

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

**CORRECCIÓN DE SESGO DE LA PRECIPITACIÓN: ENTENDIENDO EL BALANCE  
ENTRE PRESERVAR LAS TENDENCIAS ANUALES DE LOS MODELOS  
CLIMÁTICOS Y CAPTURAR LA ESTACIONALIDAD MENSUAL LOCAL**

**SEBASTIÁN AEDO-QUILILONGO<sup>1</sup>**

**RESUMEN**

Los resultados de los Modelos de Circulación General (GCM) son ampliamente utilizados para estimar la respuesta de un sistema bajo potenciales condiciones climáticas futuras. Para poder utilizar la información de los GCM a escala local es necesario realizar una corrección de sesgo de esta información, proceso en el cual se busca consistencia de la información del GCM con la local. Cuando el análisis se basa en cambios en la estacionalidad de una variable es necesario asegurar que la corrección de sesgo permita capturar la estacionalidad local. Una estrategia clásica para esto es realizar la corrección de sesgo para cada mes de forma independiente, permitiendo además capturar correctamente los cambios de los GCM en la estacionalidad. Por otro lado, para preservar las tendencias de los GCM, las metodologías de corrección de sesgo se basan en el método Delta Change (DC). Sin embargo, al aplicar el método DC con un factor multiplicativo, en el caso de la precipitación, de forma independiente para cada mes, el cambio proyectado del total anual puede diferir de la proyección original del GCM, resultando incluso en cambios de signo (aumento en lugar de disminución). En este trabajo se exploran los potenciales alcances y causas de la diferencia en la proyección de la precipitación al aplicar un DC mensual mediante dos ejercicios sintéticos y un caso de aplicación a lo largo de Chile continental. Los resultados de este trabajo muestran que la diferencia en la proyección es resultado de discrepancias en la estacionalidad mensual entre el GCM y la información local, específicamente la fracción aportante al total anual en el período histórico (precipitación promedio mensual dividida por la suma de los promedios mensuales) y a cómo se distribuyen los cambios proyectados por el GCM en cada mes. En el caso de Chile, los resultados muestran que las zonas más críticas de inducir cambios en la proyección se encuentran en el norte de Chile, con cambios de hasta 100 puntos porcentuales. Para identificar los potenciales sesgos y cambios en las proyecciones originales de los GCM, se sugiere incorporar un análisis cuantitativo de la fracción aportante al total anual entre el GCM y las condiciones locales mediante estadísticos como el MAE o el RMSE, o evaluar directamente con un DC mensual las implicancias en la proyección de la precipitación. Este tipo de análisis permitirá avanzar en transparentar los potenciales sesgos y buscar coherencia entre la información corregida y la información de base.

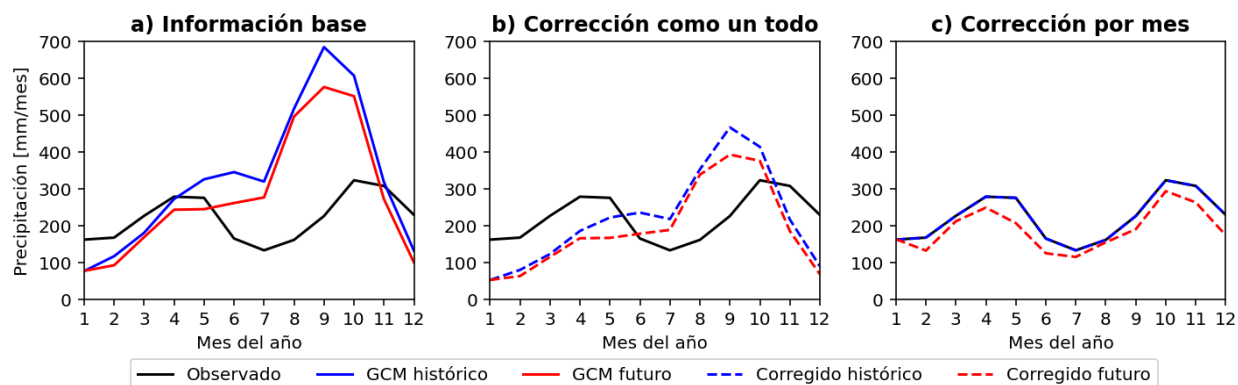
---

<sup>1</sup> Investigador, Centro Latinoamericano, Stockholm Environment Institute - email: [sebastian.aedo@sei.org](mailto:sebastian.aedo@sei.org)

# 1. INTRODUCCIÓN

Los resultados de los Modelos de Circulación General (GCM) son utilizados para analizar los impactos del cambio climático en diversas áreas temáticas (Fowler et al., 2007; Portalanza et al., 2024), siendo la estimación de las condiciones climáticas futuras la base de cualquier estudio relacionado. Sin embargo, debido a la naturaleza global de estos modelos y de sus resoluciones espaciales del orden de 100 km, es imprescindible corregir el sesgo de sus resultados respecto a la información local. Al respecto, si bien este proceso mejora la representación de las condiciones climáticas locales, introduce una nueva fuente de incertidumbre y sesgo al análisis de impactos del cambio climático (Maraun, 2013; Hakala et al., 2019; Aedo and Chong, 2024).

La corrección de sesgo es un proceso que busca coincidir algún parámetro de la información modelada con la de referencia u observación. Algunas estrategias de corrección de sesgo incluyen el uso de un factor de escala (aditivo para temperatura o multiplicativo para precipitación) para ajustar valores promedios o una transformación de equi-probabilidad, como el método Quantile Mapping (QM; Panofsky and Brier, 1968). Este último ajusta la distribución acumulada de la precipitación, asegurando que los momentos estadísticos (como el promedio y desviación estándar) sean más representativos de las observaciones. La corrección de sesgo se puede aplicar a una serie de tiempo completa o a cada uno de los meses de forma independiente. A modo de ejemplo, la Figura 1 compara los resultados de corregir el sesgo la serie de tiempo de precipitación completa o corrigiendo cada mes de forma independiente.



