

**SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**  
**XXVI CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**

**EVALUACIÓN DE SIMULACIONES DE PRECIPITACIÓN WRF-SAAG EN  
CHILE CONTINENTAL**

**SOFÍA SEGOVIA ESCAFI<sup>1</sup>**  
**PABLO MENDOZA<sup>2,3</sup>**  
**MIGUEL LAGOS ZÚÑIGA<sup>3,4</sup>**  
**LUCÍA SCAFF<sup>5</sup>**

**RESUMEN**

El presente trabajo evalúa la calidad de las simulaciones de precipitación generadas por un modelo atmosférico de alta resolución forzado por el reanálisis ERA-5, en Chile continental entre 2001 y 2020. Se evalúan montos anuales, trimestrales y diarios utilizando estaciones de la Dirección General de Aguas (DGA) y Dirección Meteorológica de Chile (DMC), comparando el ajuste lineal, el índice de eficiencia modificada de Kling-Gupta ( $KGE'$ ) y sus componentes. Además, se evalúan índices categóricos derivados de tablas de contingencia para evaluar la habilidad predictiva de las simulaciones. Los resultados indican que el modelo es adecuado para las macrozonas de Chile Central y Sur, donde a escalas diarias, trimestrales y anuales se obtiene un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) entre 0,69 y 0,85 y  $KGE' > 0,53$  para el 75% de las estaciones. Por otro lado, de las métricas categóricas se concluye que el modelo de precipitación logra replicar los periodos secos (la no ocurrencia de precipitación), pero presentan deficiencias para simular eventos sobre ciertos umbrales. Los mejores ajustes lineales se presentan en aquellas agregaciones con mayores montos de precipitación, generalmente en los meses de invierno, mientras que la calidad de las simulaciones decae para meses con menores montos de precipitación (i.e., verano austral), a excepción de la macrozona Extremo Norte. Se espera que este diagnóstico sea beneficioso para el uso de esta simulación en diversas aplicaciones científicas y/o productivas.

---

<sup>1</sup> Estudiante Magíster en Ciencias de la Ingeniería, mención Recursos y Medio Ambiente Hídrico, Universidad de Chile.

<sup>2</sup> Profesor Asociado del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile.

<sup>3</sup> Investigador Asociado del Advanced Mining Technology Center, Universidad de Chile.

<sup>4</sup> Tesista doctoral Center for Climate and Resilience Research

<sup>5</sup> Profesora Asistente, Departamento de Geofísica, Universidad de Concepción.

## **1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVO**

La precipitación es una de las componentes principales del ciclo hidrológico, por lo que es importante tener registros confiables para una mejor gestión del recurso hídrico. Sin embargo, la distribución espacial de estaciones pluviométricas y la calidad de sus registros es insuficiente para representar la variabilidad espacial de la precipitación en Chile, existiendo importantes vacíos en zonas extremas del país (DGA, 2017). Por lo tanto, el uso de productos grillados derivados de modelos estadísticos, dinámicos y/o satélites presenta una oportunidad para mejoras en aplicaciones hidrológicas. No obstante, es crítico que el uso de estas fuentes de datos esté sujeto a sus beneficios y que sus limitaciones sean diagnosticadas, por ello es que se requiere su evaluación para posterior uso (Schumacher et al., 2020).

Con el fin de potenciar herramientas para estudios hidrológicos, el grupo South America Affinity Group (SAAG), liderado por el National Center for Atmospheric Research (NCAR, USA) generó simulaciones meteorológicas que resuelven explícitamente la convección atmosférica, mediante el uso del modelo Weather Research and Forecasting (WRF; Skamarock et al., 2008), forzado por el Reanálisis Atmosférico Europeo (ERA-5 por sus siglas en inglés; Hersbach et al., 2020) con resolución horizontal de 4 km para Sudamérica entre 2000 y 2021; en adelante WRF-SAAG (Dominguez et al., 2023). La alta resolución espacial horizontal de estas simulaciones ofrece nuevas oportunidades para caracterizar la meteorología en Chile continental, por lo que se hace necesaria una evaluación y diagnóstico previos. Por ello, se define como objetivo de investigación evaluar la capacidad de las simulaciones de WRF-SAAG para reproducir patrones espaciales y temporales de precipitación a lo largo de Chile continental, analizando la calidad de variabilidad espacial de las simulaciones en cada macrozona del país para distintas agregaciones temporales y evaluando la habilidad de las simulaciones para replicar eventos de precipitación.

## **2. DATOS Y METODOLOGÍA**

### **2.1 Área de estudio**

El área de estudio corresponde a Chile continental (Figura 1), que se extiende entre los 17°29'S y 55°58'S (más de 4200 km), desde la costa del océano Pacífico hasta la cordillera de los Andes, con un ancho máximo y mínimo de 445 y 90 km, respectivamente. A lo largo de este dominio se distinguen cuatro principales unidades geográficas, de oeste a este: Planicies Litorales, Cordillera de la Costa, Depresión Intermedia y Cordillera de los Andes. Por otro lado, Chile continental presenta una gran variedad de climas. Al norte del país existen condiciones áridas, caracterizadas por bajas precipitaciones y altas temperaturas a lo largo del año, pero con influencias del invierno altiplánico en el sector cordillerano, lo que provoca lluvias de verano. La zona central se caracteriza por un clima templado con lluvias concentradas en invierno, mientras que el sur del país se caracteriza por climas más fríos y lluviosos.

