

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXVII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**ENFOQUES PARA LA ESTIMACIÓN DE PRECIPITACIONES MÁXIMAS
DIARIAS CON CAMBIO CLIMÁTICO PARA EL DISEÑO DE OBRAS:
MÁXIMAS ANUALES VERSUS FACTOR POR TEMPERATURA**

IGNACIO TORO MENA¹
MARIA CECILIA MUÑOZ PEÑA²
SEBASTIÁN CANIULAO GANTENBEIN³
CRISTIÁN CHADWICK IRARRÁZAVAL⁴
XIMENA VARGAS MESA⁵

RESUMEN

La infraestructura existente hoy se verá enfrentada a condiciones diferentes en el futuro, las que se espera sean más severas debido al efecto del cambio climático, el cual representa uno de los mayores desafíos ingenieriles y ambientales en la actualidad, al cual se le suman otros como modificaciones al suelo, crecimiento demográfico, entre otros, además que, debido al efecto del cambio climático, las series hidrológicas ya no pueden ser consideradas estacionarias, siendo indispensable anticiparse a los efectos que esto puede generar en un futuro sobre los caudales de crecidas.

En el presente trabajo se comparan dos enfoques para la estimación de cambios en la precipitación máxima diaria, el de Máximas Anuales y el del Factor por Temperatura. Dichos métodos son comparados en cuatro lugares de Chile que cuentan con extensos registros de precipitaciones máximas diarias, así como de temperatura media anual, evidenciando ventajas y limitaciones de ambos enfoques, donde los resultados dependen fuertemente del área de estudio.

¹ Hidrólogo esp. en cambio climático, Mine Water, WSP – ignacio.toro@wsp.com, toromena@hotmail.com

² Ingeniera de Proyectos, Mine Water, WSP – maria.munoz.p@wsp.com

³ Ingeniero de Proyectos, Mine Water, WSP – sebastian.caniulao@wsp.com

⁴ Profesor Asociado, Facultad de Ingeniería y Ciencias, Universidad Adolfo Ibáñez – cristian.chadwick@uai.cl

⁵ Profesora Asociada, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile – xvargas@uchile.cl

1. INTRODUCCIÓN

La infraestructura existente hoy se verá enfrentada a condiciones diferentes en el futuro. Se espera que estas sean más severas debido al efecto del cambio climático, combinado con cambios en el uso de suelo, crecimiento demográfico, entre otros desafíos.

El efecto del cambio climático representa uno de los mayores desafíos ingenieriles y ambientales en la actualidad. Debido a las proyecciones de aumento de temperatura, así como cambios en los patrones de precipitación extrema, las series hidrológicas ya no pueden ser consideradas estacionarias (Milly et al., 2008), generando la necesidad de anticiparse a los efectos que esto puede generar en el futuro sobre los caudales de crecidas.

Los cambios en la hidrología se pueden proyectar utilizando los modelos de cambio climático (GCMs, por sus siglas en inglés *General Circulation Models*). Los GCMs son forzados bajo distintos escenarios de gases de tipo efecto invernadero, que en su última familia son la combinación de posibles desarrollos de la sociedad (SSP, por sus siglas en inglés *Shared Socioeconomic Pathways* (O'Neill et al., 2016; Riahi et al., 2017)) definidos a través de las Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (Shared Socioeconomic Pathways o SSP por sus siglas en inglés), con los escenarios de concentraciones de gases de efecto invernadero (RCP, por sus siglas en inglés *Representative Concentration Pathways* (Van Vuuren et al., 2011)).

Para obtener las proyecciones futuras de la Precipitación Máxima y Precipitación Máxima Probable se utilizan GCMs, los que, sin embargo, presentan sesgos a nivel local, dado que fueron desarrollados para reproducir las condiciones climáticas globales, no logrando un buen desempeño a nivel local, cuando se comparan con estaciones meteorológicas.

