

# SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

## XXVII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

### CUANDO LOS MODELOS COINCIDEN: SEÑALES ROBUSTAS DE CAMBIO EN LLUVIAS EXTREMAS EN CHILE CENTRAL

**FELAMIR BRAVO.<sup>1</sup>**  
**SOFIA GROSS S.<sup>2</sup>**  
**FELIPE GATEÑO<sup>3</sup>**  
**PABLO MENDOZA<sup>4</sup>**  
**ELIZABETH RAMIREZ<sup>5</sup>**  
**NICOLAS VASQUEZ<sup>6</sup>**

#### RESUMEN

En este trabajo, se evalúa el impacto del cambio climático en la magnitud y frecuencia de eventos de precipitación extrema en Chile Central (32°–37° S), utilizando proyecciones de 30 modelos de la sexta fase del Proyecto de Comparación de Modelos Acoplados (CMIP6 por sus siglas en inglés), corregidos con el método MBCn, bajo el escenario SSP5-8.5. Para ello, se considera un conjunto de métricas propuestas por el Equipo de Expertos en Detección e Índices del Cambio Climático (ETCCDI, por sus siglas en inglés), orientadas a la caracterización de eventos extremos de precipitación. Las métricas fueron calculadas para tres periodos: histórico (1980–2010); futuro cercano (2035–2065); y futuro lejano (2070–2099).

Los resultados proyectan, para las próximas décadas, una disminución generalizada en la intensidad y frecuencia de las precipitaciones extremas durante primavera y verano. En contraste, para otoño e invierno se proyectan patrones espaciales más heterogéneos, con aumentos en la magnitud de eventos extremos en sectores cordilleranos. El análisis de frecuencia proyecta reducciones de hasta un -39% en la magnitud de eventos con periodos de retorno de 2 años, mientras que para eventos menos frecuentes (T = 100 años), los cambios son menores, con variaciones entre -6% y +10%. A escala anual, se estima una disminución en la intensidad media diaria de las precipitaciones (SDII de hasta -16%) y en el número de días lluviosos, con descensos de hasta -30% en los índices R5mm a R20mm (número de días con precipitaciones diarias mayores a 5 y 20 mm, respectivamente).

---

<sup>1</sup> Estudiante de Magíster, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile. Ingeniero Civil, egresado del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío. email: [felamir.bravo@ug.uchile.cl](mailto:felamir.bravo@ug.uchile.cl)

<sup>2</sup> Ingeniera Civil, egresada del Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile. email: [sofia.gross@ug.uchile.cl](mailto:sofia.gross@ug.uchile.cl)

<sup>3</sup> Profesor titular, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile. email: [felipegateño96@gmail.com](mailto:felipegateño96@gmail.com)

<sup>4</sup> Profesor asociado, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile. email: [pamendoz@uchile.cl](mailto:pamendoz@uchile.cl)

<sup>5</sup> Estudiante de Doctorado, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile. email: [elizabeth.ramirez@ug.uchile.cl](mailto:elizabeth.ramirez@ug.uchile.cl)

<sup>6</sup> Profesor asociado, Universidad de Calgary. email: [nicolas.vasquez@ucalgary.ca](mailto:nicolas.vasquez@ucalgary.ca)

Finalmente, se observa un alto grado de acuerdo entre los modelos analizados respecto a los cambios proyectados en el índice Rx1day para eventos con periodos de retorno bajos ( $T = 2$  y 5 años). En cambio, para eventos más extremos ( $T = 100$  años), el nivel de acuerdo disminuye, situación similar a la observada en otros índices de alta intensidad como R50mm.

## 1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático de origen antrópico ha sido identificado como responsable de una fracción de las variaciones en condiciones meteorológicas observadas recientemente (Madakumbura et al., 2021; Salazar et al., 2024). Entre los cambios más relevantes se encuentran las alteraciones en la frecuencia e intensidad de eventos extremos, particularmente aquellos asociados a precipitación (Nanditha et al., 2025), así como temperatura y escorrentía (e.g., Ge et al., 2021).

En Sudamérica, diversos estudios han proyectado una tendencia a la reducción de la precipitación acumulada, acompañada de un aumento sostenido de la temperatura del aire (e.g., Almazroui et al., 2021). En Chile, estas proyecciones se reflejan en una señal robusta caracterizada por la reducción en los montos de precipitación anual en la Zona Central y la Patagonia Norte, con descensos que podrían alcanzar hasta un 40% hacia fines de siglo (Salazar et al., 2024). Paralelamente, se anticipa un incremento generalizado en la temperatura a nivel nacional, especialmente en el norte del país, donde los aumentos podrían superar los 6 °C bajo un escenario de altas emisiones (e.g., Vicuña et al., 2021; Salazar et al., 2024).

A pesar de las proyecciones de disminución en la precipitación anual, numerosos estudios han demostrado que los eventos de precipitación extrema podrían intensificarse bajo escenarios de cambio climático. Por ejemplo, Li et al. (2021) reportaron, a partir de resultados de 20 modelos del CMIP6 para el período 1851–2100, un aumento generalizado en la intensidad de la precipitación extrema a escala global, particularmente en los trópicos y latitudes altas, con eventos de periodo de retorno  $T = 50$  años que podrían volverse más frecuentes y aumentar en magnitud cerca de un 7% por cada grado de calentamiento.

