

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXV CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

EFFECTOS DE LA INCORPORACIÓN DE ESTACIONES METEOROLÓGICAS DE MONTAÑA EN LA REDUCCIÓN DE SESGOS EN PRODUCTOS GRILLADOS DE TEMPERATURA Y PRECIPITACIÓN

SALVADOR QUEZADA ¹
DIMITRI DIONIZIS ²
PAULA OJEDA ³
MIGUEL LAGOS ZÚÑIGA ⁴
SANTIAGO MONTSERRAT ⁵

RESUMEN

Las redes de estaciones meteorológicas públicas existentes en Chile central cuentan con escasos registros históricos en zonas sobre los 2000 m s.n.m., provocando gran incertidumbre respecto al comportamiento de variables tales como la precipitación y temperatura en ambientes de montaña. Sin embargo, existen redes de estaciones meteorológicas privadas, asociadas a industrias que operan en estos lugares, que pueden aportar información importante respecto a dichas variables. En este trabajo, se construyen forzantes meteorológicas grilladas basadas en gradientes altitudinales de precipitación y temperatura en la cuenca del río Mapocho en los Almendros (en torno a los -33°S) en el periodo 1980-2020, con una resolución temporal diaria y horizontal de 1 kilómetro. Se consideran distintas combinaciones de estaciones meteorológicas en el desarrollo de las forzantes, lo cual permite evaluar y cuantificar su influencia en los errores de dichas estimaciones. Los resultados muestran que, en general, la adición de tres estaciones de la red privada contribuye a mejorar el desempeño de las forzantes de temperatura y precipitación, alcanzando disminuciones en las medianas de los sesgos de hasta 3 °C y 20% respectivamente. Sin embargo, algunas combinaciones de estaciones tienden a aumentar los sesgos, lo cual podría deberse a condiciones meteorológicas locales que no logran ser representadas por la metodología empleada en el desarrollo de las forzantes, o bien, a mediciones deficientes o inadecuadas.

¹ Investigador, AMTC, FCFM, Universidad de Chile.-email: salvador.quezada@uchile.cl

² Investigador, AMTC, FCFM, Universidad de Chile.-email: dimitri.dionizis@uchile.cl

³ Investigadora, AMTC, FCFM, Universidad de Chile.-email: paula.ojeda@ug.uchile.cl

⁴ Investigador Asociado, AMTC. Profesional Docente, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile - email: mlagosz@uchile.cl

⁵ Investigador asociado, AMTC, FCFM, Universidad de Chile. -email: santiago.montserrat@amtc.uchile.cl

1. INTRODUCCIÓN

Las forzantes meteorológicas corresponden a variables físicas que representan las condiciones atmosféricas de un determinado lugar y momento (Salazar, 2017). Éstas, cumplen un papel fundamental en el desarrollo de estudios climáticos, hidrológicos y de amenazas naturales, como la ocurrencia de crecidas, aluviones y/o avalanchas. Las observaciones meteorológicas en superficie se utilizan frecuentemente para construir y validar forzantes distribuidas espacial y temporalmente. Para ello existen distintas metodologías que pueden incorporar diversas covariables en el espacio (e.g. Goovaerts, 2000; Baez-Villanueva et al.2020; DGA, 2017).

En la zona centro-sur de Chile, la red meteorológica pública de la Dirección General de Aguas (DGA) y la Dirección Meteorológica de Chile (DMC) cuenta con escasos registros históricos sobre los 2000 m s.n.m. En particular, para la cuenca del río Maipo, sólo un 5% de las estaciones con más de cinco años de registros se ubica sobre dicha cota, tanto para el caso de la precipitación como para el de la temperatura. Ésto dificulta los estudios meteorológicos en sectores de montaña. Sin embargo, compañías de la industria minera, algunos centros de ski y centrales hidroeléctricas, cuentan con sus propias redes de monitoreo meteorológico privadas, cuya información puede servir para desarrollar forzantes más robustas y representativas de estos ambientes.

En la actualidad se cuenta con complejos sistemas de observación satelital para la precipitación en todo el planeta (GPM, Hou et al., 2014), así como reanálisis climáticos de resolución horizontal creciente (e.g. ERA5, Hersbach et al., 2020) que, en conjunto con atributos topográficos, han permitido el desarrollo de diversos productos meteorológicos con información de superficie. El primero desarrollado en Chile, y para todo el territorio nacional, es CR2MET (DGA, 2017) y más recientemente el producto RF-MEP (Baez-Villanueva et al., 2020), ambos con resolución horizontal aproximada de 5 kilómetros. Pese a lo anterior, la cuantificación de la incertidumbre en zonas sin observaciones en superficie presenta un desafío, especialmente en zonas de montaña donde no se cuenta con pluviómetros que puedan medir adecuadamente la precipitación sólida.

El objetivo de este trabajo consiste en estudiar y cuantificar sesgos en las estimaciones de forzantes meteorológicas grilladas de precipitación y temperatura, con una resolución temporal diaria y horizontal de 1 kilómetro, al considerar o no estaciones meteorológicas de una red privada de montaña en su construcción.

2. ZONA DE ESTUDIO

El estudio se desarrolla en Chile central, entre los 32.5° y 34° de latitud sur, desde la depresión intermedia hasta la cordillera de los Andes. Así, la zona de estudio abarca parte de la región de Valparaíso y la región Metropolitana, con particular énfasis en la cuenca del río Mapocho en Los Almendros (Figura 1).