La representación deficiente de las condiciones climáticas locales se debe a que los GCMs poseen una baja resolución horizontal, por lo que hay procesos físicos que no se pueden simular y requieren ser parametrizados y simplificados (Kourtis y Tsihrintzis, 2022). Estos sesgos son evidentes cuando se compara el período histórico simulado por los GCMs con registros históricos, lo cual se puede corregir utilizando diferentes técnicas de corrección estadística (downscaling), en conjunto con series representativas del clima histórico observado (Cannon et al., 2015).

De acuerdo con Kourtis y Tsihrintzis (2022), para estimar el cambio proyectado sobre precipitaciones extremas existen predominantemente tres enfoques: Máximas Anuales, Escalamiento (Factor) por Temperatura y Generación Estocástica, siendo los dos primeros los más frecuentemente utilizados. Según los mismo autores, la generación estocástica se utiliza menos por su nivel de complejidad, requiriendo una gran cantidad de datos observados y mayor tiempo de cómputo.

El método de Máximas Anuales corresponde al más utilizado en la literatura (Kourtis y Tsihrintzis, 2022). Si se trabaja a nivel diario, este método consiste en la extracción de las precipitaciones máximas anuales desde los GCMs, caracterizando los periodos de retorno futuros a partir del análisis de frecuencia sobre dicha serie de tiempo. Cabe señalar que los eventos extremos de precipitación logran ser reproducidos por los GCMs, por lo que la incertidumbre suele ser alta.

Por otro lado, el método de Factor por Temperatura considera la relación de Clausius-Clapeyron, asumiendo que por cada grado de aumento de la temperatura del aire, la capacidad de retención de agua de la atmósfera se incrementa en un 6,5% (Vergara-Temprado et al., 2021). Este enfoque es recomendado por guías de Canadá, aplicando un aumento de 7%/°C (CSA, 2019) y Australia (Ball et al., 2019), donde esta última entrega proyecciones de precipitación máxima para duraciones menores a 24 horas a partir del aumento de temperatura, lo que podría ser útil para actualizar curvas Intensidad-Duración-Frecuencia. Se debe tener en cuenta que en algunos lugares esta relación es ampliamente excedida (Lenderink et al., 2021), mientras que en otros parece ser conservadora (Vergara-Temprado et al., 2021), además de no permitir estimar una proyección para cada periodo de retorno.

En el presente trabajo se comparan dos enfoques, el de Máximas Anuales y el del Factor por Temperatura, evaluando las proyecciones sobre precipitaciones máximas diarias (1 día). En particular, se analizarán los periodos de retorno de 10 y 100 años, para cuatro lugares de Chile (La Serena, Rapa Nui, Santiago y Concepción) que cuentan con extensos registros de precipitaciones máximas diarias, así como de temperatura media anual.

2. METODOLOGÍA

Información Base y Caracterización Histórica

Para la comparación entre los dos enfoques se considera la caracterización de cuatro lugares de Chile que cuentan con registros extensos y completos, como lo son La Serena, Rapa Nui, Santiago y Concepción, con lo que se abarca un amplio rango de latitudes y climas (Tabla 1). Las estaciones meteorológicas consideradas son La Florida, Mataveri, Quinta Normal y Carriel Sur, todas de la Dirección Meteorológica de Chile (DMC). De estas estaciones se estiman precipitaciones máximas diarias y temperatura media anual, para 75 años (periodo 1950-2024). La ubicación geográfica de las estaciones se presenta en la Figura 1.

