

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXVII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**PROYECCIÓN DE LA OFERTA NATURAL DE RECURSOS HÍDRICOS
EN LA ISLA ROBINSON CRUSOE
BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO**

JAVIERA CARREÑO M.¹
ESTEBAN HINOSTROZA.²
MIGUEL LAGOS Z.³
ÁLVARO OSSANDÓN.⁴

RESUMEN

La Isla Robinson Crusoe recibe el suministro hídrico principalmente basado la escorrentía que generan las precipitaciones, siendo esta captada en quebradas. En este contexto se realiza este estudio con el fin de determinar cambios en la oferta hídrica en la isla bajo los escenarios de cambio climático: SSP2-4.5 y SSP5-8.5, utilizando modelos climáticos del proyecto CMIP6 previamente evaluados con las condiciones locales de precipitación y temperatura. Luego, se aplica el método de corrección de sesgo MBCn a los modelos seleccionados y, a partir de los datos corregidos, se estima la escorrentía disponible anual mediante el enfoque hidroclimático de Budyko y posteriormente mediante un modelo hidrológico conceptual: Sacramento Soil Moisture Accounting (SAC-SMA), calibrado previamente con una cuenca continental climáticamente similar. Los resultados muestran que, a finales de siglo, la disponibilidad del recurso cambiaría en promedio entre un 30% y 57%, bajo los escenarios evaluados, y de hasta un 80% para los caudales de 85% de probabilidad de excedencia, evidenciando una importante amenaza para disponibilidad hídrica futura

¹ Alumno, Departamento de Obras Civiles, Universidad Santa María – email: javiera.carreno.m@sansano.usm.cl

² Alumno, Departamento de Obras Civiles, Universidad Santa María – email: esteban.hinostroza@sansano.usm.cl

³ Profesor Asistente, Departamento de Obras Civiles, Universidad Santa María - email: miguel.lagos@usm.cl

⁴ Profesor Asistente, Departamento de Obras Civiles, Universidad Santa María – email: alvaro.ossandon@usm.cl

1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático representa uno de los mayores desafíos del siglo XXI, con impactos evidentes en el clima y la disponibilidad hídrica (Connors et al., 2021). En el caso de Chile continental, existe evidencia de la ocurrencia de una mega sequía debido a la disminución progresiva de las precipitaciones en la zona centro-sur (DGA, 2022; DMC, 2025), además de que se proyectan reducciones de ~30 % en las lluvias hacia fines de siglo (Gateño et al., 2024, Salazar et al., 2024). En contraste, las zonas insulares del país han sido escasamente abordadas por la literatura científica en relación con el cambio climático (Bustos, 2019).

En años recientes se han elaborado proyecciones climáticas con modelos climáticos globales (GCMs) del conjunto CMIP5, cuya baja resolución espacial (100-200 km) limita su aplicabilidad en ámbitos insulares reducidos. Para abordar esta dificultad, se hace necesario aplicar técnicas de reducción de escala, como la corrección de sesgo multivariada mediante mapeo de cuantiles (MBCn; Cannon, 2018), que permite ajustar las proyecciones climáticas a condiciones locales, mejorando su representatividad y manteniendo la coherencia estadística entre temperatura y precipitación.

Este estudio se centra en la isla Robinson Crusoe, ubicada a 670 kilómetros del continente, con una superficie de 48 km² y una población cercana a los mil habitantes (INE, 2022). Debido a su origen volcánico, carece de napas subterráneas y depende exclusivamente de captaciones superficiales para su abastecimiento de agua, el cual no cuenta con registros fluviométricos completos (Municipalidad Juan Fernández, 2025). Esta situación genera incertidumbre sobre la capacidad real de abastecimiento, la cual se ve cada vez más comprometida por los efectos del cambio climático, que incluyen un aumento de los eventos extremos con impactos tanto en los ecosistemas como en la población residente (Ortíz A & Campillo R, 1982).

Ante este escenario, es fundamental avanzar en estudios que permitan proyectar la disponibilidad hídrica futura y orientar estrategias de gestión que aseguren un abastecimiento sostenible para la población. Para ello, se implementa el modelo hidrológico conceptual Sacramento Soil Moisture Accounting (SAC-SMA) (Burnash et al., 1973) en su versión concentrada, que representa la cuenca como una unidad única y resulta adecuado para simular procesos hidrológicos en territorios de pequeña escala con condiciones geográficas y climáticas complejas. A partir de información meteorológica diaria —precipitación, temperatura y evapotranspiración potencial—, el modelo genera caudales de salida que permiten evaluar la oferta hídrica de la isla y apoyar la toma de decisiones frente a los desafíos que impone el cambio climático.

DATOS Y MÉTODOS

La isla Robinson Crusoe presenta un clima templado cálido con lluvias invernales y una precipitación anual promedio cercana a 1000 mm con lluvias diarias generalmente en zonas sobre los 500 m s.n.m (INE, 2022), además presenta una temperatura media anual de 15°C. Cuenta con dos estaciones meteorológicas, La Punta y Juan Fernández, siendo esta última la de registros más extensos y continuos (Figura 1).

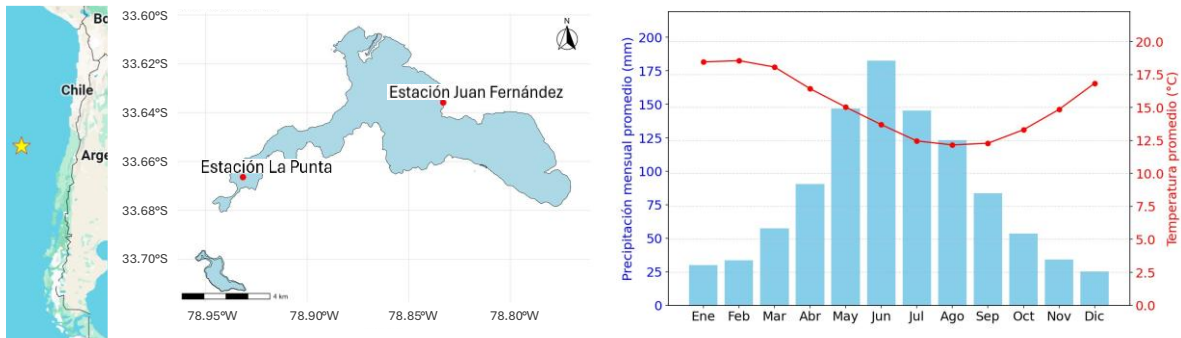


Figura 1. Mapa de ubicación de la isla Robinson Crusoe, junto con sus dos estaciones y captaciones. Además, se presenta el climograma elaborado con datos de precipitación y temperatura diarias de la estación Juan Fernández de la DMC para el periodo 1985-2014.