## 2.2 Estaciones meteorológicas

Se utilizan observaciones de 479 estaciones de Chile continental, pertenecientes a la Dirección General de Aguas (DGA) y la Dirección Meteorológica de Chile (DMC), disponibles en la página de *Center of Climate and Resilience Research* (CR2). Dichas estaciones son seleccionadas por contar con al menos un 80% de registros diarios entre el primero de abril de 2001 hasta 31 marzo de 2020, luego de eliminarse valores atípicos.

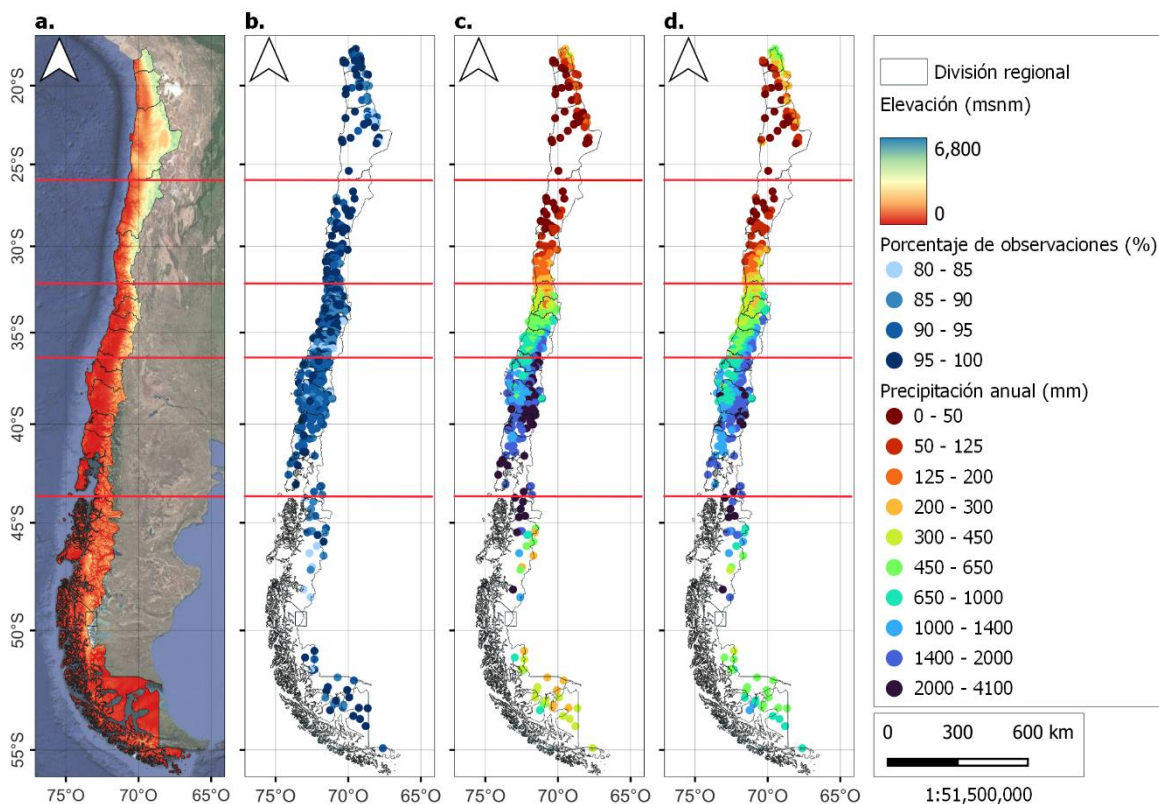


Figura 1: Área de estudio. De izquierda a derecha: (a) Modelo de elevación Shuttle Radar Topography Mission (SRTM); (b) Porcentaje de observaciones diarias entre abril de 2001 y marzo de 2020; (c) Precipitación anual observada en estaciones; (d) Precipitación anual simulada por WRF-SAAG en estaciones. Líneas rojas representan división de macrozonas.

## 2.3 Simulaciones de precipitación

Para cada estación pluviométrica, se obtuvieron las respectivas simulaciones de precipitación de WRF-SAAG para el mismo periodo en el punto de grilla más cercano, siguiendo la metodología punto a píxel propuesta por Thiemi et al. (2012).

## 2.4 Metodología de comparación

En este estudio, se propone la comparación de observaciones y simulaciones de precipitación para agregaciones temporales diarias, estacionales y anuales, agrupadas espacialmente por macrozonas, siguiendo la clasificación de la DGA (2016) adaptada por Zambrano-Bigiarini et al. (2017): Extremo Norte (17,50 – 26,00°S); Norte (25,00 – 32,18°S); Chile Central (32,18 – 36,40°S); Sur (36,40 – 43,70°S) y Austral (43,70 – 56,00°S). La distribución de estaciones

de precipitación se presenta en la Figura 1, con un total de 68 estaciones del Extremo Norte, 72 del Norte, 166 de Chile Central, 129 del Sur y 44 de la zona Austral.