Ge et al. (2021) analizaron extremos en el Sudeste Asiático utilizando 15 modelos CMIP6 y ocho índices ETCCDI, encontrando aumentos considerables en intensidad y frecuencia, especialmente en Indochina y el Archipiélago Malayo, con incrementos proyectados de hasta 102% en precipitación extrema. Reddy y Ray (2024) investigaron la evolución conjunta de extremos de precipitación en Asia del Sur y el Sudeste Asiático con 19 modelos CMIP6 escalados estadísticamente, proyectando aumentos en intensidad diaria bajo el escenario SSP5-8.5. En Estados Unidos, Nanditha et al. (2025) emplearon 22 modelos CMIP6 y la distribución extendida de Pareto generalizada (ExtGPD) para analizar eventos de  $T = 100$  años entre 2031–2100, detectando aumentos superiores al 50% en magnitud bajo el escenario SSP5-8.5, con baja dispersión entre modelos.

En el caso de Chile, estudios previos se han enfocado en los impactos del cambio climático sobre la precipitación extrema. Recientemente, Toro et al. (2023) evaluaron en Rapa Nui la precipitación máxima y la Precipitación Máxima Probable (PMP) en ventanas de 24 y 72

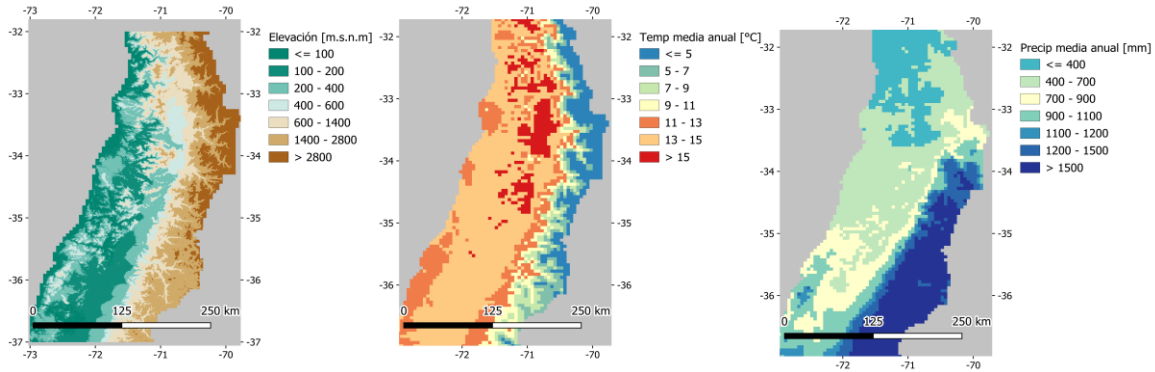
horas, utilizando 31 modelos climáticos globales bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5, proyectando un aumento en la magnitud de los eventos de precipitación extrema. Por su parte, Lagos-Zuñiga et al. (2024) analizaron tendencias estacionales de la precipitación máxima diaria (Rx1day) en Chile continental durante el período 1979–2017, a partir de datos de estaciones meteorológicas y del producto AgERA5. Sus resultados muestran un aumento de Rx1day en otoño en el norte chico (15–30°S) y en el extremo sur (45–57°S), mientras que en la Zona Central (30–36°S) predominan tendencias negativas, con algunas excepciones que evidencian incrementos en la costa durante el verano.

No obstante, aún persisten interrogantes sobre cómo el cambio climático afectará la magnitud y distribución espacial de eventos extremos, lo que representa un desafío para la gestión hídrica en Chile Central. En este estudio, se abordan las siguientes preguntas de investigación: **(i)** ¿cómo se proyectan los cambios en las magnitudes de precipitación extrema para periodos de retorno de 2 a 100 años en Chile Central?, y **(ii)** ¿hasta qué punto los modelos climáticos concuerdan en relación con dichos cambios? Para ello, se utiliza el conjunto de datos generado por Vásquez et al. (2025), basado en modelos de circulación general (GCM por sus siglas en inglés) del CMIP6, los cuales fueron escalados estadísticamente para la región centro-sur de Chile. A partir de estos datos, se evalúan los cambios en eventos de precipitación extrema proyectados hacia fines del siglo XXI, bajo el escenario de emisiones SSP5-8.5.

## **2. ZONA DE ESTUDIO**

El dominio de interés es Chile Central (Figura 1, 32°- 37° S), incluyendo sectores costeros, el valle central y la cordillera de Los Andes. Dicha zona presenta un marcado gradiente altitudinal (Figura 1a), que va desde el nivel del mar hasta más de 2.800 m.s.n.m., lo que influye notablemente en la distribución espacial de temperatura y precipitación (Ministerio del Medio Ambiente, 2018). En gran parte del territorio, los montos anuales de precipitación son inferiores a 900 mm/año, configurando un régimen semiárido. Para el periodo 1980-2010, la precipitación media anual varía desde menos de 400 mm/año en el noroeste hasta más de 1500 mm/año en el sureste, donde la orografía favorece mayores acumulaciones (Figura 1c). La temperatura media anual también refleja la influencia del relieve: zonas cordilleranas con menos de 5 °C, el valle central con valores superiores a 15 °C, y temperaturas moderadas en la costa debido a la influencia oceánica (Figura 1b).