Para este estudio se utilizan datos de precipitación y temperatura diaria de la estación Juan Fernández de la DMC y 31 modelos del proyecto CMIP6 (IPCC, 2023; listados en la Tabla 1). Se analiza un periodo histórico de 30 años (1985–2014), que permite evaluar el ajuste de los modelos a las condiciones históricas, y posteriormente, se realizan proyecciones futuras para finales del siglo. Estas se evalúan bajo dos escenarios de cambio climático de trayectorias socioeconómicas compartidas: SSP2-4.5, que representa un escenario intermedio de mitigación, y SSP5-8.5, que proyecta un desarrollo basado en combustibles fósiles.

Tabla 1: Modelos climáticos evaluados.

ID	Modelo	Resolución (lat x lon)°	ID	Modelo	Resolución (lat x lon)°	ID	Modelo	Resolución (lat x lon)°
1	ACCESS-CM2	1.3 x 1.9	11	EC-Earth3-Veg	0.7 x 0.7	21	IPSL-CM5A2-INCA	2 x 2
2	ACCESS-ESM1-5-gn	1.2 x 1.9	12	EC-Earth3-Veg-LR	1.1 x 1.1	22	IPSL-CM6A-LR-gn	1.3 x 2.5
3	BCC-CSM2-MR-gn	1.1 x 1.1	13	FGOALS-f3-L	1 x 1.3	23	KIOST-ESM-gr1	1.9 x 1.9
4	CanESM5-gn	2.8 x 2.8	14	FGOALS-g3-gn	2 x 2	24	MIROC6-gn	1.4 x 1.4
5	CESM2-WACCM-gn	0.9 x 1.3	15	GFDL-CM4-gr1	1 x 1.3	25	MPI-ESM1-2-HR-gn	0.9 x 0.9
6	CMCC-CM2-SR5-gn	0.9 x 1.3	16	GFDL-CM4-gr2	2 x 2.5	26	MPI-ESM1-2-LR-gn	1.9 x 1.9
7	CMCC-ESM2-gn	0.9 x 1.3	17	GFDL-ESM4-gr1	1 x 1.3	27	MRI-ESM2-0-gn	1.1 x 1.1
8	EC-Earth3-CC	0.7 x 0.7	18	IITM-ESM-gn	1.9 x 1.9	28	NESM3-gn	1.9 x 1.9
9	EC-Earth3	0.7 x 0.7	19	INM-CM4-8-gr1	1.5 x 2	29	NorESM2-LM-gn	1.9 x 2.5
10	EC-Earth3-AerChem	0.7 x 0.7	20	INM-CM5-0-gr1	1.5 x 3	30	NorESM2-MM-gn	0.9 x 1.3
						31	TaiESM1-gn	0.9 x 1.3

Para procesar los modelos, se recorta un área de 3° de latitud y longitud alrededor de la estación Juan Fernández de la DMC, abarcando la zona de influencia del estudio. Luego, se aplica una ponderación por inverso de la distancia para obtener, a partir de las celdas del recorte, un único valor diario de precipitación o temperatura por modelo para toda la isla.

Con el fin de obtener proyecciones robustas y representativas a escala local, se seleccionaron los GCMs con mejor desempeño histórico mediante el índice de desempeño pasado (PPI) de Gateño et al. (2024), el cual sintetiza la capacidad de cada modelo para reproducir la climatología local a partir de la eficiencia de Kling-Gupta y la distancia euclidiana respecto a los valores óptimos. Para su cálculo se consideran cinco métricas (M_y^x), listadas en la Tabla 2, que evalúan distintos aspectos del desempeño climático de los modelos. Como resultado, se consideran en primera instancia, el 65% de los modelos que presentan los menores valores de ED y como segunda condición, valores de PPI_{pr} y PPI_{tas} superiores a 0.5.

Tabla 2: Ecuaciones para cálculo del PPI.

Ecuación	Descripción	N°
$M_{\mu_P}^{yr} = \frac{\mu_s^P}{\mu_o^P}$	Cuantifica sesgo en los valores medios anuales simulados de precipitación.	(1)
$M_{\mu_T}^{yr} = 1 - \frac{\mu_o^T - \mu_s^T}{\max(T_o) - \min(T_o)}$	Cuantifica sesgo en los valores medios anuales simulados de temperatura.	(2)
$M_{\sigma}^{yr} = \frac{\sigma_s}{\sigma_o}$	Cuantifica la capacidad para reproducir la variabilidad interanual mediante la desviación estándar.	(3)
M_r^{seas}	Coefficiente de correlación de Pearson para valores mensuales y evalúa capacidad de replicar ciclos interanuales.	(4)
$M_{\sigma}^{seas} = \frac{\sigma_s^{seas}}{\sigma_o^{seas}}$	Cuantifica el sesgo en la amplitud del ciclo anual a través de la desviación estándar mensual.	(5)
$M_{PSS}^{month} = \sum_{i=1}^n \min(Z_{m_i}, Z_{o_i})$	Perkins Skill Score para datos mensuales normalizados. Evalúa la capacidad de reproducir la función de densidad de probabilidad. Donde n es el número de intervalos usados para calcular la PDF. Z_{m_i} y Z_{o_i} son las frecuencias de los valores modelados y observados en cada intervalo i .	(6)
$PPI_{i,j} = 1 - \sqrt{\sum_{k=1}^{N=5} S_k \cdot (1 - M_{i,j,k})^2}$	$M_{i,j,k}$ es la métrica k obtenido por el modelo j para la variable i , y S_k corresponde a un factor de ponderación, que para este estudio es de 0.2 para cada métrica.	(7)
$ED = \sqrt{(1 - PPI_{pr})^2 - (1 - PPI_{tas})^2}$	Distancia euclidiana con respecto a los respectivos valores óptimos, es decir $PPI_{pr} = 1$ y $PPI_{tas} = 1$. Representa el desempeño en conjunto de ambas variables.	(8)