**Figura 1.** Ejemplo de corrección de sesgo a resultados de un GCM (a) considerando la serie de tiempo completa (b) y cada mes independientemente (c). En (c) la línea azul y negra se superponen.

Al corregir la serie de tiempo completa, la estacionalidad mensual histórica de la información corregida resulta en un promedio consistente con las observaciones, pero mantiene la forma de la estacionalidad del GCM. En cuanto a la información futura, se logra capturar la disminución que proyecta el GCM, pero esta no es consistente con las observaciones, sugiriendo un cambio drástico en la estacionalidad. Por otro lado, cuando se realiza una corrección de sesgo para cada mes de forma independiente, en el periodo histórico se obtiene una distribución de la precipitación dentro del año igual a la de la observación y la información futura corresponde a aplicar el cambio proyectado del GCM a las observaciones, resultando en información coherente con las observaciones. En el ejemplo presentado en la Figura 1 se pueden observar las implicancias de cómo se realiza la corrección de sesgo según las necesidades del estudio, obteniendo distintos resultados para un mismo método. En particular, si el GCM no representa correctamente la

estacionalidad de las observaciones y el análisis de interés es a una escala sub-anual, se debe priorizar el escalamiento a escalas sub-anales para lograr una correcta representación.

Por otro lado, para proyectar hacia el futuro información observada, el método Delta Change (DC) permite incorporar el cambio proyectado por los GCM a las observaciones. De forma similar al proceso de corrección de sesgo con un factor de escala, el método DC consiste en aplicar a las observaciones un factor que se calcula a partir de la relación entre la condición futura e histórica del GCM (Hay et al., 2000). Es importante notar que los cambios porcentuales, típicamente utilizados para analizar los cambios en precipitación, son equivalentes a un cambio con factor multiplicativo. La ecuación 1 muestra un ejemplo de aplicación del método DC considerando un factor multiplicativo para estimar el valor futuro,  $O_{fut}$ , escalando las observaciones,  $O_{hist}$ , con un factor que es la relación entre la información futura e histórica del GCM,  $G_{fut}$  y  $G_{hist}$ :

$$O_{fut} = O_{hist} \times (G_{fut}/G_{hist}) \quad (1)$$

Al igual que el proceso de corrección de sesgo, el método DC se puede aplicar a escala anual o sub-anual, calculando y aplicando los factores para cada sub-período (por ejemplo, cada mes) de forma independiente. Por ejemplo, en casos donde se busca capturar los cambios en los promedios mensuales de precipitación, se aplica el método DC a cada mes de forma independiente.

A modo de ejemplo, la Tabla 1 presenta los datos para un caso a escala semestral. El valor anual de las observaciones es de 3 (2 en el primer semestre y 1 en el segundo) y el del GCM en el período histórico es de 6 (1 en el primer semestre y 5 en el segundo). A partir de una comparación entre los valores futuros e históricos del GCM, se obtiene que el primer semestre aumenta en un 30% y el segundo disminuye en un 30%, resultando en un total anual futuro de 4.8. Al aplicar estos cambios porcentuales a la información observada histórica, se obtiene un total anual futuro de 3.3. Finalmente, al comparar los valores anuales, el GCM indica un cambio proyectado del total anual de un -20% y la información observada proyectada resulta en un aumento de un 10%, distinta tanto en signo como en magnitud comparado a la del GCM. Este ejemplo muestra que, al aplicar un cambio multiplicativo (o porcentual) a una escala sub-anual a una variable que se agrega como suma (como la precipitación), puede resultar en una modificación de la narrativa de base.

**Tabla 1.** Valores del ejemplo de proyecciones con Delta Change.

Dato	Semestre	Histórico	Cambio	Futuro
Observado	1	2	+30%	2.6
	2	1	-30%	0.7
	Total Anual	3	+10%	3.3
GCM	1	1	+30%	1.3
	2	5	-30%	3.5
	Total Anual	6	-20%	4.8

La relevancia de este ejemplo está en que 1) los métodos de corrección de sesgo que buscan preservar las tendencias de los GCM tienen como objetivo capturar el cambio proyectado mediante el método DC (Bürger et al., 2013; Cannon et al., 2015; Chadwick et al., 2023) y 2) estos métodos suelen aplicarse a escalas sub-anales de forma independiente para que 2a) la serie corregida represente correctamente la estacionalidad de las observaciones y 2b) capturar los cambios en la

estacionalidad que sugieren los GCM y así permitir un análisis realista de los cambios estacionales. Esto es de suma importancia para los estudios donde la escala de interés es sub-anual. Sin embargo, esta consideración aporta una nueva fuente potencial sesgo al análisis de impactos del cambio climático a los ya explorados en trabajos como los de Maraun (2013) y Hakala et al. (2019). Es importante notar que, matemáticamente, este problema no ocurre para cambios asociados a cambios aditivos y donde la agregación anual es en base a promedios (como la temperatura).

En este trabajo se exploran las implicancias de aplicar el método DC a cada mes de forma independiente para la precipitación y las causas de estas implicancias. De aquí en adelante, a este proceso se le llamará DC mensual.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

Este trabajo presenta 2 ejercicios que buscan entender las condiciones que pueden resultar en un cambio proyectado distinto al de los cambios proyectados por los GCM y buscar relaciones entre métricas de error en la información histórica con las potenciales diferencias en los cambios proyectados. De forma complementaria, se presenta un caso de aplicación en Chile continental.