Dentro de la zona de estudio se ubican estaciones meteorológicas pertenecientes a la red pública DGA-DMC, así como también a la red privada de Anglo American (AA). Éstas presentan registros de temperatura y precipitación en distintas ventanas temporales, encontrando los registros más completos en la primera red mencionada. Además, destaca que, para la red pública, las estaciones se distribuyen en toda el área de estudio, concentrándose dentro de la ciudad de Santiago, mientras que todas las estaciones de la red privada se encuentran dentro de la cuenca Mapocho en Los Almendros. La ubicación específica, altitud y el periodo con registros disponibles de las estaciones se presenta en la Tabla 1.

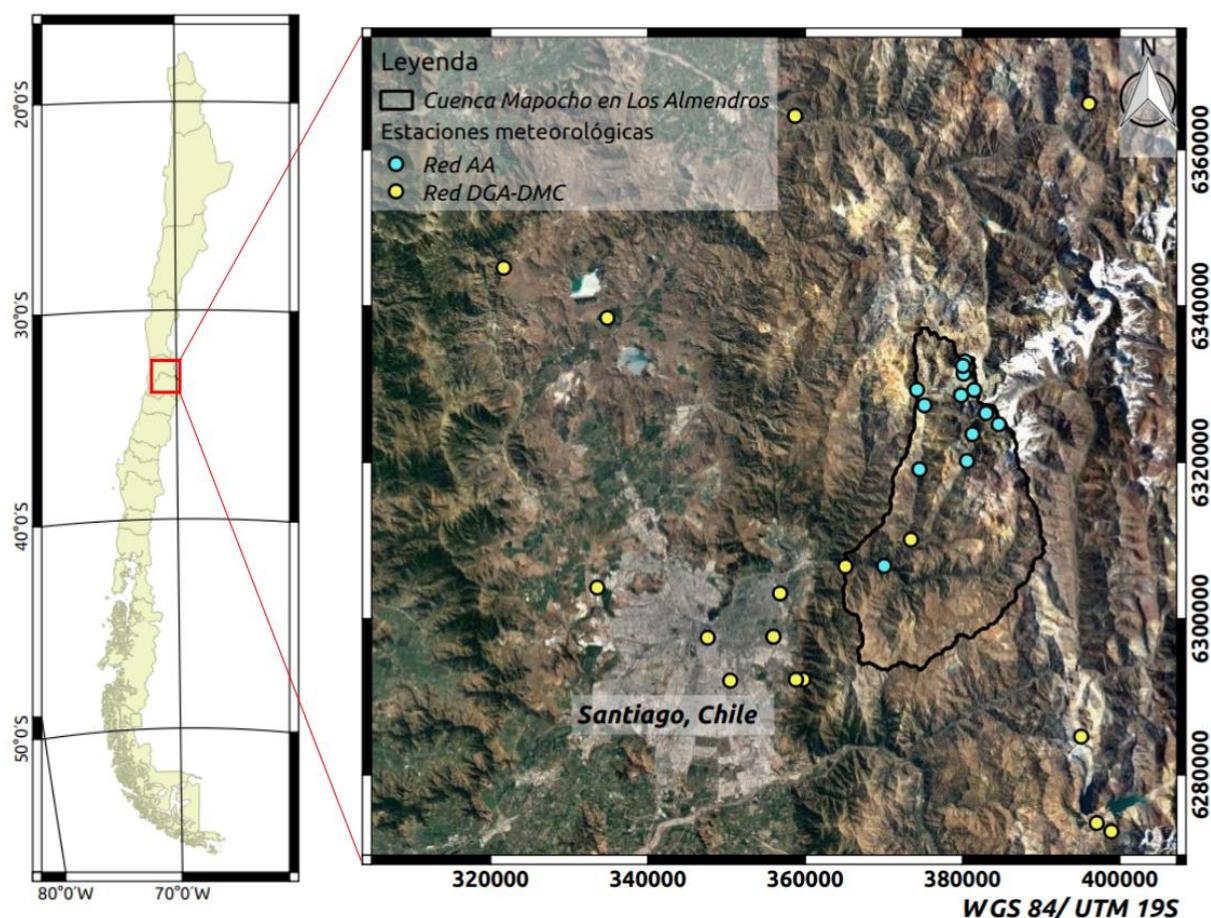


Figura 1. Mapa de la zona de estudio, donde se destaca la cuenca Mapocho en Los Almendros.

Tabla 1. Estaciones meteorológicas consideradas en el estudio.