De forma complementaria, se utiliza el diagrama de Taylor (Taylor, 2001), que permite representar gráficamente la similitud entre simulaciones de los modelos y observaciones en términos de correlación, desviación estándar y error cuadrático. Para este enfoque se analizan datos mensuales y normalizados, seleccionando el 65% de modelos con mejor rendimiento. Una vez contrastados ambos enfoques, se seleccionan los modelos que cumplen ambos criterios y, de ese grupo, se aplica una selección por genealogía de código, priorizando en cada familia el modelo con menor valor de ED para reducir redundancias y asegurar mayor diversidad (Gateño et al., 2024).

Con los modelos seleccionados, se utiliza el método Multivariate Quantile Mapping Bias Correction (MBCn; Cannon, 2018), para adaptar las simulaciones climáticas a las condiciones locales de la isla. Este método busca igualar las funciones de distribución acumulada entre las series observadas y modeladas, considerando la precipitación y la temperatura como co-variables interdependientes. Se adopta además una estratificación temporal estacional, puesto que se ha mostrado que esta decisión influye directamente en las proyecciones climáticas, asegurando así la correcta representación estacional de las condiciones históricas (Vásquez et al., 2024).

Con las proyecciones climáticas de precipitación y temperatura ya corregidas por sesgo se aplica el enfoque hidroclimático de Budyko (Budyko, 1974) para analizar la respuesta del sistema hídrico de la isla frente al cambio climático. Este enfoque permite representar de manera simple la distribución de la precipitación, la evapotranspiración y la escorrentía (Wang et al., 2016).

La ecuación del marco de Budyko (Ec. 9), describe la relación entre la evapotranspiración real y el índice de aridez. Esta considera que la cantidad de agua evaporada depende directamente de la disponibilidad hídrica en la cuenca, representada por la precipitación, en relación con la energía disponible para evaporar, representada por la evapotranspiración potencial (Mianabadi et al., 2020).

$$\frac{E}{P} = \left\{ \frac{E_p}{P} \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{E_p}{P}\right) \right] \cdot \tanh\left[\left(\frac{E_p}{P}\right)^{-1}\right] \right\}^{0.5} \quad (9)$$

Para estimar el balance hídrico anual, se utiliza la ecuación 10, que representa una forma simplificada de la ecuación de escorrentía anual promedio (Q), como la diferencia entre la precipitación anual promedio (P) y la evapotranspiración real (ET_{real}) obtenida mediante la ecuación 9. Este cálculo se realiza para los periodos 1985-2014, 2015-2039, 2040-2069, 2070-2100:

$$Q \approx P - ET_{real} \quad (10)$$

Adicionalmente, se implementa un modelo hidrológico para representar el funcionamiento del sistema hídrico insular. Dado que en la isla no existen registros de caudal observados que permitan realizar una calibración directa de los modelos hidrológicos, se opta por aplicar un enfoque de transferencia de parámetros desde una cuenca continental donante. Este procedimiento permite aprovechar información hidrológica existente en una cuenca con condiciones similares y extrapolar los parámetros calibrados hacia la isla.

La cuenca donante fue seleccionada mediante el uso del índice de disimilitud propuesto por Beck et al. (2016b), definido en la Ecuación 11, que permite cuantificar el grado de similitud entre distintas cuencas en función de variables climáticas y fisiográficas. En este estudio, se consideraron cinco criterios: índice de aridez (IA), que caracteriza el balance entre disponibilidad de agua y demanda atmosférica; precipitación media anual (P) y temperatura media anual (TA), que representan el régimen climático dominante; coeficiente de compacidad (CC), que refleja la forma y concentración del drenaje; y pendiente media (PM), que condiciona la velocidad del flujo y los procesos de escorrentía. Estos indicadores fueron seleccionados por su capacidad de captar los principales controles físicos del comportamiento hidrológico, asegurando que la cuenca donante comparta similitudes estructurales con la isla en términos de clima y morfometría. La cuenca con el menor valor de disimilitud fue utilizada como cuenca donante para la transferencia de parámetros y posterior simulación del comportamiento hidrológico en la isla.

$$S_{i,j} = \sum_{p=1}^{n_p} \frac{|Z_{p,i} - Z_{p,j}|}{IQR_p} \quad (11)$$

Donde:

- n_p : número total de atributos considerados.
- $Z_{p,i}$ y $Z_{p,j}$: valor del atributo número p para la cuenca y el píxel respectivamente.
- IQR_p : rango intercuartil del atributo p.

Para este estudio se utiliza el modelo conceptual Sacramento Soil Moisture Accounting (SAC-SMA) (Burnash et al., 1973), que simula caudales a partir de precipitación, temperatura y, opcionalmente, evapotranspiración potencial. Este modelo opera bajo una configuración lumped, es decir, trabaja con valores promedios a nivel de cuenca sin considerar heterogeneidad espacial en los forzantes ni en los parámetros. Su estructura se compone de cinco módulos principales que procesan el ciclo hidrológico de forma secuencial: un módulo maestro (Hidrosim), un módulo de nieve (SNOW-17), un módulo de cálculo de la evapotranspiración potencial (basado en Hamon), el módulo SAC-SMA propiamente tal —que estima los flujos de evapotranspiración, escorrentía y flujo subterráneo— y un módulo de enrutamiento para determinar el caudal de salida.

La calibración del modelo se realizó utilizando el algoritmo de optimización SCE-UA (Shuffle Complex Evolution; Duan, 1992), minimizando la diferencia entre los caudales simulados y observados en la cuenca donante. Se definieron tres periodos en función de la disponibilidad de datos: un periodo de warm-up (01/04/1979–31/03/1983), un periodo de calibración (01/04/1983–31/03/1999) y un periodo de validación (01/04/1999–31/12/2019).