### 2.1 EJERCICIO 1: ANALÍTICO

El primer ejercicio corresponde a la comparación de 5 casos con distintos promedios mensuales que se consideraron representativos tanto de información observada como modelada por un GCM en el período histórico. Los detalles de estos casos se presentan en la Tabla 2. Luego, se generaron 10,000 conjuntos con 12 valores aleatorios de cambios proyectados entre -50% y +50 (1 valor distinto para cada mes). Estos cambios porcentuales se aplicaron tanto a las observaciones como al GCM mediante el método DC mensual y se comparó el cambio proyectado de la agregación anual de estos, al igual que en el ejemplo de la Introducción.

**Tabla 2.** Detalles del promedio mensual de los casos analizados en el Ejercicio 1: Analítico.

Caso	Observación	GCM	Objetivo
1	Función de Densidad de una distribución Normal de media 6.5 y desviación estándar 2, amplificada por 500 (Resulta en una distribución uni-modal de valor máximo 200 y mínimo cercano a 0)	Observación multiplicada por 2	Comparar condiciones donde la forma de la estacionalidad mensual es igual para la observación y GCM, pero con diferencias en magnitud
2		Observación dividida por 2	
3	Línea recta descendente desde 200 en enero a 0 en diciembre	Observación dividida por 2	Redundancia con el caso 2, pero con formas distintas
4		Línea recta ascendente desde 0 en enero a 200 en diciembre	Comparar una condición opuesta entre observación y GCM
5		Valor 100 constante para todos los meses	Comparar una condición intermedia entre el caso 3 y 4

Los cambios proyectados se analizaron de forma cualitativa mediante gráficos de dispersión. De forma complementaria, se analizaron también los casos en términos de la fracción aportante al total anual (valores mensuales, divididos por el total anual o suma de los valores mensuales).

## 2.2 EJERCICIO 2: SINTÉTICO

En el segundo ejercicio se generaron casos aleatorios para la fracción aportante al total anual (valores mensuales, divididos por el total anual o suma de los valores mensuales) de la observación y del GCM en el período histórico, de forma tal que estas resulten en un valor específico de un estadístico de ajuste. Los estadísticos de ajuste y los valores objetivo analizados se presentan en la Tabla 3. Es importante notar que no se consideraron valores de MAE y RMSE mayores a 0.15 y 0.3, respectivamente, debido a que no fue posible generar los casos para estos valores.

**Tabla 3.** Estadísticos considerados para las condiciones históricas en el Ejercicio 2: Sintético.

Estadístico	Abreviación	Ecuación	Valores objetivo
Nash-Sutcliffe efficiency	NSE	$1 - \frac{\sum_{m=1}^{12} (OBS_m - GCM_m)^2}{\sum_{m=1}^{12} (OBS_m - \overline{OBS})^2}$	-1.0 a 1.0 cada 0.1
Mean Absolute Error	MAE	$\frac{\sum_{m=1}^{12}  OBS_m - GCM_m }{12}$	0.00 a 0.15 cada 0.01
Root Mean Square Error	RMSE	$\sqrt{\frac{\sum_{m=1}^{12} (OBS_m - GCM_m)^2}{12}}$	0.00 a 0.30 cada 0.01

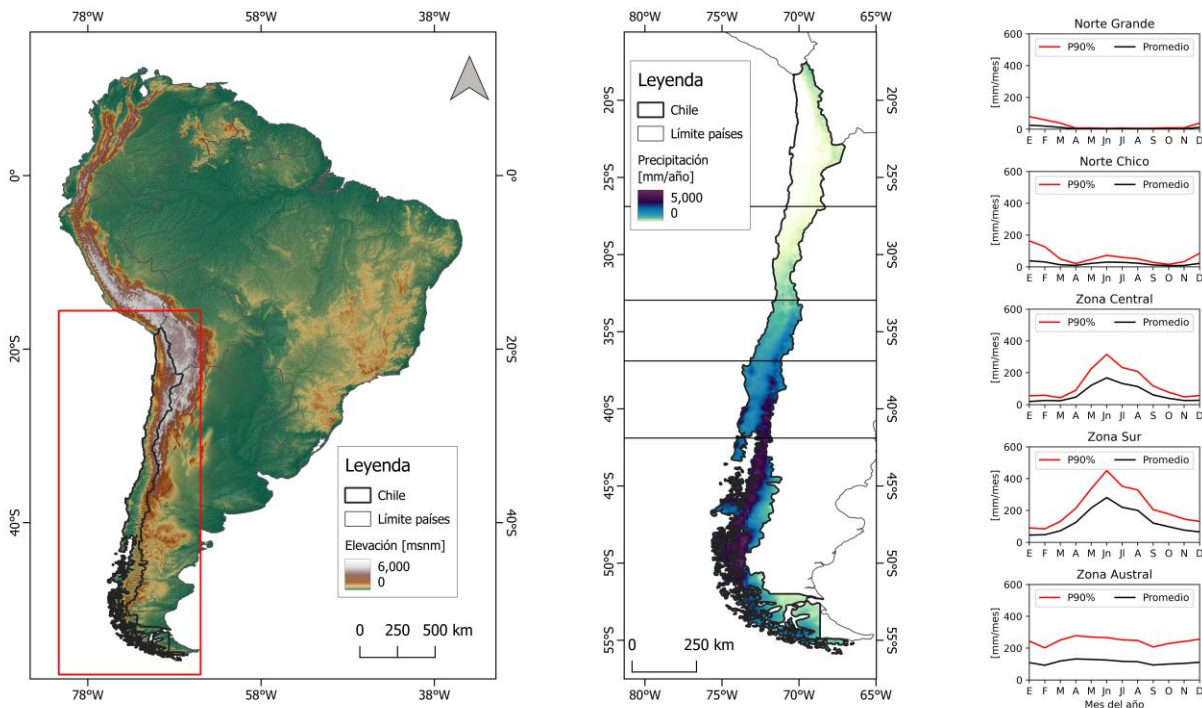
De esta forma, para cada valor de un estadístico de ajuste (por ejemplo, para un MAE de 0.1 entre la fracción aportante al total anual de la observación y del GCM) se generaron 10,000 conjuntos aleatorios de 12 meses (1 valor distinto para cada mes) para la observación y para el GCM que resultaran en dicho estadístico. Luego, para cada conjunto se generaron 10,000 tasas de cambio mensuales aleatorias (1 valor distinto para cada mes) entre -50% y +50%, las cuales se aplicaron tanto a las observaciones como al GCM mediante el método DC mensual.