La zona de estudio presenta un clima mediterráneo (clasificación Csb de Köppen; Aceituno et al., 2021), donde más del 90% de las lluvias ocurren durante el invierno austral (mayo a septiembre), mientras que los veranos (noviembre a marzo) son secos (Garreaud et al., 2009). Este patrón es modulado por fenómenos climáticos de escala regional; por ejemplo, El Niño aumenta la precipitación invernal en la zona centro-norte, mientras que La Niña intensifica el anticiclón subtropical del Pacífico, reduciendo la llegada de sistemas frontales y las lluvias (Montecinos y Aceituno, 2003; Boisier et al., 2016).



**Figura 1:** Caracterización de la zona de estudio, incluyendo (a) elevación, (b) temperatura media anual (1980–2010), y (c) precipitación anual promedio (1980–2010). Los datos provienen del producto observacional CR2MET v2.5 (Boisier, 2023), que proporciona datos diarios de precipitación y temperaturas máximas y mínimas con una resolución horizontal de  $0,05^\circ \times 0,05^\circ$ .

### 3. DATOS Y METODOLOGÍA

A partir de las series diarias de precipitación corregidas para los 30 modelos CMIP6 (Vásquez et al., 2025), se calcula los índices climáticos de precipitación extrema definidos por el ETCCDI (Tabla 2) de forma anual para cada modelo, y de manera estacional (primavera-verano y otoño-invierno) en el caso del índice Rx1day. Luego, se promedian los valores obtenidos por índice y modelo para tres ventanas temporales: período histórico (1980–2010), futuro cercano (2035–2065) y futuro lejano (2070–2099). Para cada celda del dominio y para cada periodo, se estima la mediana a partir de los resultados de modelos individuales. En particular, para las métricas Rx1day (estacional), primeramente, se efectúa un estudio de datos anómalos, en donde se identifican outliers por periodo y la tendencia estadística, mediante el test de Mann-Kendall. Se realiza un análisis de frecuencia para cada ventana temporal, obteniendo las magnitudes de precipitación asociadas a eventos con periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años, mediante el ajuste de la distribución Gumbel. Con estos valores, se calcula el cambio porcentual entre los promedios futuros y el histórico, utilizando la Ecuación (1). Además, se evalúa el grado de acuerdo entre modelos en cada celda, definido como la proporción de modelos que coinciden en el signo del cambio respecto a la mediana multimodelo, según lo indicado en la Ecuación (2). Finalmente, se calcula un promedio espacial de la zona de estudio mediante una ponderación de los valores de las medianas multimodelo de cada píxel para cada índice, permitiendo así caracterizar las tendencias proyectadas de manera integrada en el dominio.

#### 3.1. Proyecciones climáticas

Los datos utilizados fueron elaborados por Vásquez y Mendoza (2024), utilizando los procedimientos descritos por Vásquez et al. (2025), y consisten en series temporales diarias de precipitación y temperaturas máximas y mínimas para el territorio de Chile continental, con una resolución horizontal de  $0,05^\circ \times 0,05^\circ$  (aproximadamente 5 km), cubriendo el período comprendido entre 1950 y 2099. Dichas series provienen de la primera corrida del ensamble con la primera configuración de inicialización, física y forzamiento (r1i1p1f1) de 30 modelos climáticos globales (ver Tabla 1) del proyecto CMIP6 bajo el escenario SSP5-8.5 (Eyring et al., 2016), cuyas salidas fueron corregidas mediante el método *Multivariate Bias Correction*

using *N-dimensional Probability Density Function Transformation* (MBCn; Cannon 2018), el cual permite ajustar simultáneamente la distribución marginal y la dependencia multivariada entre variables climáticas.

**Tabla 1:** Modelos de circulación general utilizados en este estudio.

N°	Modelo CMIP6	Institución desarrolladora	N°	Modelo CMIP6	Institución desarrolladora
1	ACCESS-CM2	ARC, Australia	16	GFDL-ESM4	NOAA GFDL, USA
2	ACCESS-ESM1-5	CSIRO, Australia	17	INM-CM4-8	INM, Russia
3	BCC-CSM2-MR	BCC, China	18	INM-CM5-0	INM, Russia
4	CanESM5	CCCma, Canada	19	IPSL-CM6A-LR	IPSL, France
5	CMCC-ESM2	CMCC, Italy	20	KACE-1-0-G	NIMS & KMA, South Korea
6	CNRM-CM6-1-HR	CNRM, France	21	KIOST-ESM	KIOST, South Korea
7	CNRM-CM6-1	CNRM, France	22	MIROC-ES2L	JAMSTEC / AORI / NIES, Japan
8	CNRM-ESM2-1	CNRM, France	23	MIROC6	JAMSTEC / AORI / NIES, Japan
9	E3SM-1-0	LLNL, USA	24	MPI-ESM1-2-HR	MPI-M, Germany
10	EC-Earth3-CC	EC-Earth, Europe	25	MPI-ESM1-2-LR	MPI-M, Germany
11	EC-Earth3-Veg-LR	EC-Earth, Europe	26	MRI-ESM2-0	MRI, Japan
12	EC-Earth3-Veg	EC-Earth, Europe	27	NESM3	NUIST, China
13	EC-Earth3	EC-Earth, Europe	28	NorESM2-MM	NorESM, Norway
14	FGOALS-g3	CAS, China	29	TaiESM1	RCEC, Taiwan
15	GFDL-CM4	NOAA GFDL, USA	30	FGOALS-f3-L	CAS, China