Este proceso permitió la calibración automática de los 26 parámetros que controlan los distintos procesos hidrológicos del modelo SAC-SMA, representando aspectos clave como la capacidad de almacenamiento del suelo, la percolación, el flujo base, el escurrimiento superficial y la evapotranspiración potencial. Si bien el modelo incluye parámetros asociados al módulo SNOW-17, estos no se consideraron, dado que las temperaturas medias en la isla se mantienen por encima de los 0 °C, descartando la presencia de procesos nivales.

2. RESULTADOS

Evaluación de GCMs

La Figura 2 muestra un diagrama que resume los valores del índice de desempeño pasado para precipitación y temperatura, donde el valor ideal ($PPI_{tas} = PPI_{pr} = 1$) se ubica en la esquina superior izquierda y representa el mejor ajuste simultáneo para ambas variables. Al considerar las cinco métricas previamente descritas, se observa que la mayoría de los modelos presenta un buen desempeño en ambas variables, con valores del índice ligeramente superiores para temperatura que para precipitación.

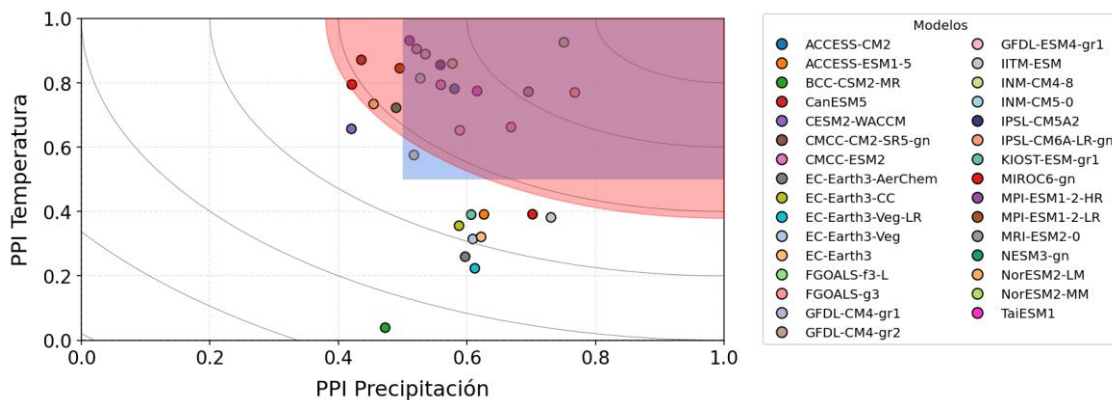


Figura 2. Índice de desempeño pasado para precipitación (eje x) y temperatura (eje y) donde cada punto representa un GCM.

Para el segundo enfoque, la Figura 3 presenta los diagramas de Taylor para datos mensuales de precipitación y temperatura, donde se observa que los modelos más cercanos al punto de observación son los que mejor representan las condiciones climáticas de la isla. En el caso de la precipitación, los modelos reproducen adecuadamente la correlación mensual, aunque tienden a subestimar la desviación estándar. Para la temperatura, en cambio, muestran una correlación alta (superior a 0.9) y una distribución estándar más homogénea, lo que indica que capturan con mayor precisión esta variable en comparación con la precipitación, cuya variabilidad es subestimada.

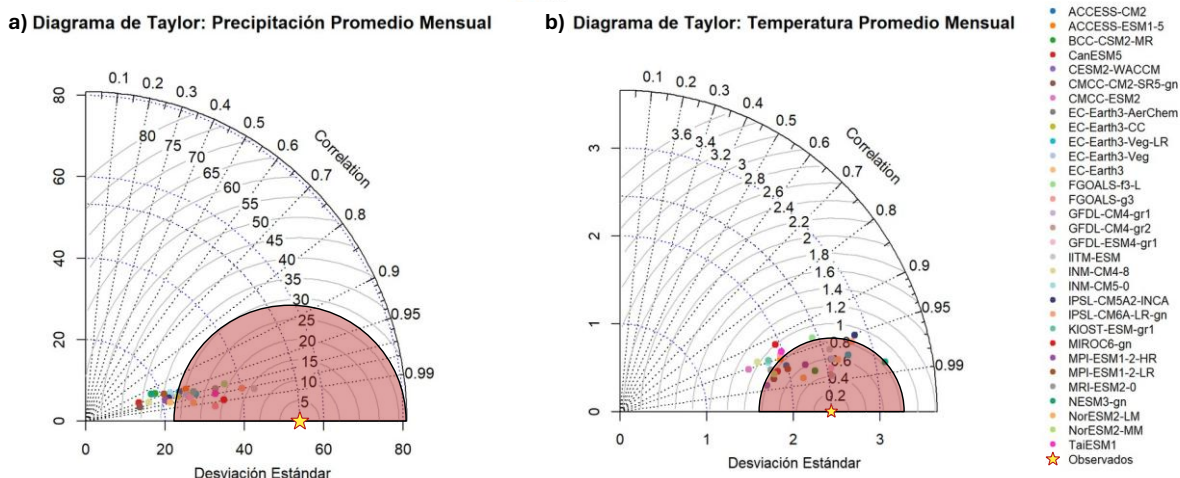


Figura 3. (a) Diagrama de Taylor para precipitación mensual promedio simulada por los GCMs. **(b)** Diagramas de Taylor para temperatura promedio mensual simulada por los GCMs.

Como resultado del proceso de selección, que incluye tanto la evaluación estadística como el criterio de genealogía de código, se obtuvo el siguiente conjunto de 7 modelos que representan de forma más precisa las condiciones climáticas en la isla Robinson Crusoe: IPSL-CM6A-LR, MRI-ESM2-0, NorESM2-MM, ACCESS-CM2, FGOALS-g3-gn, GFDL-CM4-gr y MPI-ESM1-2-HR en orden decreciente de PPI, es decir, desde mejor a peor desempeño.