Para cada conjunto asociado a un valor del estadístico objetivo se calculó 1) la diferencia entre los cambios proyectados anuales de la observación y del GCM, 2) el  $r^2$  para entender la dispersión de los casos y 3) la cantidad de casos donde la proyección cambió de signo.

## 2.3 CASO DE APLICACIÓN EN CHILE

En el caso de aplicación se compraron los cambios proyectados por los GCM del Sexto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2021) y los resultantes al aplicar un DC mensual a las precipitaciones a lo largo de Chile continental. Chile continental se extiende entre  $56^\circ - 17^\circ\text{S}$  y  $76^\circ - 66^\circ\text{O}$  y presenta diversas condiciones topográficas y de precipitación, abarcando elevaciones desde 0 a 6,000 m.s.n.m. y precipitaciones de 0 a 5,000 mm/año, precipitaciones que se distribuyen de forma heterogénea tanto en el tiempo como en el espacio (Figura 2). Como observaciones representativas a escala mensual se consideró el producto grillado CR2MET v2.0 (disponible en: <https://www.cr2.cl/datos-productos-grillados/>), el cual contiene información mensual para el período 1979 – 2018 a una resolución de  $0.05^\circ$  (~5km). Para

efectos del análisis, se subdividió el análisis en cuatro zonas: Norte Grande (27° – 17°S), Norte Chico (33° – 27°S), Zona Central (37° – 33°S), Zona Sur (42° – 37°S) y Zona Austral (56° – 42°S).



**Figura 2.** Chile y precipitación en el período 1985 – 2014, a partir del producto CR2MET v2.0.

Respecto a las proyecciones de cambio climático, se consideraron los resultados de precipitación de 29 GCM (únicamente la realización r1i1p1f1) bajo los experimentos SSP 1-2.6, SSP 2-4.5, SSP 3-7.0 y SSP 5-8.5. La selección de estos GCM se basó en que tienen información de precipitación y temperatura, variables utilizadas en la modelación de recursos hídricos, para los cuatro experimentos SSP. Los resultados de los GCM se interpolaron bilinealmente a la grilla de CR2MET para hacer una comparación celda a celda. Además, se consideró el período 1985 – 2014 como histórico y 2070 – 2099 como futuro para el caso de aplicación.

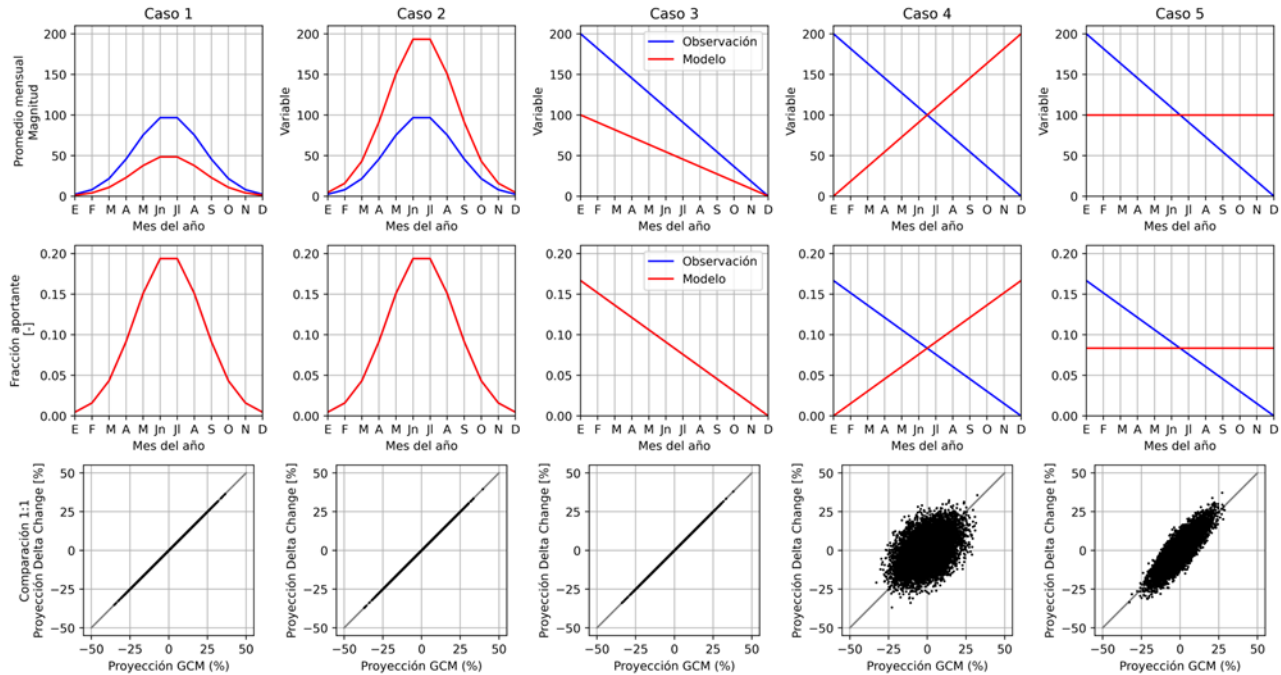
### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 EJERCICIO 1: ANALÍTICO