Se evalúa el ajuste de simulaciones y observaciones de precipitación en las estaciones y agregaciones temporales definidas mediante el índice de eficiencia modificada de Kling-Gupta ( $KGE'$ ) (Kling et al., 2012) y sus componentes: coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ ), relación de sesgo ( $\beta$ ) y relación de variabilidad ( $\gamma$ ):

$$KGE' = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\beta - 1)^2 + (\gamma - 1)^2} \quad (1)$$

$$r = \frac{cov(x_o, x_s)}{s_o \cdot s_s} \quad (2)$$

$$\beta = \mu_s / \mu_o \quad (3)$$

$$\gamma = CV_s / CV_o = \frac{\sigma_s / \mu_s}{\sigma_o / \mu_o} \quad (4)$$

Donde:

$o, s$  = Subíndices que indican si la serie es observada o simulada.

$CV$  = Coeficiente de variación (mm).

$\sigma$  = Desviación estándar (mm).

$\mu_i$  = Media (mm)

$cov(x_o, x_s)$  = Covarianza entre serie observada y simulada (mm<sup>2</sup>).

$s$  = Varianza (mm).

Los valores  $KGE'$ ,  $r$ ,  $\beta$  y  $\gamma$  son adimensionales y su valor óptimo es 1. El coeficiente de correlación de Pearson  $r$  toma valores entre -1 y 1, donde los extremos indican correlación perfecta negativa y positiva, respectivamente, mientras que el cero indica que no hay correlación lineal, aunque puede haber una correlación no lineal entre las variables. Las variables  $\beta$  y  $\gamma$  varían entre 0 e infinito, donde valores de  $\beta$  menores (mayores) a 1 representan una subestimación (sobreestimación) con respecto a los montos observados, mientras que el valor de  $\gamma$  indica si la dispersión es mayor o menor a la observada.

Para evaluar la capacidad de simular eventos de distinta magnitud, se utilizaron métricas derivadas de tablas de contingencia de 2x2 (Tabla 1) utilizando la clasificación de eventos de precipitación indicada en la Tabla 2, propuesta por Zambrano-Bigiarini et al. (2017).

Tabla 1: Tabla de contingencia

		Observado	
		Precipita	No precipita
Simulado	Precipita	H	F
	No precipita	M	CN

Tabla 2: Clasificación de eventos de precipitación diaria. (Zambrano-Bigiarini et al. 2017).

Evento	Intensidad (mm/d)
No precipita	[0,1)
Precipitación ligera	[1,5)
Precipitación moderada	[5,20)
Precipitación fuerte	[20,40)
Precipitación violenta	$\geq 40$

Los índices evaluados en las tablas de contingencia de 2x2 corresponden a:

- Porcentaje correcto (*PC*, por sus siglas en inglés, Ec. 5) que representa la fracción de simulaciones correctas respecto al total de simulaciones.
- Probabilidad de detección (*POD*, por sus siglas en inglés, Ec. 6) que indica la fracción de eventos acertados de las simulaciones respecto al total de eventos observados.
- Tasa de falsa alarma (*FAR*, por sus siglas en inglés, Ec. 7), que indica la fracción falsas alarmas respecto al número de eventos de precipitación simulados.
- Puntuación de amenaza equitativa o Gilbert Skill Score (*GSS*, Ec. 8) que representa la fracción de aciertos sin considerar aquellos por azar.

$$PC = \frac{H + CN}{N_e} \quad (5)$$

$$GSS = \frac{H - H_e}{(H + F + M) - H_e} \quad (8)$$

$$POD = \frac{H}{H + M} \quad (6)$$

$$N_e = H + M + F + CN \quad (9)$$

$$FAR = \frac{F}{H + F} \quad (7)$$

$$H_e = \frac{(H + M) \cdot (H + F)}{N_e} \quad (10)$$

Donde:

*H* = Número de eventos de precipitación acertados por las simulaciones.

*M* = Número de eventos no acertados.

*F* = Número de eventos simulados no observados (falsas alarmas).

*CN* = Número de eventos de no precipitación acertados.

*N<sub>e</sub>* = Total de simulaciones.

*H<sub>e</sub>* = Número de simulaciones de eventos de precipitación acertados por azar.

*PC*, *POD* y *FAR* pueden tomar valores entre 0 y 1, mientras que *GSS* se encuentra en el rango -1/3 a 1. Para todos los índices el valor óptimo es 1, a excepción de *FAR* cuyo óptimo es 0.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 Dispersión entre precipitación observada y simulada

La Figura 2 muestra los montos de precipitación simulados por WRF-SAAG en función de los montos observados en cada estación, agrupados por macrozona y agregación temporal.

Para la mayoría de las agregaciones temporales, el máximo coeficiente de determinación  $R^2$  es de las macrozonas Chile Central y Sur, con  $R^2 \geq 0,69$ , mientras que, los menores se observan en el Extremo Norte, con  $R^2 < 0,5$  entre marzo y noviembre.

En las macrozonas del Extremo Norte y Norte, se observa una sobreestimación en los valores de precipitación simulados por WRF-SAAG en comparación con los registros de las estaciones meteorológicas. Por otro lado, en las demás macrozonas, se observa una subestimación en los valores de precipitación simulados.

En el Extremo Norte, el mejor ajuste de  $R^2$  se presenta a escala anual y es igual a 0,63. Mientras que, a escala trimestral, el mejor resultado se observa en verano ( $R^2 = 0,59$ ), seguido del otoño ( $R^2 = 0,48$ ), esto condice con el régimen de la zona que concentra las precipitaciones entre los meses de diciembre y marzo, debido al invierno altiplánico.