Corrección de sesgo y procesamiento hidrológico

La figura 4 presenta los gráficos de las series de precipitación y temperatura históricas y proyecciones corregidas para los escenarios SSP2-4.5 Y SSP5-8.5. En ellas se aprecia que, hasta cerca de 2060, la precipitación y la temperatura media anual presentan comportamientos similares en ambos escenarios. A partir de esa fecha, las trayectorias se separan por escenario, donde para fines de siglo (2070–2100), bajo el escenario más desfavorable SSP5-8.5, la precipitación anual media disminuye en promedio 270 mm (-26.8%), mientras que la temperatura media aumenta en 2 °C. En el escenario de emisiones intermedias SSP2-4.5, la precipitación se reduce en promedio 120 mm (-12.2%) y la temperatura incrementa en 1 °C.

Para evaluar la variabilidad entre los modelos, se calcula la desviación estándar de las proyecciones. En el periodo final de análisis (2070-2100), la desviación estándar para la temperatura alcanzó valores de 0.6°C y 0.4°C bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5,

respectivamente. Y en el caso de la precipitación es de precipitación media anual alcanza valores de 41.4 y 39 mm/año por escenario.

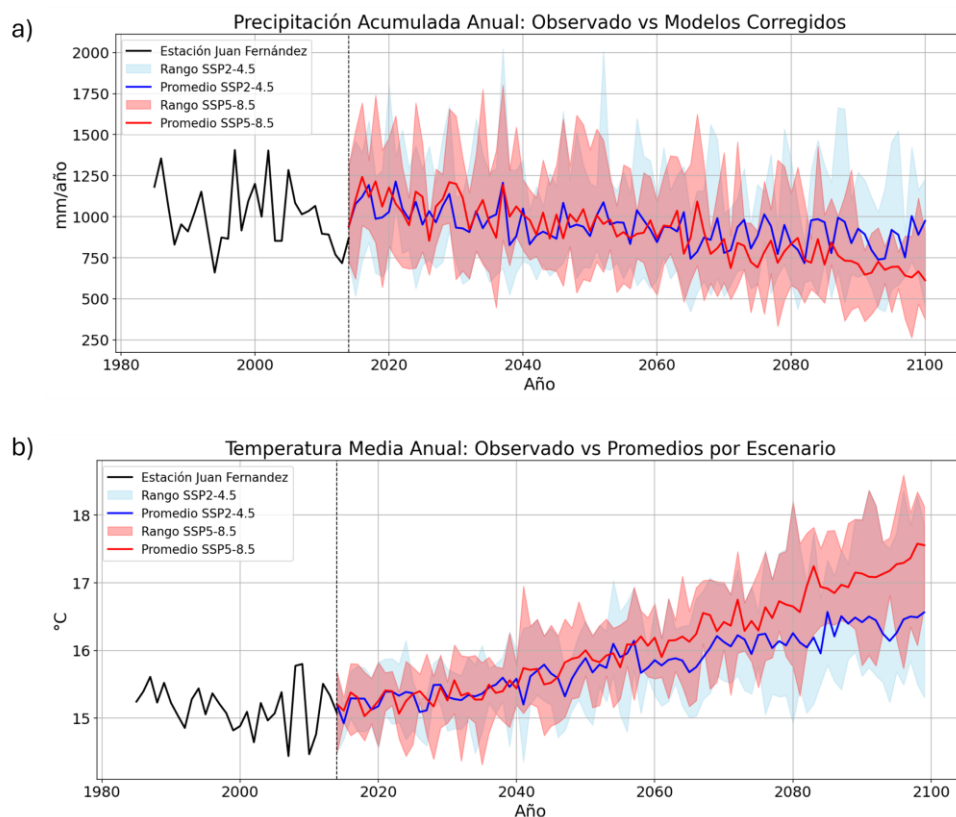


Figura 4: Series históricas y proyecciones corregidas de **(a)** precipitación media anual y **(b)** temperatura media anual, donde las áreas sombreadas representan el rango de valores proyectados por los modelos para los escenarios SSP2-4.5 (celeste) y SSP5-8.5 (rojo). La línea negra corresponde a los datos observados de la estación Juan Fernández, mientras que las líneas azul y roja indican el promedio de los modelos para cada escenario.

A partir de estos resultados se estima un valor provisorio de escorrentía utilizando un enfoque de tipo Budyko. Para ello, primero se calculan los valores de evapotranspiración potencial aplicando la fórmula propuesta por Oudin et al. (2005). Con este valor, se ingresa en la Ecuación 9, lo que permite obtener la evapotranspiración real de la cuenca y finalmente, mediante una forma simplificada de la Ecuación 10, se determina un valor aproximado de escorrentía, cerrando así el balance hídrico estimado bajo las condiciones futuras proyectadas.

Los resultados mostrados tanto en la Figura 5 como en la Tabla 3 muestran una tendencia clara hacia una reducción progresiva de los caudales y la precipitación a lo largo del siglo XXI, de forma más pronunciada en el SSP5-8.5. Mientras en el corto plazo (2015–2039) aún se observan leves aumentos o estabilidad, a partir de mediados de siglo la mayoría de los modelos proyectan caídas significativas, alcanzando reducciones de hasta un 56 % en la escorrentía.

En la Tabla 3 se observa que los valores de las desviaciones estándar reflejan la incertidumbre inherente de las proyecciones. En el caso de la escorrentía, estas fluctúan en rangos moderados (4–14 %), lo que indica que, pese a la variabilidad entre modelos, la tendencia a la disminución es consistente.