La Figura 3 sintetiza los resultados del Ejercicio 1. Cada columna de la Figura 3 corresponde a uno de los casos analizados y las filas superior, media e inferior presentan el promedio de la precipitación mensual, la fracción aportante al total anual y la relación del cambio proyectado anual al aplicar el método DC mensual tanto al GCM y como a las observaciones, respectivamente. En los casos 1, 2 y 3, la fracción aportante al total anual de la observación y GCM es igual.

Los casos 1, 2 y 3 muestran que, si la fracción aportante al total anual de las observaciones y el GCM es igual en el período histórico, independientemente si la magnitud del GCM o de la

observación son mayores o menores, los cambios proyectados de la agregación anual del GCM y las observaciones se posicionan sobre la línea 1:1, indicando que las proyecciones son iguales.



**Figura 3.** Comparación del cambio proyectado de las series del Ejercicio 1.

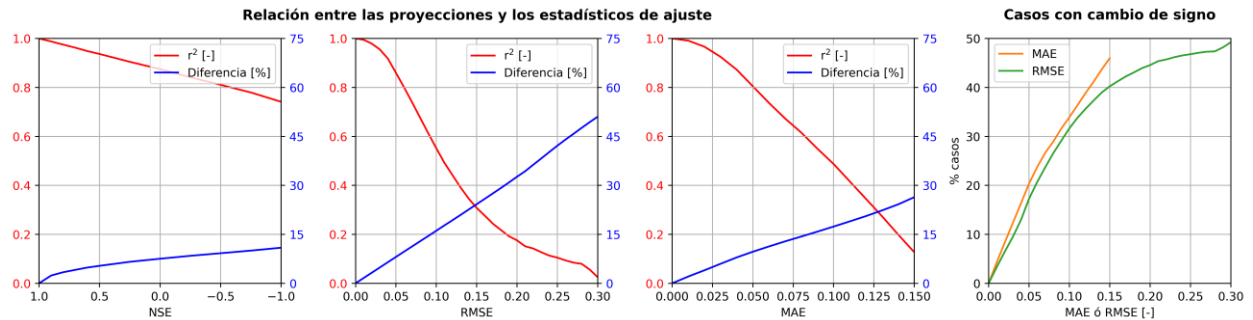
El caso 4 corresponde a un caso con geometrías antagonistas, donde el máximo del GCM (u observación) ocurre en el mes del mínimo de la observación (o GCM). En este caso se observa que algunas proyecciones se sitúan en la línea 1:1 y otras se separan de esta debido a que la proyección de la agregación anual de la observación del GCM no son iguales, presentando incluso casos con signos distintos. Lo mismo ocurre en el caso 5, que representa una condición intermedia entre el caso 3 y 4, resultando en una menor dispersión de puntos, sugiriendo que, mientras mayor la diferencia de la fracción aportante al total anual, mayor dispersión de los puntos o posibilidad de diferencias en las proyecciones.

### 3.2 EJERCICIO 2: SINTÉTICO

La Figura 4 sintetiza los resultados del Ejercicio 2 mediante tres componentes: 1) la diferencia promedio entre la proyección del GCM y observaciones al aplicar el método DC mensual, 2) la dispersión de las proyecciones (si  $r^2$  disminuye, aumenta la dispersión) y 3) el número de casos donde las proyecciones son distinto signo. Estas tres componentes se contrastaron con los estadísticos MAE, RMSE y NSE evaluados en la condición histórica.

En primer lugar, los resultados muestran que los estadísticos MAE y RMSE se relacionan mejor con la diferencia en la proyección, y entre estos, que el estadístico NSE. En segundo lugar, las métricas de error muestran que la diferencia entre las proyecciones y la dispersión de los casos aumenta y con los estadísticos de ajuste MAE y RMSE. Mientras que valores de un NSE de -1 resultaron en diferencias promedio de hasta 12%, valores de MAE de 0.15 y RMSE de 0.3 resultaron en diferencias promedio de 25 y 50%, respectivamente. Respecto al número de casos

donde la proyección con el método DC mensual es de distinto signo que la proyectada originalmente por el GCM, al igual que en el caso de la magnitud del error, el estadístico NSE no es robusto como el MAE y RMSE (no se muestra el resultado del NSE).