Tabla 1. Localidades y estaciones meteorológicas representativas

Localidad	Estación Meteorológica	Propiedad	Elevación (m s.n.m.)	Lat (°)	Lon (°)	Periodo
La Serena	La Florida	DMC	142	-29,92	-71,20	1950-2024
Rapa Nui	Mataveri	DMC	48	-27,16	-109,43	1950-2024
Santiago	Quinta Normal	DMC	527	-33,45	-70,68	1950-2024
Concepción	Carriel Sur	DMC	12	-36,78	-73,06	1950-2024

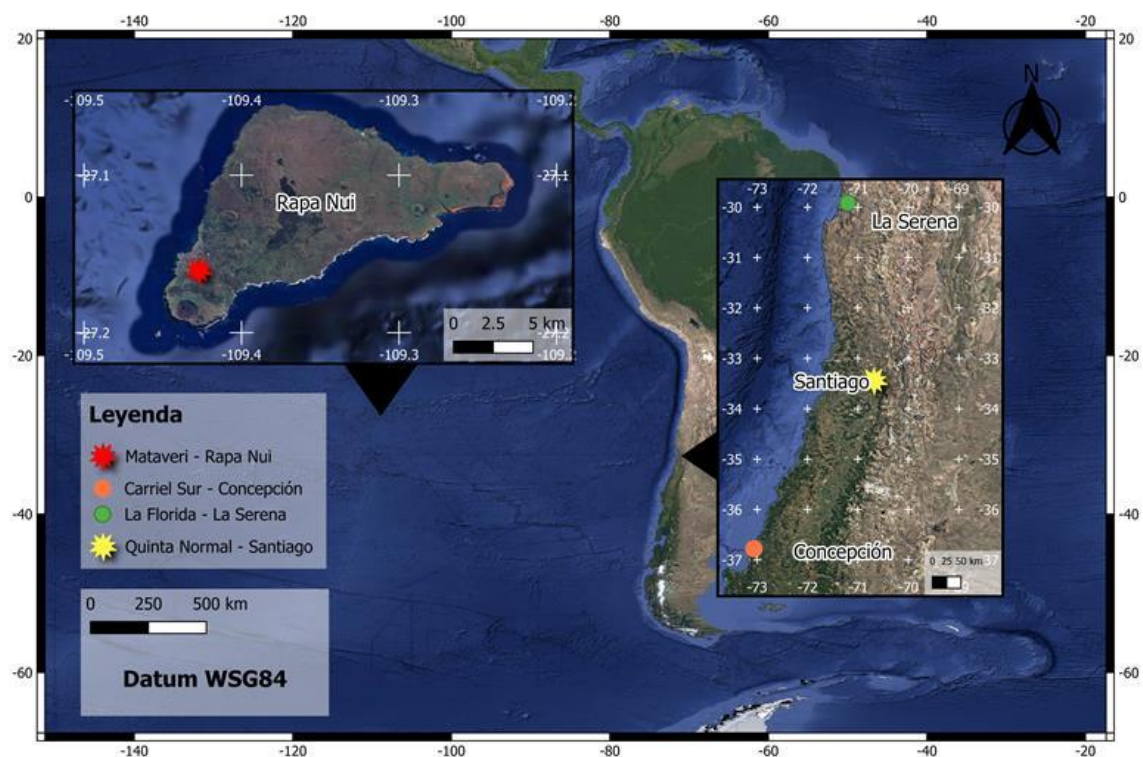


Figura 1. Localidades y estaciones meteorológicas consideradas

Para analizar si existen cambios importantes en las precipitaciones históricas, se comparan los dos enfoques, utilizando los primeros 30 años (1950-1979) y últimos 30 años (1995-2024) del registro. Además, se busca evaluar si el enfoque de Factor por Temperatura logra capturar aumentos en las precipitaciones máximas diarias, a través de incrementos de la temperatura en registros históricos.

Se define como periodo histórico para las proyecciones de cambio climático 1985-2014, lo que considera los últimos 30 años del periodo histórico de los GCMs utilizados (2014 es el último año histórico).