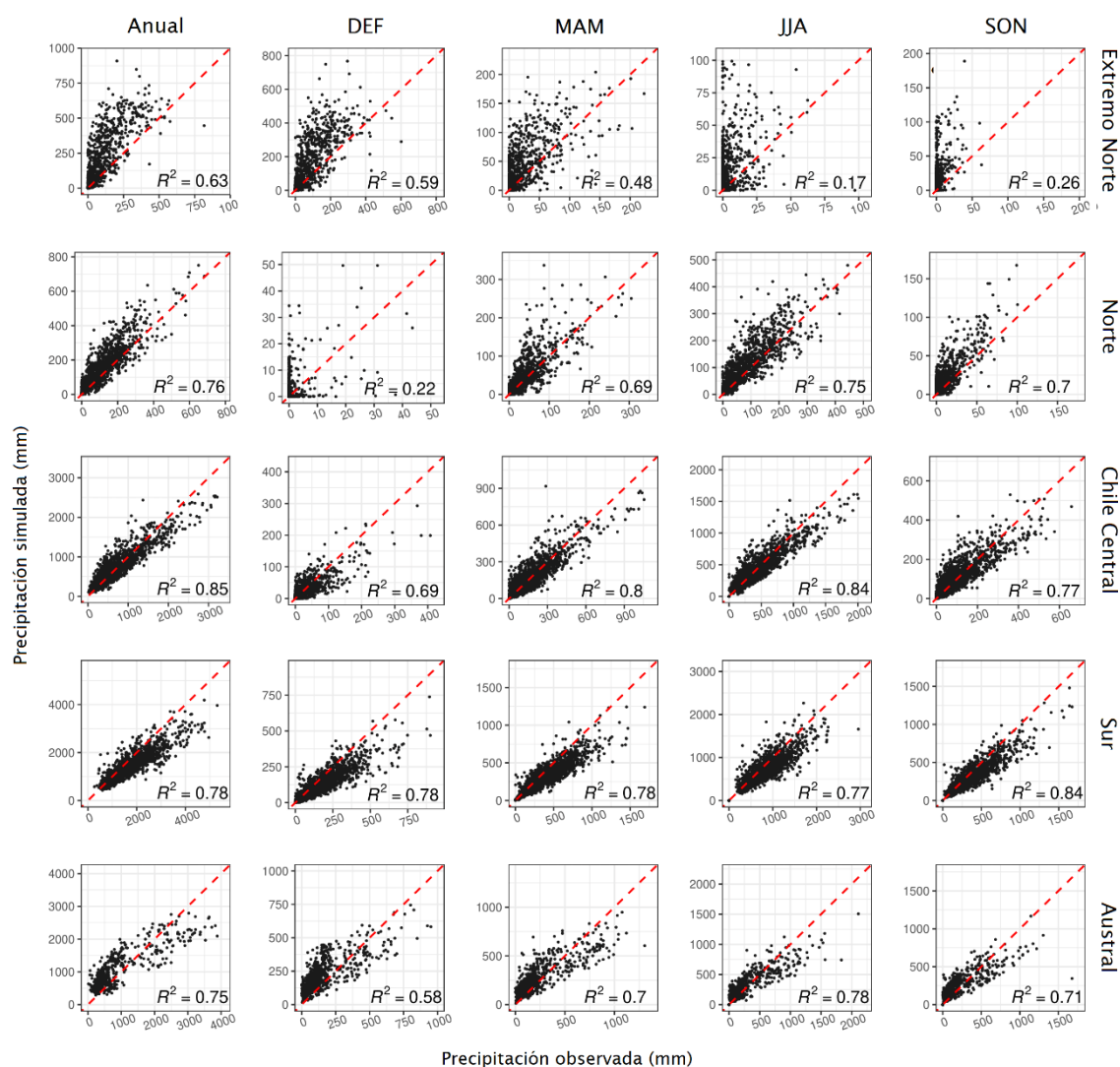


Figura 2: Precipitación observada vs. simulada por WRF-SAAG para macrozonas de Chile continental (filas) y diferentes agregaciones temporales (columnas) junto con coeficiente de determinación ( $R^2$ ). En los paneles, cada punto representa el monto simulado/observado en una estación, agregación temporal y año específico.

En las macrozonas Norte, Chile Central y Austral, se observan patrones similares de  $R^2$  entre simulaciones de WRF-SAAG y observaciones de precipitación a escala trimestral. Durante el verano, se presenta el mínimo  $R^2$ , registrando 0,22, 0,69 y 0,58 para las macrozonas Norte, Chile Central y Austral respectivamente. En contraste, los meses de invierno presentan los valores más altos de coeficiente de determinación trimestral: 0,75, 0,84 y 0,78 para las mencionadas macrozonas en el mismo orden. Además, a escala anual, se destaca que el  $R^2$  alcanza su máximo, con  $R^2 \geq 0,75$  en las tres zonas. Por otro lado, en la macrozona Sur el ajuste de los montos simulados y observados de precipitación presentan resultados de  $R^2$  parejos que rondan los 0,78, a excepción de los meses de primavera donde  $R^2 = 0,84$ .