### 3.2. Índices climáticos

Para cada uno de los GCMs analizados y para cada píxel, se calculan los índices climáticos propuestos por el ETCCDI (ver Tabla 2), obteniendo series anuales (por año hidrológico) de Rx1day, Rx5day, R5mm, R10mm, R20mm, R50mm, CDD, CWD, R95p, R99p y SDII para el periodo 1980-2099. Adicionalmente, y con el objetivo de evaluar posibles cambios en la estacionalidad de los eventos extremos, se analizan también las series de precipitaciones máximas diarias para los meses de primavera-verano (ONDEF, referido como Rx1day primavera-verano) y de otoño-invierno (MAMJJ, referido como Rx1day otoño-invierno)

Una vez obtenidas las series anuales de cada índice para los píxeles de cada GCM, se calcula el valor promedio para tres ventanas temporales: histórica (1980-2010); futuro cercano (2035-2065); y futuro lejano (2070-2099). En particular, para las métricas Rx1day (primavera-verano y para otoño-invierno), se realiza un análisis de frecuencia para cada ventana temporal, obteniendo magnitudes de eventos de precipitación asociados a periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años. El ajuste se realiza considerando una distribución de Gumbel, comúnmente empleada en la modelación de eventos extremos en hidrología (Singh et al., 2012; Khan et al., 2021).

**Tabla 2:** Índices ETCCDI de precipitación extrema utilizados en estudio (IPCC, 2021).

Abreviación	Unidad	Descripción
Rx1day	mm	Precipitación máxima diaria en el año.
Rx5day	mm	Precipitación máxima acumulada en 5 días consecutivos.
R5mm	días	Número de días con precipitación diaria mayor a 5 mm.
R10mm	días	Número de días con precipitación diaria mayor a 10 mm.
R20mm	días	Número de días con precipitación diaria mayor a 20 mm.
R50mm	días	Número de días con precipitación diaria mayor a 50 mm.
CDD	días	Máximo número de días consecutivos con precipitación menor a 1 mm.
CWD	días	Máximo número de días consecutivos con precipitación mayor a 1 mm.
R95p	mm	Precipitación total en días >1 mm que superan el percentil 95 de precipitación diaria.
R99p	mm	Precipitación total en días >1 mm que superan el percentil 99 de precipitación diaria.
SDII	mm día <sup>-1</sup>	Intensidad media de precipitación: total anual de días húmedos/número de días húmedos.

### 3.3. Cálculo de cambios proyectados

Finalmente, se analizan los cambios proyectados en la precipitación extrema de la zona de estudio, así como el grado de acuerdo entre diferentes modelos climáticos respecto a dichas proyecciones. A partir de los índices calculados para cada ventana temporal (histórico, futuro cercano y futuro lejano), se estima la tasa de cambio porcentual entre valores proyectados e históricos:

$$Tasa\ de\ Cambio\ (\%) = \frac{V_{futuro} - V_{histórico}}{V_{histórico}} \times 100 \quad (1)$$

Donde  $V_{histórico}$  es el valor promedio en el periodo 1980–2010 y  $V_{futuro}$  representa el valor promedio proyectado (2035–2065 o 2070–2099) para cada índice y modelo.

El grado de acuerdo entre modelos se calcula como la proporción de modelos que coinciden en el signo del cambio (aumento o disminución) respecto al cambio de la mediana multimodelo:

$$Grado\ de\ acuerdo\ (\%) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N II[Sign(\Delta_i) = sign(mediana(\Delta_i))] \times 100 \quad (2)$$

Donde  $\Delta_i = V_{futuro,i} - V_{histórico}$  es el cambio estimado por el modelo  $i$ ,  $N$  es el número de modelos y  $II$  es la función indicadora (1 si coinciden los signos, 0 si no).

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Cambios estacionales proyectados en los periodos de retorno del índice Rx1day

El análisis de datos anómalos reveló una variabilidad estacional y proyectada en la ocurrencia de outliers en los Modelos Climáticos Globales (GCMs) examinados. Específicamente, se observó que los GCMs exhiben una menor frecuencia de valores atípicos, para el Rx1day, durante los meses de invierno, con un promedio del 1,7% de píxeles clasificados como anómalos. Por el contrario, la media porcentual de outliers alcanzó un pico del 4,8% durante los meses de verano en un escenario de futuro lejano. Además, se identificó una tendencia estadística significativa ( $p < 0,05$ ) en aproximadamente el 5% del conjunto de datos. La mayor concentración de píxeles que presentan esta tendencia se localizó en los meses de

invierno de un futuro cercano, así como en los meses de verano de ambos períodos futuros proyectados.