Modelos de Cambio Climático (GCMs), Corrección de Sesgo y Proyecciones

Para este estudio se considera la base de datos NEX-GDDP-CMIP6 (Thrasher et al., 2022), la que cuenta con 35 GCM a escala diaria, desde 1950 hasta 2100, utilizando 31 GCMs, dado que fueron descartados los que no presentaban proyecciones para ambos escenarios (SSPs 2-4,5 y 5-8,5), además de eliminar modelos que presentan problemas estadísticos (TaiESM1 presenta salto en la serie de tiempo de temperatura), los que son descritos en la [Nota Técnica](#) de la base de datos. Cabe destacar que la base de datos NEX-GDDP-CMIP6 posee ya un escalamiento previo, por lo que podría esperar algún tipo de modificación en la señal de cambio que los GCMs proyectan.

La familia de GCMs corresponden al experimento Coupled Intercomparison Project 6 (CMIP6; O'Neill et al. (2016), Riahi et al. (2017) utilizados en el Sexto Reporte de Cambio Climático (AR6) del IPCC (2021). Se consideran los escenarios SSP 2-4,5 (moderado) y 5-8,5 (pesimista) en términos de concentraciones equivalentes de CO₂. Para este estudio se opta por analizar directamente las series de máximas diarias para precipitación y las medias anuales de temperatura, extrayéndolas desde los GCMs y luego corrigiéndolas a nivel anual, como se recomienda por Srivastav et al. (2014), dado que una corrección a nivel diario no preservará adecuadamente los estadísticos de los valores extremos.

La corrección de sesgo se realiza a través del método Quantile Delta Mapping (QDM, Cannon et al. (2015)), el que corrige los GCMs preservando los cambios proyectados sobre sus percentiles (probabilidad), manteniendo la señal de cambio entre el periodo futuro e histórico simulado. Se considera como periodo histórico observado las precipitaciones máximas diarias y la temperatura media anual de 1985-2014, luego de verificar que ninguna de las series presenta tendencia estadísticamente significativa a través del test de Mann-Kendall (Mann (1945), Kendall (1975)). La corrección de sesgo se realiza sobre ventanas móviles de 30 años, considerando así series pseudo-estacionarias, como se recomienda en Chadwick et al. (2023).

Se corrige el sesgo a escala anual de las precipitaciones máximas diarias y de la temperatura media anual de los 31 GCM utilizados, para los SSP 2-4,5 y 5-8,5 mediante QDM, con distribución Empírica para precipitaciones máximas diarias y Normal para temperatura media anual.

Con respecto a las proyecciones de cambio climático, se estima una por cada GCM, escenario y ventana temporal futura evaluada, por lo que, para comparar entre los enfoques de Máximas Anuales y Factor por Temperatura, se siguen las recomendaciones presentadas por Loyola et al. (2024), así como en la Guía Criterio SEA (2023), reportando los percentiles 25, 50 y 75% estimados en base a los GCMs evaluados. Los resultados se presentan diferenciando entre escenario SSP y ventana temporal futura, las que corresponden a 2031-2060 y 2071-2100, permitiendo evaluar el efecto del cambio climático, así como de los enfoques, sobre una ventana cercana y otra lejana.

Enfoque de Máximas Anuales

Se consideran las precipitaciones máximas diarias del periodo histórico observado y las simuladas por los modelos de cambio climático desde las series ya corregidas (un valor por año). Luego, se realiza un análisis de frecuencia a cada GCM, escenario y ventana temporal de interés, estimando periodos de retorno a partir de la distribución Gumbel. Finalmente, los resultados son reportados para los percentiles 25, 50 y 75% de los GCMs.

Enfoque de Factor por Temperatura

Este enfoque parte de la base de que el aumento proyectado por los GCMs sobre temperatura generará un incremento en la capacidad de retención de agua de la atmósfera, siguiendo la relación de Clausius-Clapeyron (Vergara-Temprado et al., 2021), El factor que se obtiene de esta relación, se presenta en la Ecuación (1).

$$Factor_{Temp} = 1,065^{\Delta T} \quad (1)$$

El ΔT se estima como la diferencia entre la temperatura media anual del periodo futuro de interés (en este caso 2031-2060 o 2071-2100) con respecto a la temperatura media anual del periodo histórico de referencia, 1985-2014, para cada GCM y escenario SSP evaluado. Luego los resultados son reportados a través de los percentiles 25, 50 y 75% de los GCMs. Para el análisis histórico se realiza la comparación entre 1995-2024 y 1950-1979.

