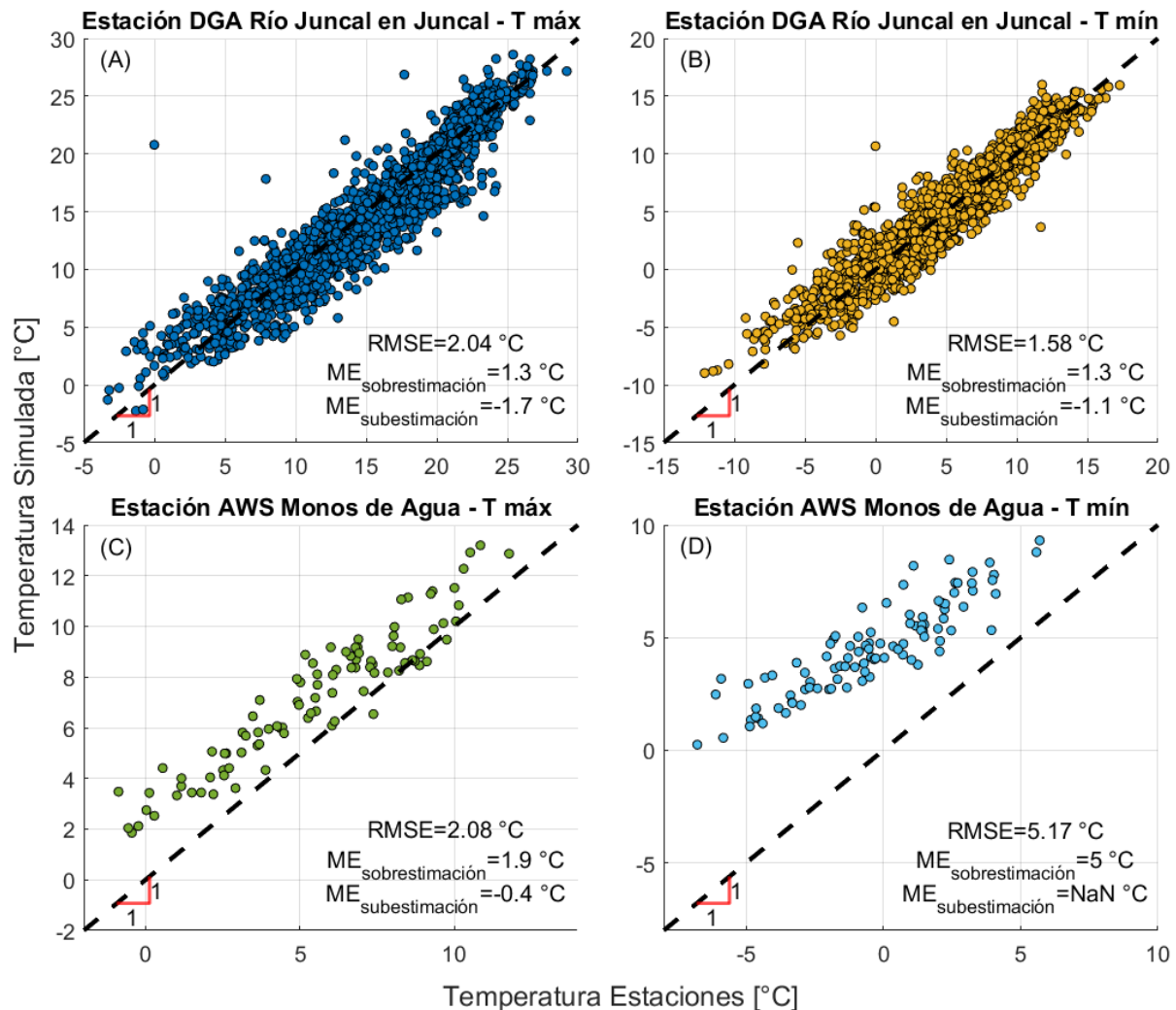


Figura 5. Comparación temperatura máxima y mínima diaria entre estaciones y producto grillado CR2MET. En (a) y (b) para temperatura máxima y mínima de la estación meteorológica en Río Juncal en Juncal respectivamente, y (c) y (d) para temperatura máxima y mínima de la estación AWS en el glaciar Monos de Agua. Las temperaturas del simuladas presentadas para Río Juncal en Juncal fueron corregidas del CR2MET, mientras que para la Estación AWS Monos de Agua corresponden a las temperaturas originales del CR2MET.