Estación	Administra	Latitud	Longitud	Cota	Registros disponibles
Portillo (PT)	DGA	-32.84	-70.11	3000	2004-2020
Río Aconcagua En Chacabuquito (AC)	DGA	-32.85	-70.51	950	2000-2020
Rungue Embalse (RE)	DGA	-33.02	-70.91	700	1943-2020
Huechun Andina (HA)	DGA	-33.08	-70.77	590	1994-2020
La Ermita Central En Bocatoma (ECB)	DGA	-33.34	-70.36	1350	1987-2011
Mapocho En Los Almendros (MLA)	DGA	-33.37	-70.45	966	1999-2020
Campus San Joaquín UC (SJUC)	DGA	-33.50	-70.61	570	1977-1983
Quebrada De Macul (QM)	DGA	-33.50	-70.51	950	2003-2020
Glaciar Echaurren (GE)	DGA	-33.57	-70.13	3850	1999-2002
Laguna Negra (LN)	DGA	-33.67	-70.11	2780	2015-2016
El Yeso Embalse (YE)	DGA	-33.68	-70.09	2475	1962-2020
Quinta Normal Santiago (QN)	DMC	-33.39	-70.79	482	1950-2020
Pudahuel Santiago (PS)	DMC	-33.45	-70.55	650	1966-2020
Cerro Calán (CC)	DGA	-33.40	-70.54	848	1975-2020
Terraza Oficinas Centrales DGA (TDG)	DGA	-33.45	-70.64	560	1960-2020
Antupirén (ANT)	DGA	-33.50	-70.52	904	1979-2020
Eulogio Sánchez Tobalaba (EST)	DMC	-33.45	-70.55	650	1954-2020
Aguada de Los Machos (ALM)	AA	-33.174	-70.289	3941	2008-2012
Los Bronces (LB)	AA	-33.149	-70.285	3429	1980-2020
Donoso Claro (DC)	AA	-33.135	-70.283	3910	2008-2012
Donoso (DN)	AA	-33.14	-70.286	3531	2002-2015
Infiernillo (INF)	AA	-33.168	-70.271	4046	2008-2012
La Ermita (LE)	AA	-33.37	-70.397	1152	2008-2015
La Viña (LV)	AA	-33.167	-70.349	3371	2006-2008
La Lata (LL)	AA	-33.25	-70.282	2833	2015-2019
La Paloma (LP)	AA	-33.195	-70.255	4090	2015-2019

Piedra Carvajal (PCS)	AA	-33.219	-70.274	3255	2015-2019
Sulfatos (SUL)	AA	-33.208	-70.238	4290	2015-2019
Paso Marchant (PM)	AA	-33.259	-70.347	2103	2006-2012
Pérez Caldera (PC)	AA	-33.185	-70.339	2685	2006-2012

La distribución altitudinal de las estaciones meteorológicas consideradas se ilustra en la Figura 3, donde se agrupan según la red a la que pertenecen. Se observa que la mayoría de las estaciones de la red DGA-DMC se ubican bajo la cota 1000 m s.n.m., mientras que para la red AA, todas las estaciones están sobre dicha cota, y la mayoría sobre los 3000 m s.n.m., siendo una red esencialmente de montaña.

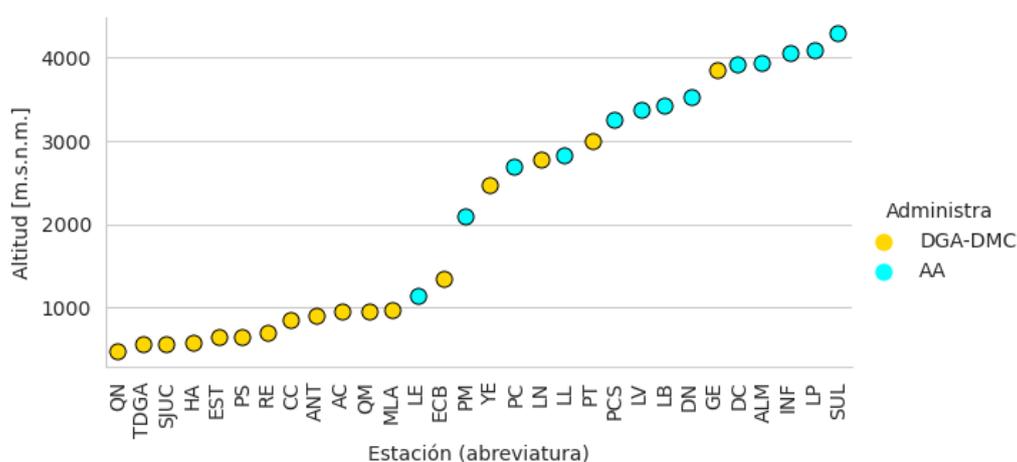


Figura 3. Distribución altitudinal de las estaciones meteorológicas consideradas en el estudio.

3. METODOLOGÍA

Para el estudio, se desarrollan forzantes meteorológicas grilladas basadas en el comportamiento de la estructura vertical de las temperaturas (Wallace and Hobbs, 2006), así como en la influencia de la cordillera de los Andes en incrementar los montos de precipitaciones producto del ascenso orográfico (e.g., Barrett et al., 2009; Viale and Garreaud, 2015; Viale et al., 2019).

El proceso de construcción se resume en el esquema de la Figura 2. En primer lugar, se seleccionan estaciones para cada una de las variables de interés, basándose en su ubicación espacial, así como en el periodo y la coherencia temporal de sus registros. Esto se realiza verificando la correlación temporal por variable en cada estación en un vecindario de hasta 100 km de distancia. Ésto debido a que existe influencia de la cordillera de la costa y patrones climáticos de gran escala que, al interactuar con la topografía, pueden generar gradientes horizontales de precipitación (e.g., Garreaud et al., 2016 en Nahuelbuta y Scaff et al. 2017, en el Elqui). Para aquellas estaciones cercanas a la zona de estudio, con la mayor correlación temporal, se procede a calcular gradientes altitudinales, los cuales se aplican a los valores de un modelo de elevación digital (ASF DAAC, 2011), para así obtener forzantes grilladas a una resolución temporal diaria.