Cabe señalar que el método supone que el cambio sobre la temperatura media anual será representativo de la variación que podría experimentar la temporada húmeda, lo cual no necesariamente se cumple, dado que los efectos del cambio climático no son homogéneos en el tiempo.

3. RESULTADOS

Comparación Considerando Información Histórica

En la Figura 2 se presenta las series de precipitaciones máximas diarias y temperaturas medias anuales durante 1950-2024 para La Serena, Rapa Nui, Santiago y Concepción. Analizando las tendencias presentadas en la Figura 2, se busca comprender si el Factor por Temperatura es aplicable en las series históricas, evaluando si existe una correspondencia entre la variación de temperatura de los últimos años con respecto al cambio sobre las precipitaciones máximas que se vea reflejada a través del Factor por Temperatura.

La Figura 2 muestra que todos los lugares evaluados presentan una tendencia al aumento de la temperatura media anual, mientras que para el caso de la precipitación máxima solo se observa un incremento para Rapa Nui. Esto quiere decir que para La Serena, Santiago y Concepción el Factor por Temperatura no estaría representando adecuadamente el comportamiento de la precipitación máxima diaria, dado que estima un aumento, sin embargo en base a los registros de precipitación máxima diaria se observa una reducción.

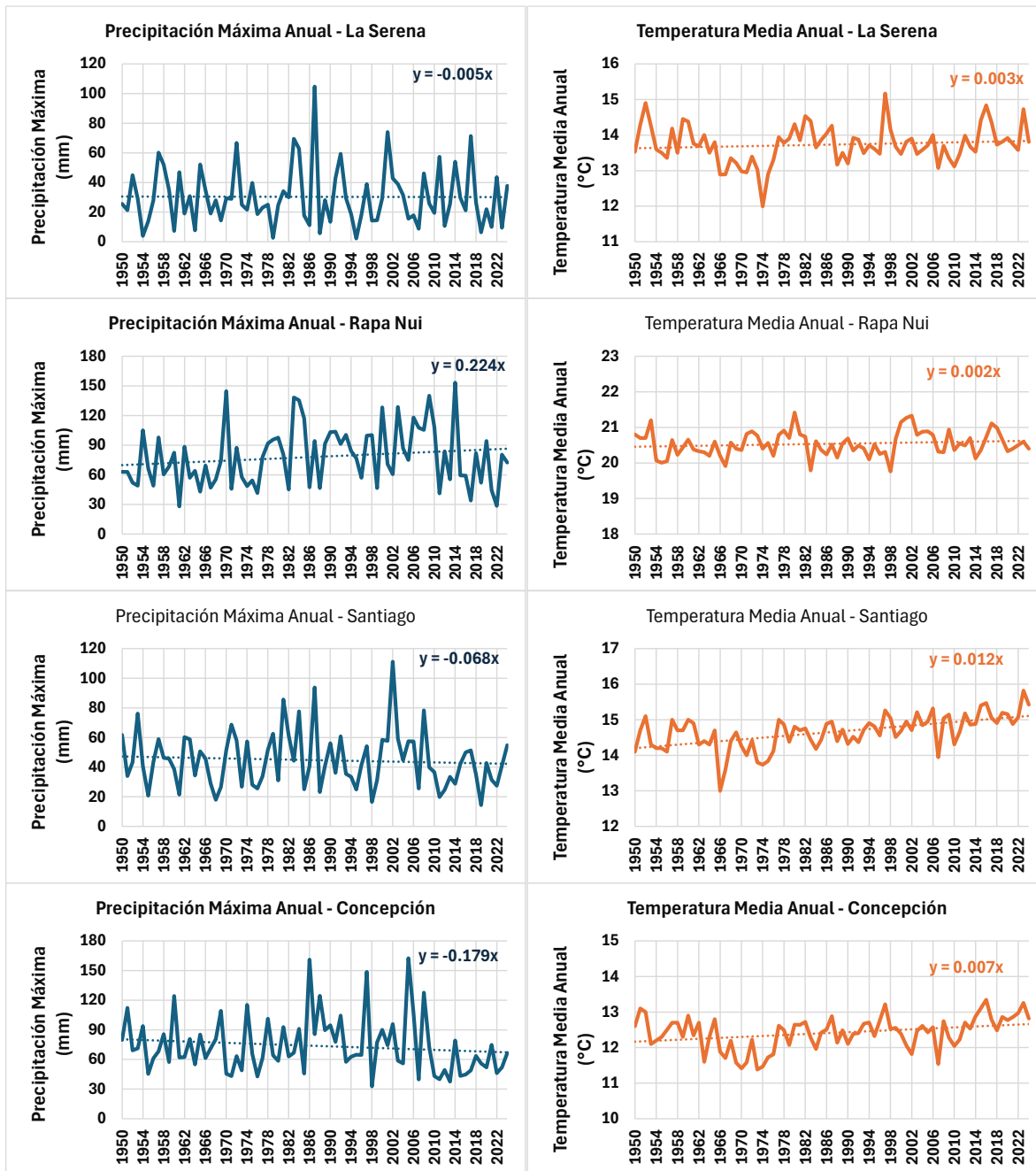


Figura 2. Series de tiempo de precipitación máxima diaria y temperatura media anual, 1950-2024