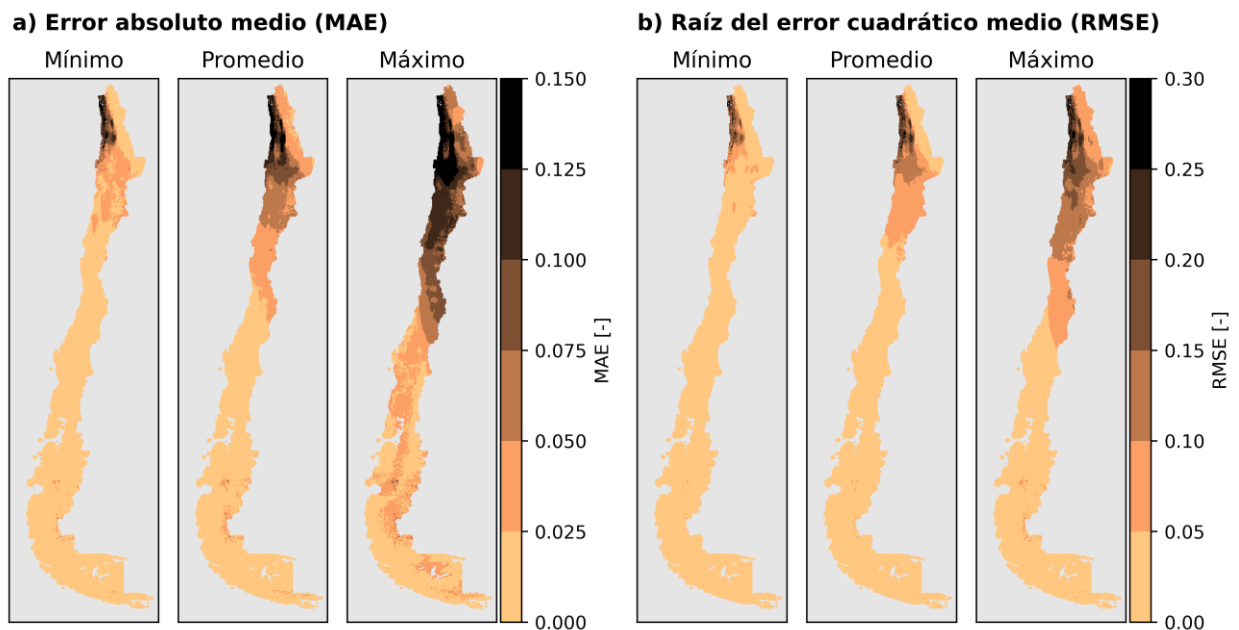


**Figura 4.** Relación entre los estadísticos de ajuste en el período histórico y diferencia de las proyecciones en puntos porcentuales en el Ejercicio 2.

Los resultados de este ejercicio son consistentes con lo observado en el caso 5 y 4 del Ejercicio 1, donde el caso 5 presenta un menor error y dispersión que el caso 4.