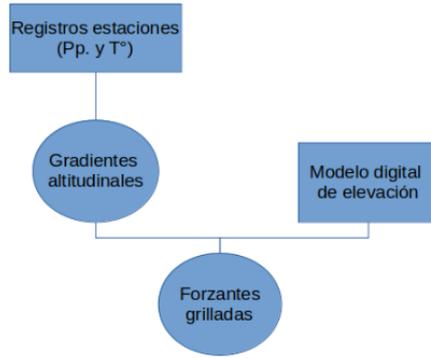


Figura 2. Esquema de la metodología empleada en la construcción de las forzantes meteorológicas grilladas.

En el caso de la temperatura, para cada día d dentro del periodo de tiempo determinado (1980-2020), se calculan los gradientes altitudinales mediante un ajuste lineal simple, obteniéndose el valor de la pendiente m_d y del coeficiente de posición c_d . Luego, en cada posición $\{i, j\}$ de la grilla y para cada día se calcula la temperatura $T_{\{i,j\},d}$ considerando la elevación asociada a $\{i, j\}$ según el modelo de elevación digital (ecuación 1). Los valores de R^2 menores a 0.8 en el ajuste lineal son filtrados y calculados como una interpolación entre el día anterior y posterior con R^2 mayor a dicho valor.

$$T_{\{i,j\},d} = m_d \cdot z_{\{i,j\}} + c_d \quad (1)$$

Por su parte, para la precipitación se obtiene el mejor ajuste de los registros con respecto a la elevación en función del logaritmo de esta última variable. La obtención de gradientes se realiza a partir de las precipitaciones mensuales acumuladas. Así, se reduce la incertidumbre asociada a la variabilidad en los tiempos de manifestación que puede presentar un evento de tormenta estratiforme el cual puede durar varios días (e.g. Garreaud, 2013).

Para obtener series diarias de precipitación, se ponderan las precipitaciones mensuales obtenidas por un factor ($\rho_{d,m}$), calculado como el peso de la precipitación diaria total (Pr_d) respecto a la mensual acumulada ($\sum_d Pr_{d,m}$), considerando los registros de Cerro Calán como estación base, dada su completitud de datos en el periodo de estudio y su ubicación cercana a la cuenca del río Mapocho en Los Almendros .

$$\rho_{d,m} = \frac{Pr_d}{\sum_d Pr_{d,m}} \quad (3)$$

Por último, las precipitaciones diarias en un pixel $\{i, j\}$, para el día d queda expresada de la siguiente manera:

$$Pr_{\{i,j\},d} = \rho_{d,m} [m \mid m \log(z_{\{i,j\}}) + c_m] \quad (4)$$

Donde $Pr_{\{i,j\},d}$ es la precipitación en la posición $\{i, j\}$ para el día d , $Pr_{\{i,j\},m}$ es la precipitación en la posición $\{i, j\}$ para el mes m , m_m es la pendiente de la regresión mensual, $z_{\{i,j\}}$ es la altitud del modelo de elevación digital en el pixel $\{i, j\}$ y c_m es el coeficiente de posición de la regresión lineal para el mes m .

El periodo considerado en la construcción de las grillas de temperatura y precipitación fue de cuarenta años, entre 1980 y 2020. El modelo de elevación digital utilizado tiene una resolución espacial de 1 kilómetro, y fue generado agregando los valores del modelo de elevación digital del proyecto ALOS Palsar (ASF DAAC, 2011), con resolución de 12.5 metros.

La evaluación de la variación de los sesgos de las forzantes meteorológicas se realiza considerando un caso base (en el cual sólo se consideran estaciones de la red pública DGA-DMC) y agregando distintas combinaciones de estaciones de la red privada AA, para el cálculo de los gradientes de temperatura y precipitación. Con esto, para cada variable se elaboran tantas forzantes grilladas como número de combinaciones ordinarias se pueden formar a partir de las estaciones de la red AA, más el caso base. Posteriormente, se calculan distintas métricas para ambas variables al evaluarlas según los registros de distintas estaciones de montaña, a modo de validación cruzada.

4. RESULTADOS

Las grillas de precipitación anual promedio y de temperatura media anual obtenidas para el caso base en el periodo 1980-2020 se presentan en la Figura 4, junto con un panel donde se expone el modelo de elevación digital considerado. Se observa congruencia entre los resultados de las forzantes y las elevaciones, presentándose condiciones más frías y mayores precipitaciones a mayores altitudes.

Para el caso de la temperatura, un 15% de los días dentro del periodo de estudio tiene gradientes con valores de R^2 inferiores a 0.8, con un máximo de 11 días consecutivos bajo dicha condición.

En la Tabla 2 y Tabla 3 se presentan métricas para la evaluación de las forzantes de precipitación y temperatura del caso base, según los registros usados en la calibración, correspondientes a estaciones de la red DGA-DMC. En el caso de la precipitación, los registros con sesgos más importantes son EST y PS, con valores porcentuales entre 20% y 25%. Por su parte, el resto de las estaciones presenta sesgos porcentuales menores al 13% y valores de NSE superiores a 0.5.

Con respecto a la representación de la temperatura, en todas las estaciones consideradas en la calibración los valores del coeficiente de determinación R^2 entre la serie observada y simulada son superiores a 0.9, los errores medios absolutos son menores que 1 °C y los valores de NSE son superiores a 0.9.