En la Tabla 2 se presentan la media y desviación estándar de las precipitaciones máximas diarias, así como los periodos de retorno de 10 y 100 años, además de la temperatura media anual. Estos estadísticos son estimados para los periodos 1950-1979, 1985-2014 (periodo base para el análisis con cambio climático) y 1995-2024.

Buscando evaluar la aplicabilidad del enfoque de Factor por Temperatura, se comparan los cambios del periodo 1995-2024 versus 1950-1979 (referencia), estimando la variación sobre

las precipitaciones máximas diarias dada por este enfoque (Tabla 3). Esto se compara contra lo estimado a partir de los registros de precipitación máxima diaria y análisis de frecuencia.

Tabla 2. Estadísticos representativos del clima histórico para distintas ventanas temporales

Periodo	Estadístico	La Serena	Rapa Nui	Santiago	Concepción
1950-1979	Media $P_{m\acute{a}x}$ (mm)	28,5	67,6	44,0	72,9
	Desv. Est. $P_{m\acute{a}x}$ (mm)	16,0	23,9	15,6	22,2
	Periodo de Retorno de 10 años (mm)	50,9	97,6	67,3	101,2
	Periodo de Retorno de 100 años (mm)	82,0	139,9	99,5	141,2
	Media $T_{media\ anual}$ (°C)	13,6	20,5	14,4	12,2
1985-2014	Media $P_{m\acute{a}x}$ (mm)	30,6	90,7	44,9	80,8
	Desv. Est. $P_{m\acute{a}x}$ (mm)	22,5	29,1	21,7	35,9
	Periodo de Retorno de 10 años (mm)	55,2	136,1	69,8	125,3
	Periodo de Retorno de 100 años (mm)	90,8	198,4	105,6	188,5
	Media $T_{media\ anual}$ (°C)	13,7	20,5	14,8	12,4
1995-2024	Media $P_{m\acute{a}x}$ (mm)	28,8	81,7	43,1	69,0
	Desv. Est. $P_{m\acute{a}x}$ (mm)	18,6	32,3	19,8	32,0
	Periodo de Retorno de 10 años (mm)	51,9	127,2	67,6	101,5
	Periodo de Retorno de 100 años (mm)	84,7	190,8	102,3	149,1
	Media $T_{media\ anual}$ (°C)	13,8	20,6	15,0	12,6