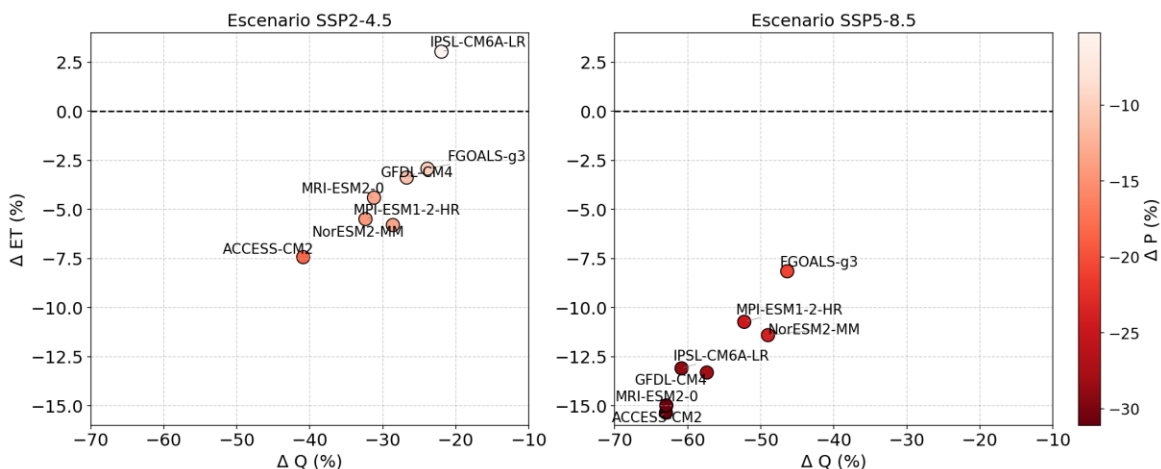


Figura 5. Variaciones proyectadas de Q, P y ETP bajo SSP2-4.5 y SSP5-8.5 para finales del siglo.

Tabla 3: Cambio (Δ) en la escorrentía media anual (Budyko), precipitación anual promedio y temperatura media anual proyectadas por modelos para distintos periodos bajo SSP2-4.5 y SSP5-8.5 y la desviación estándar de las proyecciones obtenidas por los GCMs seleccionados.

Periodo	Escenario SSP2-4.5						Escenario SSP5-8.5					
	Δ_Q (%)	σ_Q (%)	Δ (%)	σ_P (%)	Δ ($^{\circ}C$)	σ_T ($^{\circ}C$)	Δ_Q (%)	σ_Q (%)	Δ (%)	σ_P (%)	Δ ($^{\circ}C$)	σ_T ($^{\circ}C$)
2015-2039	2.9	9.8	1.8	4.6	0.2	0.1	14.1	14.0	6.9	6.3	0.2	0.1
2040-2069	-20.1	9.0	-8.4	4.3	0.6	0.2	-19.5	10.1	-7.7	5.1	0.8	0.3
2070-2100	-29.4	6.3	-12.2	4.1	1.1	0.6	-56.0	6.8	-26.8	3.9	1.8	0.4

Modelación hidrológica

La calibración del modelo hidrológico se basó en la selección de cuencas de régimen pluvial ubicadas entre las regiones de Coquimbo y Biobío, considerando criterios como tamaño moderado, disponibilidad de registros hidrológicos y climáticos, ausencia de flujo base visible y localización en zonas costeras. A partir de esta selección, se calculó el índice de disimilitud entre la isla y las cuencas candidatas, empleando variables representativas de sus características climáticas y fisiográficas.

En la Figura 6a, se comparan los valores de cada atributo para las cuencas evaluadas, destacándose la isla en color rojo. Se observa que, en los paneles correspondientes al índice de aridez (IA) y la pendiente media (PM), la isla se distancia considerablemente del resto de las cuencas, reflejando sus condiciones más extremas tanto climáticas como geomorfológicas. En contraste, para las demás variables, las diferencias son menores, evidenciando una mayor similitud con algunas cuencas continentales. En particular, en el panel de precipitación media anual (P), la cuenca del Río Cauquenes presenta la mayor cercanía a los valores de la isla, seguida por Estero Bellavista; para la temperatura media anual (TA), las cuencas más próximas son Estero Culebrón y Estero Punitaqui; mientras que,

en el caso del índice de compacidad (CC), nuevamente el Río Cauquenes exhibe una alta similitud.

La Figura 6b presenta los resultados del índice de disimilitud total, identificando a la cuenca del Río Cauquenes (-36.02°, -72.38°) como la más similar, con un área de 622.1 km² y una elevación media de 308 m.s.n.m.