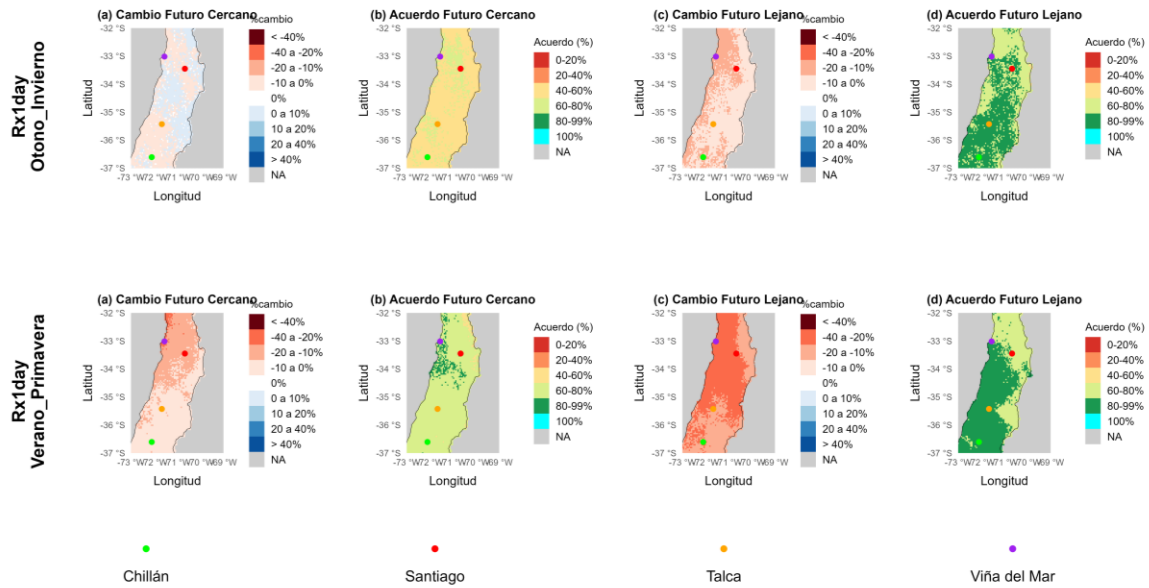
La Figura 3 muestra los cambios proyectados en Rx1day para T= 100 años. El grado de acuerdo entre los modelos de circulación general exhibe un patrón espacial heterogéneo. Durante los meses de primavera-verano, los modelos coinciden mayoritariamente en una disminución de Rx1day (T=100), tendencia que se acentúa hacia el futuro lejano. En cambio, en otoño-invierno, la concordancia entre modelos disminuye en gran parte del dominio, proyectando aumentos de precipitación en la zona cordillerana con un grado de acuerdo superior al 60%, mientras que en las zonas costeras y el sur predominan las proyecciones de disminución, aunque con menor grado de acuerdo (entre un 40% y 60%). En ninguna parte del dominio se alcanza un grado de acuerdo del 100%, lo que refleja la incertidumbre inherente de las proyecciones climáticas a corto y largo plazo.

Estos patrones también se reflejan en los resultados del promedio espacial del dominio de estudio (Tabla 3). En primavera-verano, se obtiene una disminución para todos los periodos de retorno, con cambios pronunciados en el futuro lejano (hasta -22% para T = 2 años y -13% para T = 100 años). En cambio, en otoño-invierno se proyectan aumentos en el futuro cercano, con un aumento de hasta +6% para T = 100 años), mientras que hacia el futuro lejano los cambios tienden a atenuarse o volverse negativos.

El acuerdo entre modelos es generalmente mayor en primavera-verano y para periodos de retorno bajos, alcanzando más del 80% para T = 2 años. En otoño-invierno y para T > 10 años, el consenso es moderado para el futuro cercano, pero disminuye hacia el futuro lejano (58% para T = 100 años), reflejando una mayor incertidumbre de los modelos en esa estación.

**Tabla 3:** Cambios proyectados en los promedios espaciales de la mediana multimodelo para periodos de retorno del índice Rx1day.

T [años]	Estación	Mediana Histórica	Cambio Futuro Cercano	Cambio Futuro Lejano	Acuerdo Futuro Cercano	Acuerdo Futuro Lejano
2	Otoño-Invierno	70 mm	0%	-9%	57%	81%
	Primavera-Verano	32 mm	-10%	-22%	72%	81%
5	Otoño-Invierno	91 mm	2%	-5%	59%	67%
	Primavera-Verano	46 mm	-6%	-18%	63%	76%
10	Otoño-Invierno	105 mm	3%	-3%	63%	61%
	Primavera-Verano	56 mm	-5%	-16%	60%	74%
25	Otoño-Invierno	122 mm	5%	-1%	66%	59%
	Primavera-Verano	68 mm	-3%	-15%	58%	72%
50	Otoño-Invierno	135 mm	5%	0%	67%	58%
	Primavera-Verano	77 mm	-3%	-14%	58%	70%
100	Otoño-Invierno	148 mm	6%	1%	68%	58%
	Primavera-Verano	85 mm	-2%	-13%	58%	69%