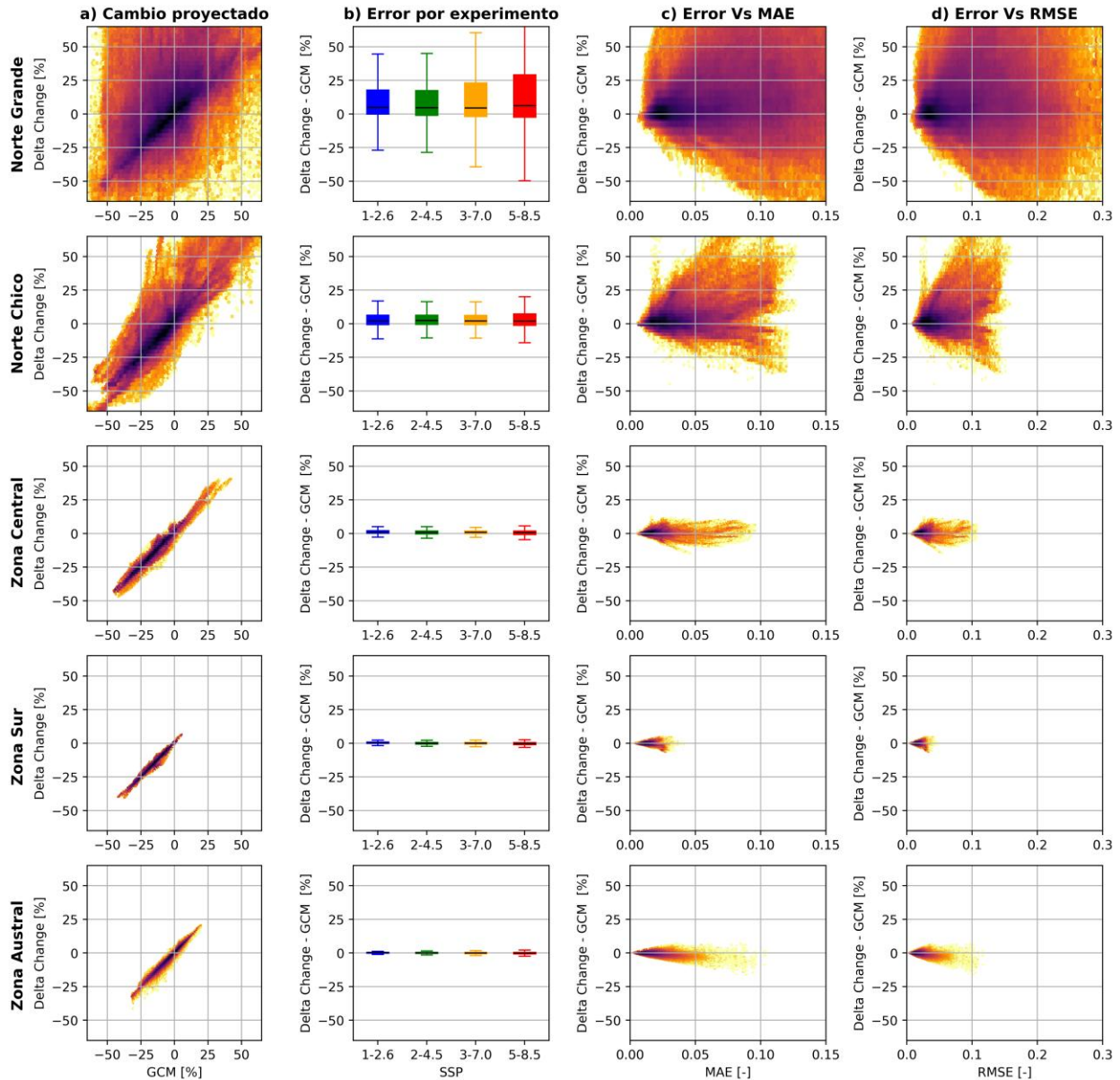
### 3.3 CASO DE APLICACIÓN EN CHILE

La Figura 5 sintetiza los estadísticos MAE y RMSE de comparar la fracción aportante al total anual de la observación con la de los GCM. Ambos estadísticos presentan un gradiente norte-sur de peor a mejor ajuste. Los valores MAE para el Norte Grande, Norte Chico, Zona Central, Zona Sur y Zona Austral alcanzan máximos de 0.15, 0.14, 0.13, 0.06 y 0.11, respectivamente, mientras que para el RMSE los máximos son de 0.3, 0.19, 0.14, 0.9 y 0.11, respectivamente.



**Figura 5.** Estadísticos (a) MAE y (b) RMSE de la fracción aportante al total anual del caso de aplicación, considerando los valores mínimos, promedio y máximo de todos los GCM.

La Figura 6 sintetiza para cada zona de Chile los resultados de las proyecciones para el período 2070 – 2099, respecto al 1985 – 2014 del caso de aplicación, comparando en un gráfico de dispersión las proyecciones originales del GCM con las generadas a partir del DC mensual (Figura 6a), diagramas de cajas diferenciando por experimento SSP (Figura 6b) y comparando el error entre el método DC mensual y la proyección original del GCM con los estadísticos de ajuste MAE y RMSE (Figura 6c y 6d, respectivamente). Consistente con los valores de las métricas de ajuste en el período histórico, las mayores diferencias entre las proyecciones anuales de los GCM y las resultantes de aplicar el método DC mensual a las observaciones se encuentran en el Norte Grande y Norte Chico, mientras que las menores diferencias se encuentran en la Zona Sur y Zona Austral.



**Figura 6.** Síntesis de las proyecciones de los GCM y las generadas al aplicar el método DC en el caso de aplicación. En (a), (c) y (d) los colores oscuros indican mayor densidad de puntos y cada punto corresponde al resultado de una celda, un GCM y un escenario SSP.

Las diferencias entre las proyecciones en el Norte Grande supera valores de 100%, mientras que en el Norte Chico, Zona Centro, Zona Sur y Zona Austral alcanza valores de 100, 15, 10 y 15%, respectivamente. Por otro lado, las diferencias en la proyección muestran valores medios similares entre experimentos (Figura 6b), pero con casos extremos más acentuados en el escenario SSP 5-8.5. En general, el promedio de los casos muestra diferencias positivas, lo que significa que la proyección generada con el DC mensual resulta en una menor disminución o mayor aumento en la precipitación.

Consistente con los resultados del Ejercicio 2, a mayor MAE o RMSE (Figura 6c y d), mayor la magnitud del potencial error de las proyecciones y la dispersión de estos errores. Esto se observa como un triángulo que se expande a mayores MAE y RMSE; sin embargo, la apertura o dispersión es distinta entre zonas. Además, en todas las zonas se observa que, valores altos de MAE y RMSE pueden resultar en una proyección consistente con la del GCM.

### 3.4 DISCUSIÓN

Los dos ejercicios y el caso de aplicación analizados en este trabajo permiten explorar las implicancias de usar el método DC mensual para proyectar las precipitaciones locales a partir de las proyecciones mensuales de los GCM. El Ejercicio 1 muestra que la fracción aportante al total anual (precipitación promedio mensual dividido por la suma de los promedios mensuales) es un factor relevante para explicar las diferencias entre la proyección del GCM y la resultante de aplicar el método DC mensual a las observaciones.

Por otro lado, el Ejercicio 2 muestra que los estadísticos MAE y RMSE de la fracción aportante al total anual entre las observaciones y el GCM en el período histórico son métricas relevantes para entender las potenciales diferencias en las proyecciones. El caso de aplicación muestra un gradiente de norte a sur, donde la zona norte muestra los mayores potenciales a generar diferencias en las proyecciones, con casos donde el GCM proyecta cambios de -50% y el DC mensual resulta en cambios mayores a +50%, y la zona sur la con menores potenciales

Los dos ejercicios y el caso de aplicación muestran que, si el MAE o RMSE de la fracción aportante al total anual de la observación y el GCM en el período histórico es 0 (ajuste perfecto), no habrá diferencia entre las proyecciones al aplicar el DC mensual. Por otro lado, al aumentar la magnitud los estadísticos, aumenta la posibilidad de que las proyecciones difieran en magnitud y signo. Sin embargo, la magnitud de la diferencia no está asociada únicamente a la relación de la fracción aportante al total anual de la observación y del GCM, sino que también a cómo se distribuyen los cambios proyectados en cada mes.

Dado que los GCM representan información de escalas del orden de cientos de km, zonas donde las condiciones locales presenten variaciones espaciales significativas en la fracción aportante al total anual son más probables de resultar en diferencias en las proyecciones al utilizar el método DC mensual. Una forma de evitar este problema por una baja representatividad de los GCM es utilizar agregaciones a escalas espaciales coherentes y comparables con los GCM. Esto tendría implicancias en cuanto a limitaciones de generar productos grillados de alta resolución en zonas como el Norte Grande de Chile.