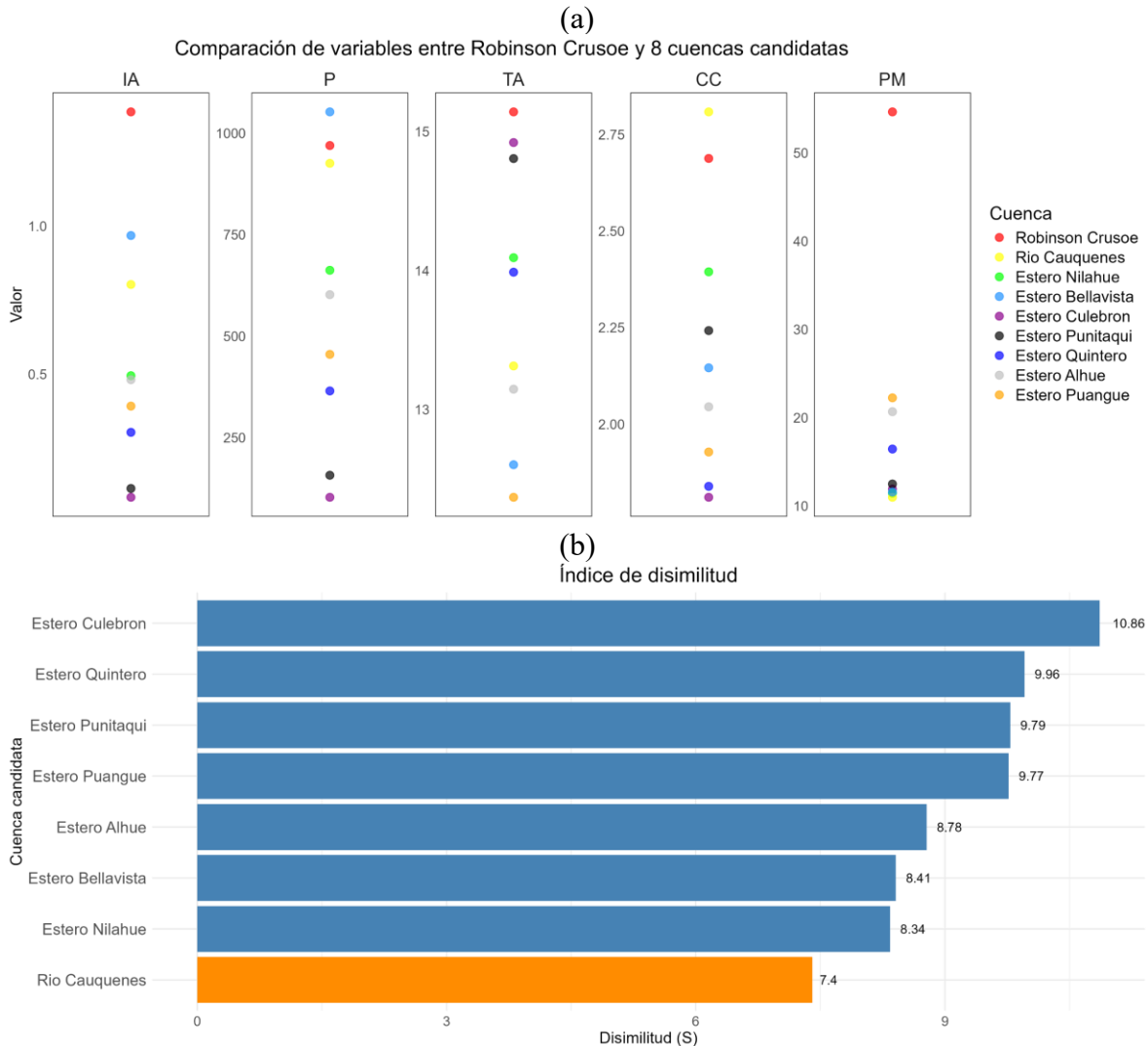


Figura 6: (a) Comparación variables climatológica y fisiográficas. (b) Cálculo de índice de disimilitud.

A partir de esta selección, se ejecutó la calibración del modelo SAC-SMA para dicha cuenca, considerando 25 000 iteraciones y obteniendo un valor óptimo de 0.83 para la función objetivo KMoments. Los resultados se resumen en la Tabla 4, donde se presentan los valores obtenidos para cada parámetro junto con sus rangos óptimos. En esta tabla destaca el parámetro PFREE, cuyo valor cercano a su límite superior sugiere una alta sensibilidad del modelo frente a los procesos de percolación y recarga subterránea.

Tabla 4: Rango y resultado de calibración – Parámetros SAC-SMA.

Parámetro	Valor mínimo	Valor máximo	Valor obtenido
UZTWM	1	150	149.975
UZFWM	1	150	90.830
LZTWM	1	500	65.307
LZFPM	1	1000	123.745
LZFSM	1	1000	270.834
ADIMP	0.1	0.5	0.220
LZPK	0.0001	0.025	0.013
UZK	0.01	0.25	0.146

Parámetro	Valor mínimo	Valor máximo	Valor obtenido
ZPERC	1	250	80.109
REXP	1	5	2.815
LZSK	0	0.6	0.427
PCTIM	0	0.1	0.047
PFREE	0	0.4	0.400
N	0.9	10	9.998
K	0.1	1	0.216
HAMON	0.1	2	1.634

Tras calibrar el modelo en la cuenca donante, se aplican los parámetros a la isla para estimar los caudales futuros bajo ambos escenarios de emisiones, utilizando las proyecciones de temperatura y precipitación de los modelos climáticos. En la Tabla 5 se presentan resultados consistentes con los obtenidos mediante el enfoque de Budyko, evidenciando un aumento moderado en el futuro cercano, seguido de una disminución progresiva hacia fines de siglo, con reducciones de 30.9% y 57.5% por escenario. Asimismo, el Q85 muestra disminuciones aproximadas de -54.1% y -80.4% en los mismos escenarios hacia finales de siglo. Por su parte, la Figura 7 permite de visualizar la variabilidad entre las proyecciones de los modelos. Se aprecia una mayor concordancia en la escurrentía media anual, mientras que los caudales Q50 y Q85 exhiben mayor dispersión. Esta diferencia sugiere que, si bien las proyecciones de escurrentía son relativamente consistentes entre modelos, la estimación de caudales muestra una mayor sensibilidad frente a las condiciones climáticas futuras.

Tabla 5: Promedios de variación porcentual de la escurrentía media anual y caudales proyectados bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5.

Escurrentía/ Caudal	Variación para SSP2-4.5 [%]			Variación para SSP5-8.5 [%]		
	2015-2039	2040-2069	2070-2100	2015-2039	2040-2069	2070-2100
$Q_{\text{anual Budyko}}$	2.93	-20.08	-29.38	14.08	-19.54	-55.97
$Q_{\text{anual Modelo}}$	3.92	-21.60	-30.87	14.68	-19.95	-57.50
Q_{50}	0.98	-24.14	-35.99	10.84	-23.35	-60.32
Q_{85}	-6.13	-39.95	-54.06	7.55	-37.90	-80.38

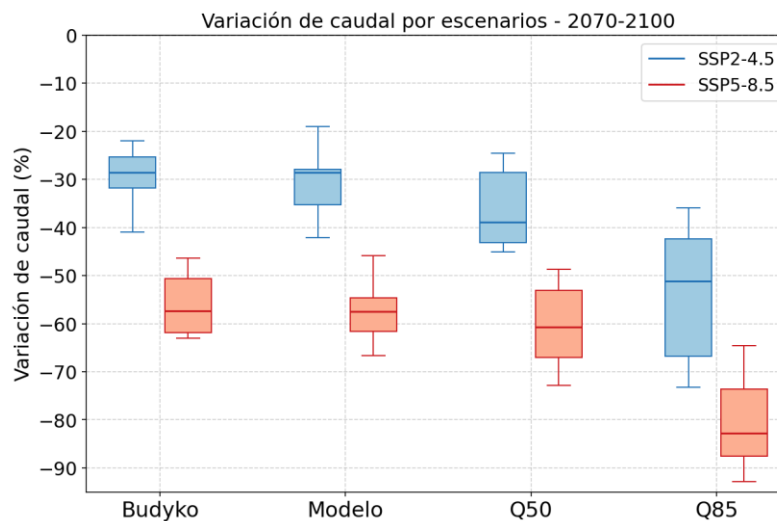


Figura 7: Boxplots de la variación proyectada de la escurrentía y el caudal en la isla bajo los escenarios SSP2-4.5 (azul) y SSP5-8.5 (rojo) para el periodo 2070–2100.