### 3.2 Eficiencia de simulaciones de precipitación

En la Figura 3, se observa que para todas las agregaciones temporales los mayores valores de  $KGE'$  se obtienen en las macrozonas Chile Central y Sur (primer cuartil de  $KGE' \geq 0,53$  para todas las escalas temporales) principalmente en otoño, invierno y primavera, así como con la precipitación anual. Por otro lado, en las macrozonas Norte, Extremo Norte y Austral se observan valores cercanos al cero y negativos para todas las agregaciones temporales. A modo general, se observa también una disminución de  $KGE'$  desde la costa hacia la cordillera de los Andes, lo que también podría estar sujeto a una observación inadecuada de las precipitaciones.

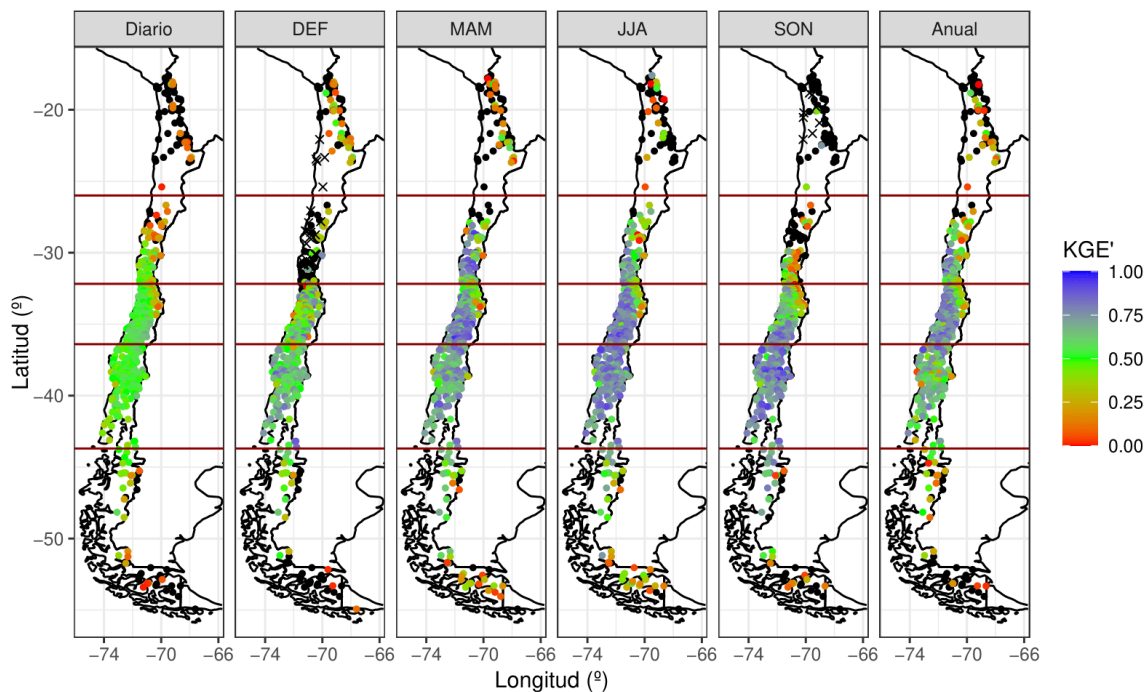


Figura 3: Eficiencia modificada de Kling–Gupta ( $KGE'$ ) para la precipitación simulada por WRF-SAAG en Chile continental, para agregaciones diarias, trimestrales y anuales. Los puntos negros representan valores de  $KGE'$  menores a 0. X negras indican estaciones donde  $KGE'$  no se calcula debido a que los valores de las series observadas son nulos. Las líneas horizontales representan división de macrozonas (Zambrano-Bigiarini et al. 2017).

La Figura 4 muestra el coeficiente de correlación de Pearson  $r$  entre montos de precipitación simulados por WRF-SAAG y observados. Los máximos se obtienen en otoño, invierno y primavera, principalmente entre las macrozonas Norte y Sur, donde la mediana de  $r$  varía entre 0,83 y 0,93. Mientras que en la macrozona Extremo Norte las medianas de  $r$  varían entre 0,26 y 0,55 para todas las agregaciones temporales y rangos intercuartiles ( $RIQ$ ) entre 0,35 y 0,65 para agregaciones trimestrales y anuales. Se destaca también la variabilidad en los valores de correlación de la macrozona Norte en verano con  $RIQ = 0,93$  para una mediana de 0,47.

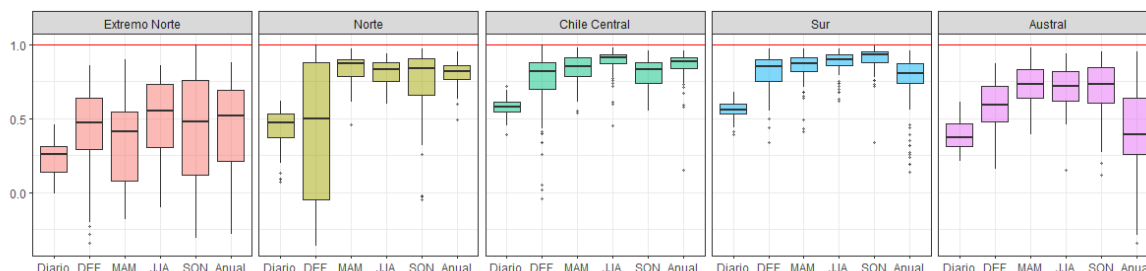


Figura 4: Coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ ) de precipitación observada y simulada por WRF-SAAG en Chile continental para agregaciones diarias, trimestrales y anuales. Línea roja representa valor óptimo.