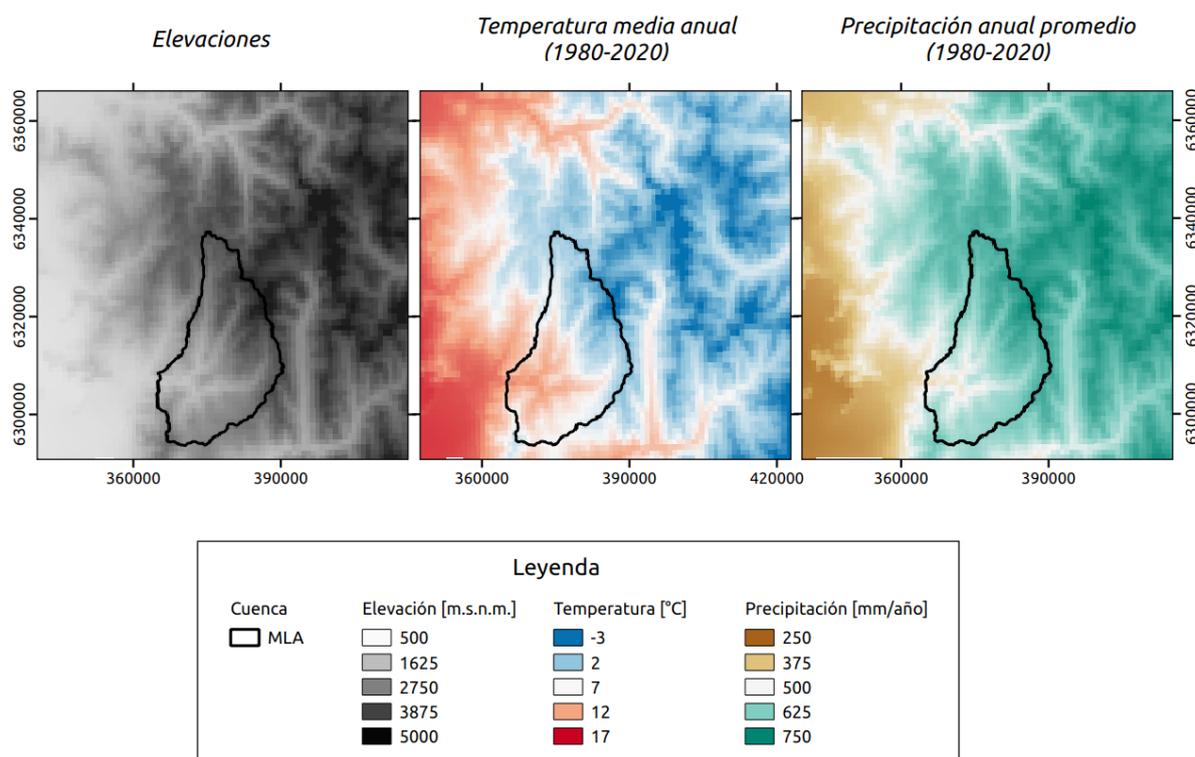


Figura 4. Modelo de elevación digital y resultados de precipitación y temperatura medias anuales para el caso base.

Tabla 2. Métricas de evaluación de la calibración de la forzante de precipitación para el caso base.

Métrica	Estación							
	ECB	MLA	CC	TDGA	ANT	QN	PS	EST
R ²	0.76	0.85	0.89	0.95	0.83	0.68	0.67	0.56
Sesgo porcentual (%)	12.43	9.28	3.27	2.98	11.18	3.14	22.24	24.62
NSE	0.66	0.79	0.88	0.95	0.80	0.58	0.35	0.22

Tabla 3. Métricas de evaluación de la calibración de la forzante de temperatura para el caso base.

Métricas	Estación											
	PT	AC	RE	HA	ECB	MLA	SJUC	QM	GE	LN	YE	QN
R ²	0.98	0.95	0.97	0.96	0.93	0.94	0.97	0.92	0.94	0.98	0.97	0.97
Error Medio	0.47	-0.80	-0.41	-0.32	0.05	-0.24	-0.84	-0.18	0.97	0.61	-0.36	0.85
NSE	0.98	0.93	0.96	0.96	0.91	0.94	0.94	0.92	0.91	0.97	0.97	0.94

Para la evaluación de sesgos considerando la red AA, los registros de estas estaciones fueron evaluados y filtrados a partir de su coherencia temporal, basándose en el coeficiente de determinación con respecto a todas las estaciones DGA-DMC seleccionadas, así como filtrando potenciales valores anómalos. Además, dada la distribución temporal de dichos registros, para este ejercicio se consideró el periodo comprendido entre 2006 y 2012, que es donde existe una mayor cantidad de estaciones que presentan datos concurrentes.

4.1. Análisis en series de precipitación

La Figura 5 muestra los porcentajes de sesgo de precipitación evaluados a nivel mensual en tres estaciones de la red AA, que fueron seleccionadas en base a la extensión, calidad y completitud de sus registros. Los porcentajes de sesgo fueron calculados para un caso base, donde no se considera ninguna estación de la red AA en la obtención de los gradientes ("0" en el eje x), y para casos donde se agregan al caso base las distintas combinaciones ordinarias posibles que se pueden realizar con las estaciones seleccionadas, omitiendo la estación evaluada.

Cabe destacar que los sesgos son evaluados a nivel mensual dado que para la estación LB sólo se dispone de su serie de precipitación en esta escala. Recordar, además, que la metodología de obtención de los gradientes también se realiza a nivel mensual para eliminar el efecto de la variabilidad en los tiempos de manifestación de un evento de tormenta.