3. CONCLUSIONES

Este estudio evaluó los modelos climáticos CMIP6 con mejor desempeño histórico mediante el índice de desempeño pasado (PPI), diagramas de Taylor y análisis de genealogía de código, seleccionando aquellos más representativos para la isla Robinson Crusoe. A partir de estos modelos se aplicó la corrección de sesgo MBCn, y con las proyecciones corregidas se utilizó el enfoque hidroclimático de Budyko para estimar la escurrimiento promedio y finalmente, los resultados fueron incorporados a un modelo hidrológico SAC-SMA calibrado con parámetros transferidos desde cuencas con similitudes climáticas y fisiográficas, lo que permitió obtener una estimación más detallada de la disponibilidad hídrica futura de la isla.

Los resultados muestran que, hacia finales de siglo, la precipitación media anual disminuiría en aproximadamente un 27% bajo el escenario más desfavorable SSP5-8.5, mientras que la temperatura media anual aumentaría en cerca de 1.8 °C. Estas proyecciones se traducen en una reducción del caudal promedio de un 57 % respecto al periodo histórico, lo que implica un riesgo considerable para la seguridad hídrica de la población local.

Como trabajo futuro, se recomienda reforzar la red de monitoreo hidrometeorológico de la isla para contar con datos locales que mejoren la calibración de modelos hidrológicos y eviten la incertidumbre asociada al uso de parámetros transferidos, ya que puede inducir errores en las estimaciones. En paralelo, sería útil explorar cuencas donantes con similitudes climáticas y topográficas, tanto en el hemisferio sur (p. ej., Islas Malvinas o Nueva Zelanda) como en el hemisferio norte (p. ej., islas del Caribe o Hawái), ajustando los criterios de selección para mejorar la transferencia de parámetros a las condiciones particulares de Robinson Crusoe. Finalmente, es prioritario integrar estos resultados en la planificación territorial y la gestión del recurso hídrico, considerando la alta vulnerabilidad de los sistemas insulares frente al cambio climático y la necesidad de diseñar medidas de adaptación acordes a los escenarios futuros.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Ilustre Municipalidad de Juan Fernández por el apoyo brindado mediante la entrega de información hidrometeorológica, datos de caudales, documentación y estudios locales, contribuyendo de manera fundamental al desarrollo de este trabajo.

REFERENCIAS

- Budyko, M. I. (1974). *Climate-And-Life*.
- Burnash, R. J. C., Ferral, R. L., & McGuire, R. A. (1973). *A Generalized Streamflow Simulation System: Conceptual Modeling for Digital Computers*.
- Bustos, S. (2019). *Simulaciones climáticas regionales para el territorio insular Chileno*. <https://www.cr2.cl/informe-de-sintesis-simulaciones-climaticas-regionales-para-el-territorio-insular-chileno-cr2/>
- 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(1–2), 31–49. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3580-6>
- Dirección Meteorológica de Chile. (2024). *REPORTE ANUAL DE LA EVOLUCIÓN DEL CLIMA EN CHILE*. <https://cambioclimatico.mma.gob.cl/publicaciones-destacadas/>

- Gateño, F., Mendoza, P. A., Vásquez, N., Lagos-Zúñiga, M., Jiménez, H., Jerez, C., Vargas, X., Rubio-Álvarez, E., & Montserrat, S. (2024). Screening CMIP6 models for Chile based on past performance and code genealogy. *Climatic Change*, 177(6). <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s10584-024-03742-1>
- INE. (2022). *Atlas Rural de Chile*. (Brahm Matías & Careaga Catalina, Eds.). <https://bibliotecadigital.odepa.gob.cl/handle/20.500.12650/71509>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2023). *Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>
- IPCC. (2021). *Cambio Climático 2021: Un resumen para todo el mundo*.
- Mianabadi, A., Davary, K., Pourreza-Bilondi, M., & Coenders-Gerrits, A. M. J. (2020). Budyko framework; towards non-steady state conditions. *Journal of Hydrology*, 588, 125089. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2020.125089>
- Municipalidad Juan Fernandez. (2025). *Proyecto Mejoramiento de captaciones y aducciones, comuna de Juan Fernandez*. www.munijf.cl~secpla@munijf.cl
- Ortiz A, & Campillo R. (1982). *Estudio de los recursos físicos archipiélago Juan Fernández*.
- Oudin, L., Hervieu, F., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V., Anctil, F., & Loumagne, C. (2005). Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall–runoff model?: Part 2—Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall–runoff modelling. *Journal of Hydrology*, 303(1–4), 290–306. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2004.08.026>
- Salazar, Á., Thatcher, M., Goubanova, K., Bernal, P., Gutiérrez, J., & Squeo, F. (2024). CMIP6 precipitation and temperature projections for Chile. *Climate Dynamics*, 62(3), 2475–2498. <https://doi.org/10.1007/s00382-023-07034-9>
- Taylor, K. E. (2001). Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 106(D7), 7183–7192. <https://doi.org/10.1029/2000JD900719>
- Vásquez, N. A., Mendoza, P. A., Knoben, W. J. M., Arnal, L., Lagos-Zúñiga, M., Clark, M., & Vargas, X. (2024). The Key Role of Temporal Stratification for GCM Bias Correction in Climate Impact Assessments. *Earth's Future*, 12(8). <https://doi.org/10.1029/2023EF004242>
- Vásquez, N. A., Mendoza, P. A., Lagos-Zuñiga, M., Scaff, L., Muñoz-Castro, E., & Vargas, X. (2025). Robust spatial changes in climate classes: insights from bias-corrected CMIP6 models across Chile. *Environmental Research Letters*, 20(1). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad9d5b>
- Wang, C., Wang, S., Fu, B., & Zhang, L. (2016). Advances in hydrological modelling with the Budyko framework: A review. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 40(3), 409-430.