La relación de sesgo ( $\beta$ ) varía enormemente dependiendo de la macrozona y agregación temporal (Figura 5). En el Extremo Norte, se obtiene en todas las agregaciones temporales una sobreestimación de la media simulada, que en su mayoría excede por más de 50% los registros observados. Se destaca que, entre septiembre y noviembre, el primer y tercer cuartil de  $\beta$  son 4,53 y 18,48, respectivamente, sin considerar valores indefinidos por registros observados son nulos, lo que también ocurre en verano.

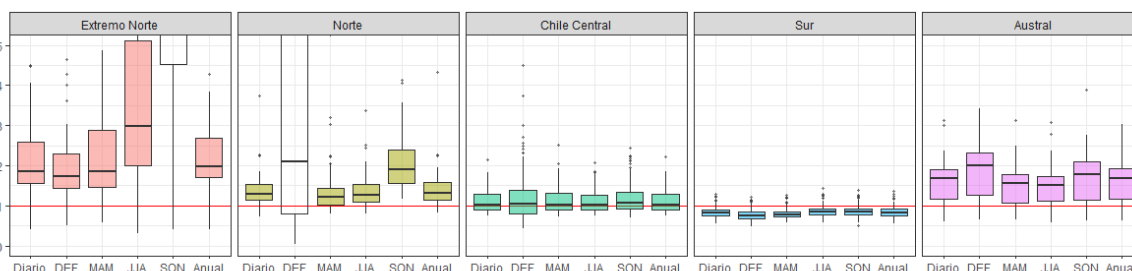


Figura 5: Relación de sesgo ( $\beta$ ) entre registros de precipitación observados y simulados por WRF-SAAG en Chile continental para agregaciones diarias, trimestrales y anuales. Gráficos limitados a 5. Línea roja representa valor óptimo.

De la relación de sesgo en el Norte (Figura 5) se observa una sobreestimación de precipitación simulada en todas las agregaciones temporales, especialmente en verano, donde el primer y tercer cuartil son 1,07 y 33,38, respectivamente. Entre los meses de septiembre y noviembre se aprecia una sobreestimación con 75% de estaciones con  $\beta \geq 1,90$ . Para el resto de las agregaciones temporales  $\beta$  se mantiene entre 1 y 2 para más de la mitad de las estaciones.

En el caso de Chile Central, para todas las agregaciones se observa una leve sobreestimación de la precipitación con mediana de  $\beta$  cercana al óptimo (Figura 5), siendo la mayor igual a 1,07 en primavera. Los valores más acotados se encuentran en invierno ( $RIQ = 0,37$ ), mientras el mayor rango se presenta en verano ( $RIQ = 0,61$ ). En la macrozona Sur se obtiene una subestimación con respecto a los valores observados, pero con rangos más acotados, los  $RIQ$  varían entre 0,14 y 0,17, con mayor mediana en invierno ( $\beta = 0,86$ ). En la macrozona Austral se presentan una sobreestimación de las simulaciones de precipitación, con valores de  $RIQ = 0,62$  y mediana igual a 1,51, en invierno y en verano, con  $RIQ = 1,06$  y mediana de  $\beta$  igual a 1,99.

La Figura 6 presenta la razón entre coeficientes de variación  $\gamma$  entre precipitación simulada por WRF-SAAG y observadas en estaciones. Dada la formulación de  $\gamma$  se indefinen aquellos cálculos para estaciones y agregaciones temporales indefinidas en  $\beta$ . Para la mayoría de las macrozonas y agregaciones temporales se observa una subestimación de coeficientes de variación por parte de las simulaciones. Es decir, menor dispersión donde la mediana de  $\gamma$  varía para todas las agregaciones temporales entre 0,63 y 0,96, a excepción de la macrozona Sur que presenta los mayores valores, cuyas medianas de  $\gamma$  varían entre 0,84 y 1,06.

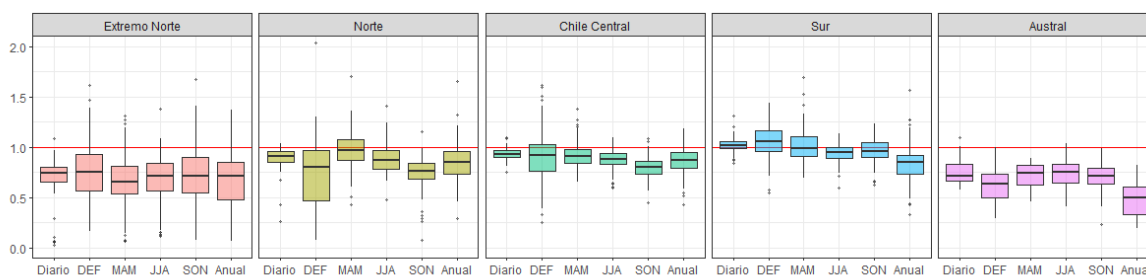


Figura 6: Relación de variabilidad ( $\gamma$ ) entre registros de precipitación observados y simulados por WRF-SAAG en Chile continental para agregaciones diarias, trimestrales y anuales. Gráficos limitados a 2. Línea roja representa valor óptimo.