De la comparación presentada en la Figura 4, se aprecia que la temperatura simulada en la Estación Río Juncal en Juncal después de la corrección se posiciona cercano al observado con valores de dispersión del error de RMSE de 2.04 y 1.58 para temperatura máxima y mínima respectivamente

junto a ME negativos y positivos rondando valores absolutos contenidos entre 1.1 y 1.7, lo cual, da a entender que efectivamente, el producto del CR2MET en su estado original presenta sesgos negativos (subestimación) de la temperatura en dicha estación ubicada en la zona de valle/pre cordillera, lo cual, fue posible de subsanar mediante la aplicación de la corrección de temperatura mencionado anteriormente. Por otro lado, analizando la comparación de temperaturas de la estación AWS Monos de Agua (4381 [msnm]), se aprecia que el producto grillado presenta sobrestimaciones constantes y no aleatorias y de gran magnitud, presentando valores de $ME_{sobrestimación}$ de 1.9 y 5.0 [°C] para temperatura máxima y mínima respectivamente, mientras que para $ME_{subestimación}$ se llegan a valores nulos para ambos casos.

Extrapolando el análisis y combinándolo con la corrección a la temperatura realizado, es posible inferir que el producto grillado genera subestimaciones de la temperatura en las zonas más bajas de la cuenca (elevaciones entre 1100 y 3000 [msnm]), mientras que puede llegar a generar sobrestimaciones de mayor índole en las zonas de alta montaña (sobre 3000 [msnm]). Considerando la distribución de elevación de la cuenca de estudio, se puede esperar que este sesgo afecte de gran manera a las modelaciones glacio-hidrológicas aplicadas en la cuenca de análisis en caso de que utilicen estas forzantes meteorológicas. Se hace necesario un mayor análisis del producto grillado del CR2MET para determinar de mejor manera el impacto que puede tener en las modelaciones glacio-hidrológicas de la zona.

Del análisis realizado, se infiere que el modelo tiende a sobrestimar el aporte de tipo pluvial, posiblemente provocado por una sobrestimación de la temperatura máxima y mínima diaria del producto grillado del CR2MET en alta montaña, lo cual, afecta al criterio de clasificación de la precipitación caída entre precipitación sólida y líquida. Esto puede afectar de gran manera a los estudios de modelación glacio-hidrológica a aplicarse, y en particular para este estudio, provocó subestimaciones del derretimiento nivoglaciario en verano para el glaciar Juncal Norte, y posiblemente en toda la zona de alta montaña, y un adelantamiento del *peak* de escorrentía y sobrestimaciones importantes de caudal en otoño e invierno.

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El modelo entrega métricas de eficiencia elevadas en términos de simulación de cobertura nival y tasa de decrecimientos de hielo glaciar, pero obtiene métricas de eficiencia del modelo de escorrentía no tan elevadas ($KGE_{Q-CAL} = 0.67$ y $KGE_{Q-VAL} = 0.59$), generando series estacionales de caudal erróneas, con adelantamiento de *peaks* de escorrentía de 2 meses y sobrestimación del caudal en los meses de mayo, junio y julio. En función de un análisis comparativo de los resultados con estudios anteriores, se infiere que el modelo genera una sobrestimación del aporte pluvial, lo cual, puede estar provocado en gran medida por una sobrestimación importante de la temperatura extraída del producto grillado del CR2MET para las zonas de alta montaña. Este mayor aporte pluvial en las zonas de alta montaña puede también estar afectando al derretimiento nivoglaciario en las zonas de alta montaña, la cual, sumada a las subestimaciones presentes del producto grillado de precipitación caída del CR2MET, puede estar generando una subestimación del derretimiento nivoglaciario en alta montaña.

En conclusión, se obtiene una primera aproximación del derretimiento nivoglaciario distribuido considerando un largo periodo de estudio. Se puede concluir que la modelación entrega resultados

correctos, pero posiblemente por las razones incorrectas. A pesar de esto, y en función del análisis comparativo, se considera que los resultados de derretimiento distribuidos entregan una variabilidad espacial relativa correcta pero posiblemente subestimados por el mayor aporte pluvial modelado. Se hace necesario considerar mayores fuentes de información y de mejor calidad para el forzamiento del modelo y su calibración, para así, generar resultados más satisfactorios y de mayor calidad para el entendimiento del ciclo glacio-hidrológico de las cuencas andinas.