**Figura 3:** Cambios proyectados de la mediana multimodelo para  $T = 100$  años.

#### 4.2 Cambios anuales proyectados en los índices de intensidad y frecuencia

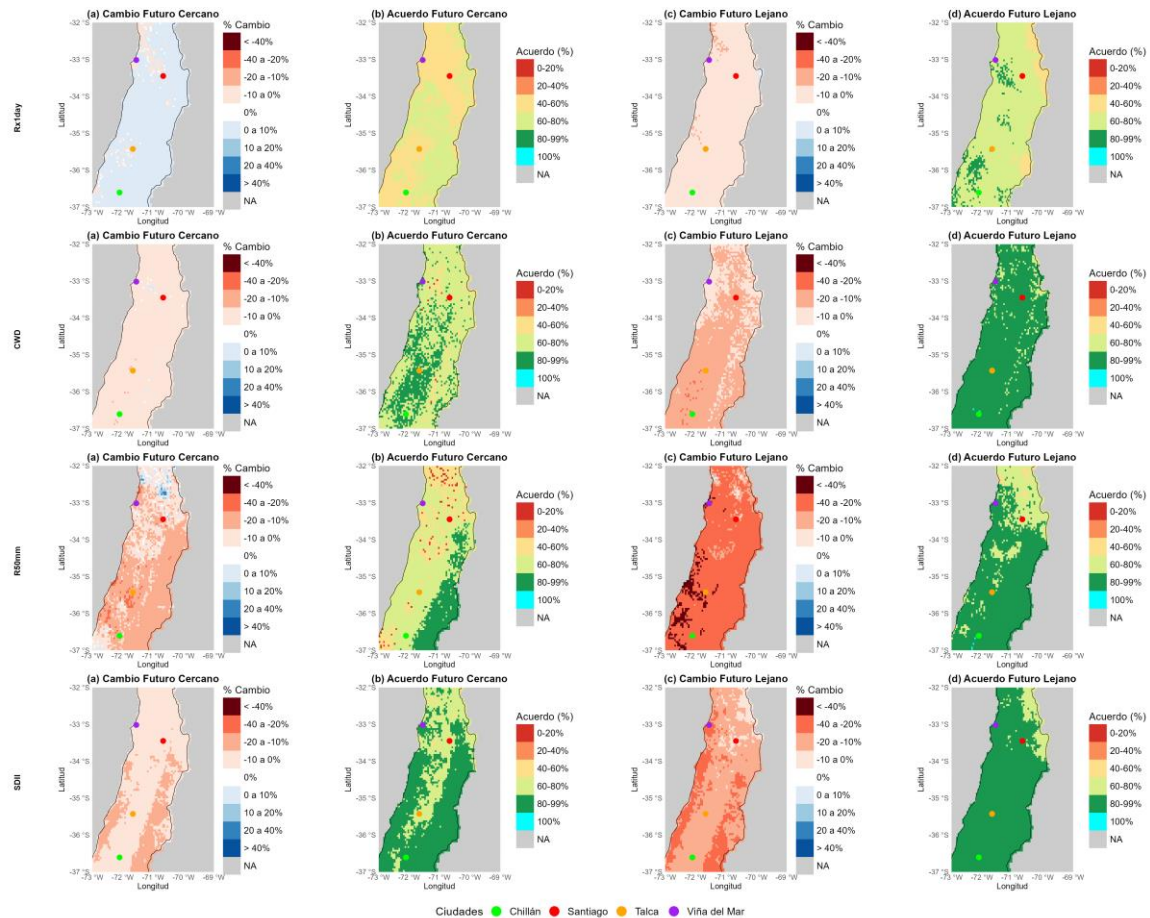
La Figura 4 muestra la distribución espacial proyectada de cuatro índices climáticos (Rx1day, R50mm, SDII y CDW), mientras que la Tabla 3 resume los valores promediados regionalmente para toda la zona de Chile Central, expresados como porcentaje de cambio respecto del período histórico, con excepción de la mediana histórica, que se presenta en unidades físicas.

Los resultados revelan una disminución generalizada en la frecuencia (R5mm a R50mm) e intensidad media en días lluviosos (SDII). Para el SDII, se proyecta una caída de -8% en el futuro cercano y -16% en el lejano, con altos niveles de acuerdo entre modelos (82% y 92%). De forma consistente, los índices R5mm, R10mm y R20mm, que contabilizan días con lluvia superior a 5, 10 y 20 mm respectivamente presentan reducciones entre -13% y -30%, lo que indica una menor recurrencia de precipitaciones de baja magnitud.

Para R50mm se proyecta una disminución de hasta -30% en el largo plazo, mientras que se proyectan caídas moderadas y mayor incertidumbre para los índices R95p y R99p, que representan la precipitación acumulada en los percentiles más altos. En particular, se proyecta una leve alza para R99p en el futuro cercano (+1%), pero una disminución del -9% hacia fines de siglo, con niveles de acuerdo de 58% y 76% entre modelos. Los máximos de precipitación diaria (Rx1day) y en cinco días (Rx5day) presentan cambios de menor magnitud y mayor variabilidad entre modelos, lo que refleja dificultades para proyectar eventos extremos puntuales.