Para el caso base, la evaluación de la precipitación en PM presenta el mayor sesgo porcentual (123%), al incluir la estación LE en la obtención de los gradientes existe una disminución de 14 puntos porcentuales, y al incluir LE y LB sólo disminuye en 4 puntos porcentuales. Al evaluar en la estación LE se tiene que para el caso base el sesgo porcentual es de 27%, y que el desempeño tiende a mejorar en todos los casos donde se agregan estaciones AA en el cálculo de gradientes, obteniéndose el mejor desempeño cuando se incluye PM, con un sesgo porcentual de -4%. Por su parte, la evaluación con respecto a los registros de LB, muestran el mejor desempeño en el caso base (-4%), y en los casos donde se consideran estaciones AA, tiende a empeorar alcanzando sesgos porcentuales de -20% para los casos donde se considera sólo PM y la combinación de ésta con LE.

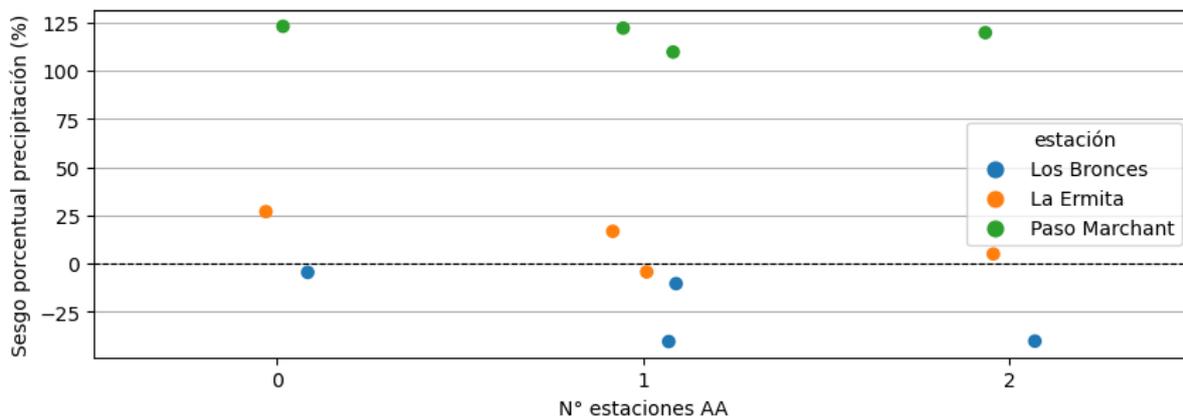


Figura 5. Sesgos porcentuales de precipitación para forzantes meteorológicas evaluadas en las estaciones Los Bronces (LB), La Ermita (LE) y Paso Marchant (PM), y construidas basados en gradientes altitudinales según los registros de estaciones de la red DGA-DMC y las distintas combinaciones posibles de las estaciones de la red AA mencionadas sin considerar la evaluada.

4.2. Análisis en series de temperatura

En la Figura 6 se presentan los errores medios de temperatura evaluados en las ocho estaciones de la red AA consideradas según el análisis de consistencia. Éstos fueron calculados para distintos casos, considerando las distintas combinaciones posibles a partir de un determinado número de estaciones AA (eje x), a modo de validación cruzada, es decir, sin considerar la estación evaluada. De esta forma, se tiene que el “0” del eje x corresponde al caso base donde solo se incluyen las estaciones DGA-DMC y el “1” corresponde a los casos donde se suma al caso base una estación distinta a la evaluada, por lo que la dispersión de cada caja viene dada por siete casos.

Las estaciones INF (4046 m s.n.m.) y DC (3910 m s.n.m.), son las de mayor altitud y las que para el caso base presentan los mayores errores medios de temperatura, pero también son las que presentan las disminuciones más importantes de dichos errores a medida que se incorporan estaciones de la red privada en la obtención de gradientes, logrando disminuciones de 3.1 y 3.3 °C respectivamente, entre el caso base y el que considera siete estaciones AA.

En el caso de la estación LB (3429 m s.n.m.), para el caso base el error medio es de 2 °C. Al agregar tres estaciones, la mediana del error medio de las distintas combinaciones dado ese número de estaciones es de 0.9 °C, y en el caso de considerar las siete estaciones restantes el error medio es de 0.3 °C.

Las estaciones PM y PC presentan errores medios negativos en el caso base, y la mediana de dichos errores tiende a disminuir a medida que se incorporan estaciones AA, siendo excepcionales los casos donde el desempeño mejora respecto al caso base.

Al considerar los extremos de los gráficos de caja, se observa que existe gran variabilidad en algunos casos. Hay combinaciones de estaciones que, al utilizarse en el cálculo de los gradientes y evaluarse en determinadas estaciones, generan errores medios considerablemente menores a la mediana de los errores medios resultantes de las combinaciones que consideran un mismo número de estaciones AA. En el otro extremo, existen combinaciones de estaciones que provocan aumentos importantes en el sesgo para las distintas estaciones evaluadas. Éstos podrían ser explicados por la existencia de registros de baja calidad en algunas de las estaciones, o bien, por condiciones meteorológicas propias de las zonas donde éstas se emplazan. Las estaciones INF y DC son las que presentan mayor variabilidad, mientras que LE y PM son las que presentan menor.