### 3.3 Simulación de eventos de precipitación diaria

Los resultados de las tablas de contingencia presentadas en la Figura 7 indican que el  $PC$  para todas las macrozonas aumenta junto con la magnitud de los eventos. Tal que, para eventos de precipitación superiores a 40 mm el porcentaje correcto es cercano al óptimo en todos los casos, alcanzando el máximo en las macrozonas Norte y Chile Central para eventos de no precipitación con mediana de  $PC$  igual a 0,97 y 0,92, respectivamente. Por otro lado, los menores valores de  $PC$  se alcanzan en las macrozonas Sur y Austral para eventos inferiores a 20 mm, y el  $PC$  mínimo se observa en macrozona Austral y es igual a 0,57.

Por otro lado,  $POD$  solo evalúa el número de eventos acertados, por lo que para todos los eventos de precipitación los resultados disminuyen su rendimiento respecto a  $PC$  (ver Figura 7), a excepción de aquellos de no precipitación. Para el resto de eventos y para todas las

macrozonas la mediana de *POD* varía entre 0 y 0,38, con mayores valores para eventos entre 5 y 20 mm. Lo anterior indica que las simulaciones de precipitación WRF-SAAG, en general, replican correctamente eventos de no precipitación, pero tienen dificultad de predecir eventos de precipitación.

Para eventos de no precipitación se obtiene que  $FAR \leq 0,24$  en todas las macrozonas para el 75% de las estaciones, con mínimos entre las macrozonas Extremo Norte y Chile Central. Para el resto de las clasificaciones de eventos de precipitación *FAR* excede 0,5, donde los mayores resultados se observan en Extremo Norte para eventos superiores a 20 mm y en la macrozona Austral para eventos superiores a 40 mm, donde la media de *FAR* es igual a 1, es decir el modelo simula precipitaciones en días donde no ocurrieron estos eventos WRF-SAAG.

Finalmente, los valores de *GSS* para todas las agregaciones temporales y espaciales evaluadas no superan 0,5, con mayores resultados para eventos de no precipitación. En el resto de los casos, los valores más altos se obtienen en Chile Central para eventos sobre 5 mm con  $GSS \geq 0,14$ . Según lo esperado los resultados son menores en comparación a lo observado para *POD*, ya que no se consideran aquellos aciertos por azar, y demuestran la dificultad del modelo para simular eventos para las clasificaciones evaluadas de precipitación en todo el dominio.

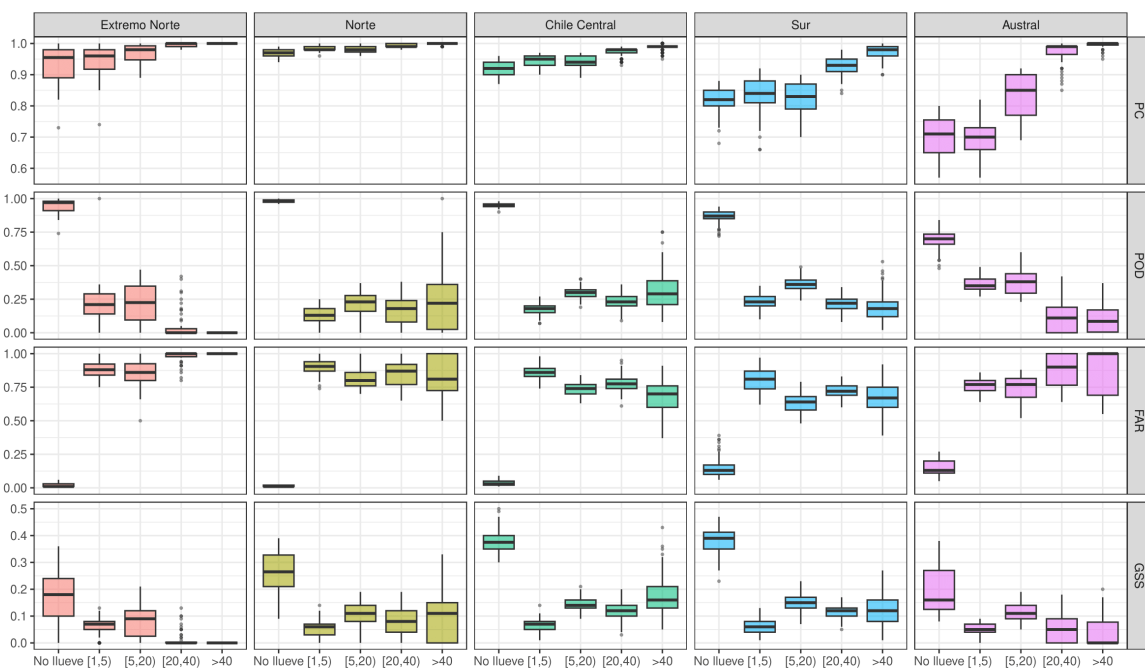


Figura 7: Evaluación de simulaciones de precipitación WRF-SAAG diaria mediante porcentaje correcto (PC), probabilidad de detección (POD), tasa de falsa alarma (FAR) y Gilbert Skill Score (GSS).