AGRADECIMIENTOS

El presente manuscrito se desarrolló en el marco de dos proyectos ANID: Proyecto ANID Anillo ACONCAGUA ACT210021 "Interactions between environmental compartments and their impact on the Andean ecohydrosphere under conditions of climate change (ACONCAGUA)." Y Fondecyt Iniciación 11220482 "Changes in snowmelt as a decisive issue for available water resources in Andean basins in central Chile". Por último, se agradece a Baqua Ingeniería Limitada por facilitar la asistencia a este congreso.

REFERENCIAS

- Alvarez-Garretón, C., Mendoza, P. A., Pablo Boisier, J., 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-Chile dataset. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(11), 5817–5846. <https://doi.org/10.5194/hess-22-5817-2018>
- Ayala, A., Farías-Barahona, D., Huss, M., Pellicciotti, F., McPhee, J., & Farinotti, D. (2020). Glacier runoff variations since 1955 in the Maipo River basin, in the semiarid Andes of central Chile. *Cryosphere*, 14(6), 2005–2027. <https://doi.org/10.5194/tc-14-2005-2020>
- Ayala, A., Pellicciotti, F., Peleg, N., & Burlando, P. (2017). Melt and surface sublimation across a glacier in a dry environment: Distributed energy-balance modelling of Juncal Norte Glacier, Chile. *Journal of Glaciology*, 63(241), 803–822. <https://doi.org/10.1017/jog.2017.46>
- Barcaza, G., Nussbaumer, S. U., Tapia, G., Valdés, J., García, J.-L., Videla, Y., Albornoz, A., & Arias, V. (2017). Glacier inventory and recent glacier variations in the Andes of Chile, South America. *Annals of Glaciology*, 58(75pt2), 166–180. <https://doi.org/10.1017/aog.2017.28>
- Cornwell, E., Molotch, N. P., & McPhee, J. (2016). Spatio-temporal variability of snow water equivalent in the extra-tropical Andes Cordillera from distributed energy balance modeling and remotely sensed snow cover. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(1), 411–430. <https://doi.org/10.5194/hess-20-411-2016>
- Dussaillant, I., Berthier, E., Brun, F., Masiokas, M., Hugonnet, R., Favier, V., Rabatel, A., Pitte, P., & Ruiz, L. (2019). Two decades of glacier mass loss along the Andes. *Nature Geoscience*, 12(10), 802–808. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0432-5>
- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., & Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377(1–2), 80–91. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003>
- Hall, D. K., & Riggs, G. A. (2021a). *MODIS/Aqua Snow Cover Daily L3 Global 500m SIN Grid, Version 61*. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MYD10A1.061>

- Hall, D. K., & Riggs, G. A. (2021b). *MODIS/Terra Snow Cover Daily L3 Global 500m SIN Grid, Version 61*. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD10A1.061>
- Masiokas, M. H., Rabatel, A., Rivera, A., Ruiz, L., Pitte, P., Ceballos, J. L., Barcaza, G., Soruco, A., Bown, F., Berthier, E., Dussaillant, I., & MacDonell, S. (2020). A Review of the Current State and Recent Changes of the Andean Cryosphere. *Frontiers in Earth Science*, 8. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00099>
- Masiokas, M. H., Villalba, R., Luckman, B. H., & Mauget, S. (2010). Intra-to multidecadal variations of snowpack and streamflow records in the andes of Chile and Argentina between 30° and 37°S. *Journal of Hydrometeorology*, 11(3), 822–831. <https://doi.org/10.1175/2010JHM1191.1>
- Mendoza, P. A., Rajagopalan, B., Clark, M. P., Cortés, G., & McPhee, J. (2014). A robust multimodel framework for ensemble seasonal hydroclimatic forecasts. *Water Resources Research*, 50(7), 6030–6052. <https://doi.org/10.1002/2014WR015426>
- Merz, R., Parajka, J., & Blöschl, G. (2011). Time stability of catchment model parameters: Implications for climate impact analyses. *Water Resources Research*, 47(2), 1–17. <https://doi.org/10.1029/2010WR009505>
- Migueles, R. (1994). *Síntesis de caudales diarios en cuencas pluvionivales*. Universidad Técnica Federico Santa María.
- Pellicciotti, F., Brock, B., Strasser, U., Burlando, P., Funk, M., & Corripio, J. (2005). An enhanced temperature-index glacier melt model including the shortwave radiation balance: Development and testing for Haut Glacier d'Arolla, Switzerland. *Journal of Glaciology*, 51(175), 573–587. <https://doi.org/10.3189/172756505781829124>
- Tarboton, D. G., & Luce, C. H. (1996). *Utah Energy Balance Snow Accumulation and Melt Model (UEB) Computer model technical description and users guide*. <http://www.engineering.usu.edu/dtarb/>