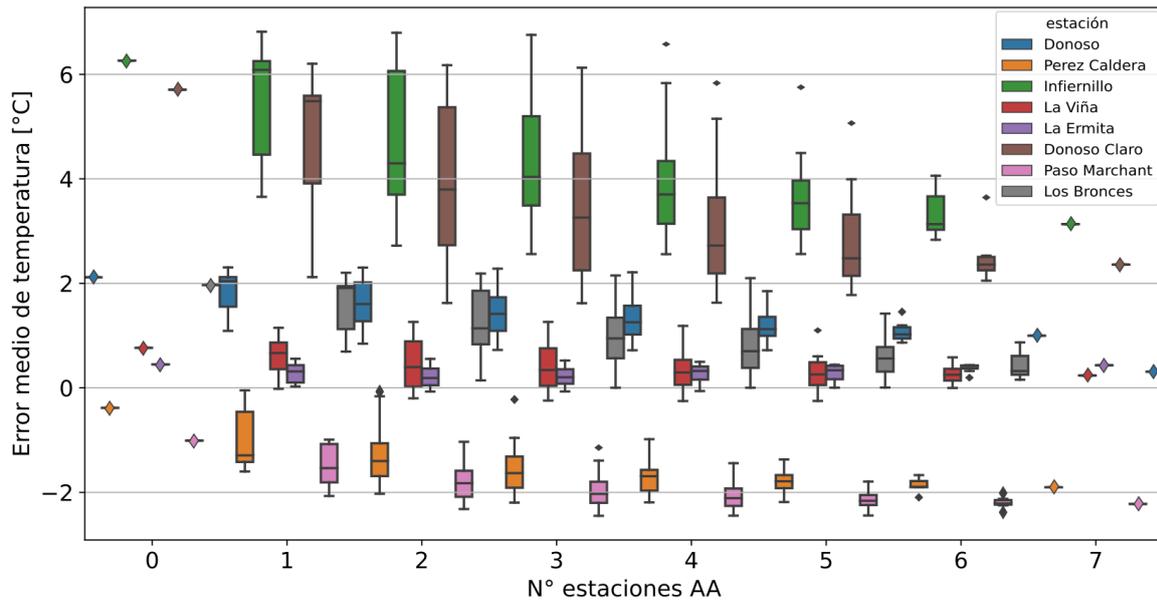


Figura 6. Errores medios de temperatura evaluadas en , construido a partir de estaciones de la red DGA-DMC y distintas combinaciones de estaciones de la red AA (incluyendo las mencionadas).

5. DISCUSIÓN

En general, los errores medios de las forzantes de temperatura, evaluadas en estaciones de montaña, presentan una tendencia a la disminución al incluir registros de la red privada de estaciones meteorológicas en el cálculo de gradientes. Además, los errores de esta variable en el caso base, son más grandes cuando se evalúa en estaciones que se ubican a mayores elevaciones. Donde, además, se registran disminuciones de mayor magnitud en los casos donde se agregan estaciones de la red AA, así como también, mayor dispersión entre los distintos casos.

Por otro lado, en el caso de la precipitación, dada la disponibilidad de información y la consistencia de los datos registrados, fueron menos las estaciones consideradas en el análisis. A pesar de esto, igual existe una tendencia a la disminución de los sesgos, evaluados según los registros de LE y PM, en todos los casos donde se agregan combinaciones de estaciones de la red privada. En el caso de PM, a pesar que sus registros de precipitación contribuyen a mejorar el desempeño de la forzante evaluada en LE, sus registros presentan sesgos porcentuales superiores al 100% en todos los casos, lo cual indica que éstos no logran ser representados por la metodología empleada, ya sea por una particularidad local o debido a deficiencias en sus registros. Para el caso de evaluar con respecto a los registros de LB, todas las combinaciones que incluyen estaciones AA generan forzantes con desempeños más bajos que el caso base. En este punto, se debe poner atención en la calidad de los registros y en la correlación que existe entre las estaciones consideradas, ya que pueden existir conjuntos de estaciones que se favorecen, y que si se combinan con otras donde las correlaciones son pobres, generan casos con desempeños más bajos. De todas formas, para tener resultados contundentes se requieren más registros, y en particular, equipos adecuados para la medición de precipitación sólida en sectores de montaña, donde la componente nival es considerable.

En el sentido anterior, los sesgos porcentuales en precipitación simulada para el caso base, en dos estaciones tienen valores entre 20 y 25% y en el resto de ellas valores menores a 13%. En todos los casos los sesgos están dentro del rango de error en la captación de precipitación por la influencia del viento (Dingman, 2015), considerando que, en nuestro conocimiento, todas las estaciones analizadas no presentan pantalla protectora. De este modo, este modelo simplificado con un único predictor, se presenta como una herramienta ágil de construir y de bajo consumo computacional con sesgos comparables a modelos multivariados más complejos construidos para el territorio nacional como CR2MET (DGA, 2017) y RF-MEP (Baez-Villanueva et al, 2020).

La metodología empleada para la construcción de las forzantes sólo depende de los gradientes altitudinales, y no considera variaciones meteorológicas locales, ni asociadas a variaciones latitudinales y/o longitudinales. Esto parece funcionar a la escala y en la zona que se está considerando, pero se debe tener en cuenta, particularmente en áreas de montaña, que existen otros factores involucrados que pueden generar diferencias locales de consideración, sobre todo para la precipitación. En este caso, es normal que aumente el sesgo al incluir ciertas estaciones, lo cual no necesariamente quiere decir que los registros sean erróneos, si no que la distribución espacial es más compleja que lo que reproduce el modelo, producto de fenómenos de meso-escala como la inversión térmica y el bloqueo orográfico reportados en el estudio de Lagos et al., (2021).