#### 4. CONCLUSIONES

En este trabajo, se evaluaron las simulaciones de precipitación de WRF-SAAG en Chile Continental utilizando registros de estaciones DGA y DMC, así como su habilidad de simular

eventos de precipitación, entre los años hidrológicos 2001 y 2019. A partir de los resultados obtenidos se concluye que:

- En las macrozonas Extremo Norte y Norte, las simulaciones de WRF-SAAG sobreestiman los montos de precipitación a escalas trimestrales y anuales, mientras que en el resto de las macrozonas evaluadas los subestiman.
- Los mejores (peores) ajustes lineales se presentan en aquellas agregaciones con mayores (menores) montos de precipitación, es decir, en los meses de invierno (verano), exceptuando la macrozona Extremo Norte, cuyas precipitaciones se concentran en verano.
- Las simulaciones de precipitación WRF-SAAG se ajustan mejor a los registros observados en las macrozonas Chile Central y Sur, con  $R^2$  entre 0,69 y 0,85.
- Del cálculo de  $KGE'$  y sus componentes, se concluye que el modelo de precipitación no es adecuado para las macrozonas Extremo Norte y Norte, mientras que su rendimiento en la zona Austral varía en función de la latitud de las estaciones, ya que los peores resultados ( $KGE' < 0,25$ ) se observan bajo los 50°S.
- El modelo de precipitación tiene dificultad para representar la precipitación media de agregaciones diarias, trimestrales y anuales en la macrozona Extremo Norte, lo que se traduce en grandes montos de variación de sesgo ( $\beta$ ). Lo mismo ocurre en el Norte en verano y en la zona Austral.
- De las métricas categóricas, se concluye que las simulaciones de precipitación WRF-SAAG, en general, predicen correctamente eventos de no precipitación, pero no logran reproducir eventos de precipitación para las clasificaciones evaluadas.
- A pesar de que el modelo presenta deficiencias en algunas macrozonas de Chile continental, estas pueden corregirse mediante corrección de sesgos, permitiendo así la representación de fenómenos meteorológicos que no pueden ser capturados por la red de estaciones debido a su baja densidad.
- De este trabajo queda por resolver las posibles aplicaciones de las simulaciones de precipitación de WRF-SAAG y su comparación con otros productos grillados de precipitación.

## REFERENCIAS

- Chile. Dirección General de Aguas. (2016). *Atlas del agua Chile 2016*. Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas.
- 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.
- Dominguez, F., Rasmussen, R., Liu, C., Ikeda, K., Prein, A., Varble, A., Arias, P. A., Bacmeister, J., Bettoli, M. L., Callaghan, P., Carvalho, L. M. V., Castro, C. L., Chen, F., Chug, D., Chun, K. P. (Sun), Dai, A., Danaila, L., Rocha, R. P. (Porfírio da), Nascimento, E. de L., Dougherty, E., Dudhia, J., Eidhammer, T., Feng, Z., Fita, L., Fu, R., Giles, J., Gilmour, H., Halladay, K., Huang, Y., Wong, A. M. Iza, Lagos-Zúñiga, M. Á., Jones, C., Llamocca, J., Llopart, M., Martinez, J. A., Martinez, J. C., Minder, J. R., Morrison, M., Moon, Z. L., Mu, Y., Neale, R. B., Ocasio, K. M. Núñez, Pal, S., Potter, E., Poveda, G., Puhales, F., Rasmussen, K. L., Rehbein, A., Rios-Berrios, R., Risanto, C. B., Rosales, A., Scaff, L., Seimon, A.,

- Somos-Valenzuela, M., Tian, Y., Van Oevelen, P., Veloso-Aguila, D., Xue, L., Schneider, T. (2023). Advancing South American Hydroclimate Science Through Multi-Decadal Convection-Permitting Modeling. Submitted to Bulletin of American Meteorological Society. Manuscript Number: BAMS-D-22-0226
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., ... Thépaut, J. N. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Kling, H., Fuchs, M., & Paulin, M. (2012). Runoff conditions in the upper Danube basin under an ensemble of climate change scenarios. *Journal of Hydrology*, 424–425, 264–277. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.01.011>
- Schumacher, V., Justino, F., Fernández, A., Meseguer-Ruiz, O., Sarricolea, P., Comin, A., Peroni Venancio, L., & Althoff, D. (2020). Comparison between observations and gridded data sets over complex terrain in the Chilean Andes: Precipitation and temperature. *International Journal of Climatology*, 40(12), 5266–5288. <https://doi.org/10.1002/joc.6518>
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M. G., Huang, X.-Y., Wang, W., & Powers, J. G. (2008). *A Description of the Advanced Research WRF Version 3*.
- Thiemig, V., Rojas, R., Zambrano-Bigiarini, M., Levizzani, V., & De Roo, A. (2012). Validation of satellite-based precipitation products over sparsely Gauged African River basins. *Journal of Hydrometeorology*, 13(6), 1760–1783. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-12-032.1>
- Zambrano-Bigiarini, M., Nauditt, A., Birkel, C., Verbist, K., & Ribbe, L. (2017). Temporal and spatial evaluation of satellite-based rainfall estimates across the complex topographical and climatic gradients of Chile. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(2), 1295–1320. <https://doi.org/10.5194/hess-21-1295-2017>