**Tabla 3:** Cambios proyectados en los promedios espaciales de la mediana multimodelo para los índices ETCCDI.

Índice	Unidad	Mediana Histórica	Cambio Futuro Cercano	Cambio Futuro Lejano	Acuerdo Futuro Cercano	Acuerdo Futuro Lejano
SDII	mm/día	14	-8%	-16%	82%	92%
R5mm	días	45	-13%	-25%	92%	94%
R10mm	días	30	-15%	-28%	91%	94%
R20mm	días	16	-15%	-30%	88%	94%
R50mm	días	4	-10%	-30%	67%	86%
R95p	mm	235	-5%	-16%	66%	89%
R99p	mm	83	1%	-9%	58%	76%
Rx1day	mm	74	2%	-6%	59%	71%
Rx5day	mm	169	-4%	-14%	64%	89%
CWD	días	7	-5%	-12%	73%	88%
CDD	días	56	3%	8%	65%	78%



**Figura 4:** Cambios proyectados de la mediana multimodelo para los índices ETCCDI: (a) Rx1day, (b) CWD, (c) R50mm y (d) SDII.

## 5. DISCUSIÓN

Se observa que los modelos climáticos muestran una mayor concordancia en sus proyecciones del índice  $Rx1day$  para períodos de retorno bajos, disminuyendo esta coherencia a medida que el período de retorno aumenta. Este comportamiento es consistente con lo reportado por Hundhausen et al. (2024), quienes analizaron los cambios en los períodos de retorno de precipitaciones máximas diarias en Alemania y advirtieron una mayor incertidumbre en relación con los cambios en la magnitud de estos. A diferencia de Nanditha et al. (2025) quienes obtuvieron aumentos superiores al 50% en la magnitud de la precipitación máxima diaria para  $T=100$  años en Estados Unidos bajo el escenario SSP5-8.5 durante periodos similares a los del presente estudio (2031–2064 y 2067–2100), para Chile Central se proyectan aumentos y disminuciones en la Precipitación diaria ( $P_d(T=100)$ ), tanto para otoño-invierno como para primavera-verano. Sin embargo, los cambios proyectados para el futuro cercano y el futuro lejano son menores al 40%. Estas diferencias podrían reflejar las condiciones climáticas y topográficas particulares de cada dominio estacional. Asimismo, las metodologías estadísticas aplicadas y los horizontes temporales considerados pueden influir en la magnitud de las proyecciones, especialmente dependiendo del tratamiento de las colas en la distribución de probabilidad Gumbel.

## 6. CONCLUSIONES

Los resultados reflejan una clara señal de cambio en la distribución espacial de las precipitaciones extremas en Chile Central bajo un escenario de altas emisiones. Para la estación de primavera-verano se proyecta una disminución en la magnitud de los eventos extremos de precipitación, con alto grado de acuerdo entre modelos y mayores reducciones proyectadas para eventos de alto periodo de retorno. En contraste, durante otoño-invierno se proyectan aumentos en la magnitud de la precipitación máxima diaria en el corto plazo, especialmente en eventos extremos de alta recurrencia, aunque esta señal pierde fuerza hacia fines de siglo. Estas proyecciones evidencian una potencial intensificación de la estacionalidad de los eventos extremos.

En función de lo identificado a partir de los distintos índices analizados de forma anual, se proyecta que, a largo plazo, las lluvias serán menos intensas (i.e., disminución en  $Rx1day$ ,  $Rx5day$ ), menos frecuentes (i.e., disminución en  $R5mm$ ,  $R10mm$ ,  $R20mm$ ), con eventos húmedos más breves (i.e., disminución en CWD) y periodos secos más prolongados (i.e., aumento en CDD). Incluso en casos donde ocurran eventos de precipitación, se proyecta la disminución en la intensidad diaria promedio (SDII). Con respecto al grado de acuerdo entre los modelos climáticos, se proyecta una alta concordancia (entre un 80 % y 100 %) en varios indicadores, particularmente para el futuro lejano y para eventos con periodos de retorno bajos (2 y 5 años). Este nivel de consenso otorga mayor confianza a las proyecciones de disminución en la intensidad y frecuencia de la precipitación. El acuerdo es especialmente sólido en los índices  $Rx1day$ ,  $Rx5day$ ,  $R5mm$ ,  $R10mm$ ,  $R20mm$ , CWD, CDD y SDII.