6. CONCLUSIONES

La inclusión de registros de la red privada de estaciones meteorológicas de AA, tiende a mejorar el desempeño de las forzantes meteorológicas de temperatura y precipitación en el sector cordillerano de la zona central de Chile. Para el caso de la temperatura, se registran disminuciones en la mediana de los errores medios de hasta 3 °C al considerar tres estaciones de la red AA, y de hasta 3.3 °C al considerar seis, con respecto a considerar solamente las estaciones de la red pública DGA-DMC.

Por su parte, para la precipitación, cuando se evalúa en las estaciones PM y LE se registran mejores desempeños en todos los casos donde se incluyen estaciones AA, alcanzando disminuciones de hasta un 22 puntos porcentuales entre el caso de no considerar las estaciones de la red privada y el caso de considerar dos, al evaluar en la estación “La Ermita”. Sin embargo, al evaluar en “Los Bronces”, el desempeño empeora en todos los casos donde se agregan estaciones al caso base.

Si bien es esperable que la incorporación de nueva información contribuya a mejorar el desempeño de los modelos, este trabajo demuestra que no siempre es así y depende fuertemente de la metodología empleada, así como de cuál es la información que se está agregando y sobre cuál estamos evaluando. De este modo, existen forzantes que al evaluarlas en estaciones de altura presentan desempeños más bajos, aún cuando se agregan nuevos registros de altitud.

Así como existe esta red privada de estaciones, a lo largo de la cordillera existen otras, que pueden contribuir de manera significativa a representar de mejor manera las distintas variables meteorológicas en zonas de montaña, y en particular, a mejorar el desempeño de las forzantes meteorológicas y los resultados de sus aplicaciones. La disponibilidad de este tipo de información puede contribuir significativamente al desarrollo científico en zonas de montaña y aportar en la toma de decisiones en temas de interés nacional, tales como la gestión de los recursos hídricos y la planificación frente a amenazas naturales.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el financiamiento entregado por el “Proyecto ANID-PIA AFB180004”, y a Anglo American Sur por contribuir con los registros de sus estaciones para la elaboración de este trabajo.

REFERENCIAS

ASF DAAC (2011). Dataset: AP_27387_FBS_F4290_RT1; Includes Material ©JAXA/METI 2011. Accessed through ASF DAAC: Alaska Satellite Facility - Distributed Active Archive Center 9 Sept 2018. DOI: <https://doi.org/10.5067/Z97HFCNKR6VA>

Baez-Villanueva, O. M., Zambrano-Bigiarini, M., Beck, H. E., McNamara, I., Ribbe, L., Nauditt, A., ... & Tinh, N. X. (2020). RF-MEP: A novel Random Forest method for merging gridded precipitation products and ground-based measurements. *Remote Sensing of Environment*, 239, 111606.

Barrett, B. S., Garreaud, R., & Falvey, M. (2009). Effect of the Andes Cordillera on precipitation from a midlatitude cold front. *Monthly Weather Review*, 137(9), 3092-3109.

DeWalle D.R. and Rango A. (2008). *Principles of snow hydrology*. Cambridge University Press. 410pp.

DGA (2017), Actualización del Balance Hídrico Nacional, SIT N° 417, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile, Realizado por: Universidad de Chile & Pontificia Universidad Católica de Chile.

Dingman, S. L. (2015). *Physical hydrology*. Waveland press.

Garreaud, R. (2013). Warm winter storms in Central Chile. *Journal of Hydrometeorology*, 14(5), 1515-1534.

Garreaud, R., Falvey, M., & Montecinos, A. (2016). Orographic precipitation in coastal southern Chile: Mean distribution, temporal variability, and linear contribution. *Journal of Hydrometeorology*, 17(4), 1185-1202.

Goovaerts, P., 2000. Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall. *J. Hydrol.* 228, 113–129.

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., et al. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999-2049.

Hou, A. Y., Kakar, R. K., Neeck, S., Azarbarzin, A. A., Kummerow, C. D., Kojima, M., Oki R., Nakamura K., Iguchi T. (2014). The global precipitation measurement mission. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 95(5), 701-722.

Lagos-Zúñiga, M., Rondanelli R., y Garreaud, R. 2021. Procesos meteorológicos en eventos de precipitación y simplificaciones en ingeniería. Buscando el equilibrio entre la física y la

práctica. Rutas Hidrológicas: Recordando a un colega por los senderos de la hidrología. Disponible en <https://libros.uchile.cl/1185>.

Salazar, A., 2007. Determinación de una metodología para la predicción de forzantes meteorológicas a escala local en un clima no estacionario. Aplicación a cuencas de Chile Central. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile.

Scaff, L., Rutllant, J. A., Rahn, D., Gascoin, S., & Rondanelli, R. (2017). Meteorological interpretation of orographic precipitation gradients along an Andes west slope basin at 30 S (Elqui Valley, Chile). *Journal of Hydrometeorology*, 18(3), 713-727.

Viale, M., and Garreaud, R. (2015). Orographic effects of the subtropical and extratropical Andes on upwind precipitating clouds. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120(10), 4962-4974.

Viale, M., Bianchi, E., Cara, L., Ruiz, L. E., Villalba, R., Pitte, P., ... & Zalazar, L. (2019). Contrasting climates at both sides of the Andes in Argentina and Chile. *Frontiers in Environmental Science*, 7, 69.

Wallace, J. M., & Hobbs, P. V. (2006). *Atmospheric science: an introductory survey* (Vol. 92). Elsevier.