## 4. CONCLUSIONES

El análisis de cambio climático basado en los GCM tiene como base confiar y buscar preservar las proyecciones de estos para asegurar homogeneidad y consistencia en los análisis que se basan en estos resultados. Según el tipo de estudio, es de interés poder estimar los cambios en los totales anuales o de escalas sub-anuales, como los cambios en la estacionalidad mensual. En esta línea, la mayoría de las metodologías que buscan preservar las tendencias de las precipitaciones de los GCM se basan en aplicar el método DC a la información histórica. Sin embargo, al aplicar el método DC a cada mes de forma independiente a las precipitaciones observadas se pueden generar proyecciones anuales diferentes a las originales del GCM, diferencias que pueden incluso resultar en diferencias de signo (aumento en lugar de disminución).

Este trabajo explora las potenciales causas de que la proyección de la precipitación al aplicar un DC mensual difiera de las originalmente proyectadas por los GCM y evalúa métricas para relacionar condiciones en el período histórico con el potencial error en las proyecciones futuras mediante dos ejercicios y un caso de aplicación en Chile.

Las principales conclusiones de este trabajo son:

- La fracción aportante al total anual (precipitación promedio mensual dividida por la suma de los promedios mensuales o el total anual) es uno de los parámetros que permite anticipar si las proyecciones resultantes de aplicar el método DC mensual a las observaciones serán distintas a las del GCM o no.
- Las métricas MAE y RMSE entre la fracción aportante al total anual de las observaciones y del GCM en el período histórico permiten entender el nivel de error en las proyecciones anuales.
- Una buena representatividad de la fracción aportante al total anual (MAE o RMSE con valor 0) asegura consistencia en las proyecciones, pero una mala representatividad (MAE o RMSE mayor a 0) no implica que habrá un error en las proyecciones. Esto, porque el potencial error está asociado tanto a la fracción aportante al total anual como a la distribución de las proyecciones dentro del año.
- Los potenciales errores no se deben obviar o asumir irrelevantes, ya que estos pueden ir de cambios proyectados de los GCM desde -50% y resultados del DC mensual mayores a +50%, lo cual no solo cambia la magnitud, sino que el sentido de la narrativa analizada.

Se recomienda el uso de la fracción aportante al total anual y un análisis cuantitativo de representatividad local en el período histórico basado en el MAE o RMSE. Para identificar los GCM que podrían generar inconsistencias en las proyecciones, se recomienda replicar el caso de aplicación en los períodos relevantes de análisis. Estos análisis permiten avanzar en entender la información con la cual estamos trabajando, además de identificar los desafíos e implicancias en cada zona de análisis, para buscar alternativas para abordar los impactos del cambio climático. Finalmente, una corrección de sesgo orientada a capturar la estacionalidad local de la precipitación tiene el potencial sesgo de modificar la proyección original del GCM, mientras que una corrección de sesgo que no busque capturar de forma explícita la estacionalidad local podría resultar en una buena representación de la proyección, pero una mala representatividad de la estacionalidad local. La selección del criterio no puede ser arbitrario y debe responder a las necesidades del estudio, al mismo tiempo de ser transparente de las implicancias.

## REFERENCIAS

- Aedo, S. and Chong, P. (2024). Propuesta Metodológica para el escalamiento local a nivel diario de Modelos de Circulación General. XXXI Congreso Latinoamericano de Hidráulica, IAHR, Medellín, Colombia.
- Bürger, G., Sobie, S., Cannon, A., Werner, A., and Murdock, T. (2013). Downscaling extremes: An intercomparison of multiple methods for future climate. *Journal of Climate*, 26(10), 3429-3449. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00249.1>.
- Cannon, A., Sobie, S., and Murdock, T. (2015). Bias Correction of GCM Precipitation by Quantile Mapping: How Well Do Methods Preserve Changes in Quantiles and Extremes? *Journal of Climate*, 28(17), 6938-6959. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00754.1>.
- Chadwick, C., Gironás, J., González-Leiva, F., and Aedo, S. (2023). Bias adjustment to preserve changes in variability: the unbiased mapping of GCM changes. *Hydrological Sciences Journal*, 68(8), 1184-1201. <https://doi.org/10.1080/02626667.2023.2201450>
- Fowler, H., Blenkinsop, S., and Tebaldi, C. (2007). Linking climate change modelling to impacts studies: Recent advances in down-scaling techniques for hydrological modelling. *International Journal of Climatology*, 27(12), 1547-1578. <https://doi.org/10.1002/joc.1556>
- Hakala, K., Addor, N., Teutschbein, C., Vis, M., Dakhlaoui, H., and Seibert, J. (2019). Hydrological Modeling of Climate Change Impacts. In *Encyclopedia of Water*, P. Maurice (Ed.). <https://doi.org/10.1002/9781119300762.wsts0062>
- Hay, L., Wilby, R., and Leavesley, G. H. (2000). A comparison of delta change and downscaled GCM scenarios for three mountainous basins in the United States. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 36(2), 387-397. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2000.tb04276.x>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the IPCC*. Cambridge Univ. Press. In Press. [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)].
- Maraun, D. (2013). Bias Correction, Quantile Mapping, and Downscaling: Revisiting the Inflation Issue. *Journal of Climate*, 26(6), 2137-2143. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00821.1>
- Panofsky, H. and Brier, G. (1968). *Some applications of statistics to meteorology*. Earth and Mineral Sciences Continuing Education, College of Earth and Mineral Sciences. University Park, PA, USA: The Pennsylvania State University.
- Portalanza, D., Ortega, C., Garzon, L., Bello, M., Zuluaga, C., Bresciani, C., Durigon, A., and Ferraz, S. (2024). Projected Heat Waves in Ecuador under Climate Change: Insights from HadGEM-RegCM4 Coupled Model. *Earth*. 5(1):90-109. <https://doi.org/10.3390/earth5010005>