## 7. REFERENCIAS

Aceituno, P., Boisier, J.P., Garreaud, R., Rondanelli, R., Rutllant, J.A. (2021). Climate and Weather in Chile. In: Fernández, B., Gironás, J. (eds) Water Resources of Chile. World Water Resources, vol 8. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-56901-3\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-030-56901-3_2)

Almazroui, M., Ashfaq, M., Islam, M. N., Rashid, I. U., Kamil, S., Abid, M. A., O'Brien, E., Ismail, M., Reboita, M. S., Sörensson, A. A., Arias, P. A., Alves, L. M., Tippet, M. K., Saeed, S., Haarsma, R., Doblus-Reyes, F. J., Saeed, F., Kucharski, F., Nadeem, I., Silva-Vidal, Y., Rivera, J. A., Ehsan, M. A., Martínez-Castro, D., Muñoz, Á. G., Ali, M. A., Coppola, E., & Sylla, M. B. (2023). Assessment of CMIP6 performance and projected temperature and precipitation changes over South America. *Climate Dynamics*, 61(9–10), 2587–2614. <https://doi.org/10.1007/s00382-023-06641-2>

Boisier, J. P. (2023). *CR2MET v2.5: Gridded climate data for Chile*. Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2).

Boisier, J. P., Alvarez-Garretón, C., Cordero, R. R., Damiani, A., Gallardo, L., Garreaud, R. D., ... & Rondanelli, R. (2016). Anthropogenic drying in central-southern Chile evidenced by long-term observations and climate model simulations. *Elementa: Science of the Anthropocene*, 4.

Cannon, A. J. (2018). Multivariate quantile mapping bias correction: an N-dimensional probability density function transform for climate model simulations of multiple variables. *Climate Dynamics*, 50(1), 31–49. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3580-6>

Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., & Taylor, K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9(5), 1937–1958.

Garreaud, R., Vuille, M., Compagnucci, R., & Marengo, J. (2009). Present-day South American climate. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 281(3–4), 180–195.

Ge, F., Zhu, S., Luo, H., Zhi, X., and Wang, H. (2021). Future changes in precipitation extremes over Southeast Asia: insights from CMIP6 multi-model ensemble. *Environmental Research Letters*, 16(2):024013.

Hundhausen, M., Feldmann, H., Kohlhepp, R., and Pinto, J. G. (2024). Climate change signals of extreme precipitation return levels for Germany in a transient convection-permitting simulation ensemble. *International Journal of Climatology*, 44(5):1454–1471.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2023). Annex VI: Climatic Impact-driver and Extreme Indices. In *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis* (pp. 2205–2214). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.020>

IPCC. (2021). Annex VI: Climatic Impact-driver and Extreme Indices (J. M. Gutiérrez, R. Ranasinghe, A. C. Ruane, & R. Vautard, Eds.). En V. Masson-Delmotte, 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, & B. Zhou (Eds.), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 2205–2214). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.020>

Ministerio del Medio Ambiente (2018). *Simulaciones climáticas regionales para Chile 2018*. Santiago, Chile.

Montecinos, A., & Aceituno, P. (2003). Seasonality of the ENSO-related rainfall variability in central Chile and associated circulation anomalies. *Journal of Climate*, 16(2), 281–296.

Nanditha, J., Villarini, G., and Naveau, P. (2025). Assessing future changes in daily precipitation extremes across the contiguous United States with the extended generalized Pareto distribution. *Journal of Hydrology*, page 133212.

Lagos-Zuñiga, M. A., Mendoza, P. A., Rondanelli, R., and Campos, D. (2023). Trends in seasonal precipitation extremes and associated temperatures along continental Chile.

Li, C., Zwiers, F., Zhang, X., Li, G., Sun, Y., and Wehner, M. (2021). Changes in annual extremes of daily temperature and precipitation in CMIP6 models. *Journal of Climate*, 34(9):3441–3460.

Reddy, V. M. and Ray, L. K. (2024). Past and future joint return period of precipitation extremes over South Asia and Southeast Asia. *Global and Planetary Change*, 239:104495

Singh, B., Rajpurohit, D., Vasishth, A., & Singh, J. (2012). PROBABILITY ANALYSIS FOR ESTIMATION OF ANNUAL ONE DAY MAXIMUM RAINFALL OF JHALARAPATAN AREA OF RAJASTHAN, INDIA. 12(2), 1093–1100.

Toro, I. , Jamett, H. M., Vidal, C. L., and Irrarrázaval, C. C. (2023). Sociedad chilena de ingeniería hidráulica XXVI congreso chileno de ingeniería hidráulica proyección de precipitaciones máximas y precipitación máxima probable para Rapa Nui, escenarios ssp 2-4,5 y 5-8,5. Technical report, SOCHID.

Vásquez, N., & Mendoza, P. A. (2025). *Statistically downscaled and bias corrected CMIP6 models for Continental Chile under scenario SSP5-8.5* [Dataset]. Harvard Dataverse. <https://doi.org/10.7910/DVN/O3YBOT>

Vásquez, N. A., Mendoza, P. A., Lagos-Zuñiga, M., Scaff, L., Muñoz-Castro, E., and Vargas, X. (2024). Robust spatial changes in climate classes: insights from bias-corrected CMIP6 models across Chile. *Environmental Research Letters*, 20(1):014061.

Vicuña, S., Vargas, X., Boisier, J. P., Mendoza, P. A., Gómez, T., Vásquez, N., & Cepeda, J. (2021). Impacts of climate change on water resources in Chile. En B. Fernández & J. Gironás (Eds.), *Water Resources of Chile* (pp. 347–363). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-56901-3\\_19](https://doi.org/10.1007/978-3-030-56901-3_19)