Tabla 3. Comparación Enfoques Máximas Anuales y Factor por Temperatura para ventana 1995-2024 versus 1950-1979 de referencia

Comparación	Estadístico	La Serena	Rapa Nui	Santiago	Concepción
1995-2024 versus 1950-1979	Cambio Media $P_{m\acute{a}x}$ (%)	1%	21%	-2%	-5%
	Cambio Desv. Est. $P_{m\acute{a}x}$ (%)	16%	35%	27%	44%
	Enfoque Máximas Anuales $T_{10\ años}$ (%)	2%	30%	1%	0%
	Enfoque Máximas Anuales $T_{100\ años}$ (%)	3%	36%	3%	6%
	Delta T_{media} (°C)	0,3	0,1	0,6	0,4
	Enfoque Factor por Temperatura (%)	2%	1%	4%	2%

Al comparar los periodos 1995-2024 contra 1950-1979 se puede observar que el único lugar que muestra un aumento significativo sobre la media de las precipitaciones máximas corresponde a Rapa Nui (Tabla 3). Es importante notar que al analizar el periodo 1970-2022 Rapa Nui presenta una disminución importante en la precipitación anual entre 2010-2022 (periodo que coincide con la Mega Sequia) y también una cierta disminución en los máximos diarios (Toro et al., 2023). Por otro lado, Santiago y Concepción presentan un descenso en de las medias de las precipitaciones máximas diarias.

Dicho lo anterior, el estadístico más relevante para la estimación de eventos extremos, y por consiguiente, caracterizar periodos de retorno, corresponde a la desviación estándar, la cual

aumenta fuertemente para todas las estaciones, entre un 16 y un 44% (Tabla 3). El cambio en la desviación estándar, en conjunto con el cambio sobre las medias, se traduce en un aumento de entre 3 y 6% para el periodo de retorno de 100 años para La Serena, Santiago y Concepción, y en un 36% para Rapa Nui.

Con respecto al enfoque de Factor por Temperatura, se estiman aumentos de entre 0,1 y 0,6°C al comparar los periodos 1995-2024 contra 1950-1979 (Tabla 3). Dichos aumentos se traducen en un aumento de entre 1 y 4% de la precipitación máxima diaria, mostrando una nula correspondencia para Rapa Nui. Las magnitudes de los cambios estimados a partir del enfoque de Factor por Temperatura se encuentran dentro del rango en que se puede atribuir a variabilidad natural (rango definido por una desviación estándar), y no a un cambio relacionado con el aumento de temperatura.

Comparación Considerando Proyecciones de Cambio Climático

Para evaluar las similitudes o diferencias entre los enfoques de Máximas Anuales y Factor por Temperatura en estudios de cambio climático (Tabla 4 y Figura 3), se comparan sus resultados para las ventanas 2031-2060 y 2071-2100 con respecto a 1985-2014, bajo los escenarios de concentraciones SSPs 2-4,5 y 5-8,5, en los lugares de interés (La Serena, Rapa Nui, Santiago y Concepción). Los resultados son presentados para los percentiles 25, 50 y 75% de los GCMs.

Tabla 4. Cambio Proyectado de Precipitaciones Máximas, percentiles 25, 50 y 75% de los GCMs. Enfoques Máximas Anuales y Factor por Temperatura

Cambio Proyectado Precipitación Máxima (%)	Enfoque	2031-2060						2071-2100					
		SSP 2-4,5			SSP 5-8,5			SSP 2-4,5			SSP 5-8,5		
		25%	50%	75%	25%	50%	75%	25%	50%	75%	25%	50%	75%
La Serena	MaxAn (T ₁₀ años)	-12%	-7%	9%	-20%	-10%	13%	-19%	-7%	15%	-28%	-16%	10%
	MaxAn (T ₁₀₀ años)	-11%	-5%	10%	-18%	-8%	13%	-21%	-6%	18%	-31%	-12%	19%
	Factor Temp.	7%	7%	9%	8%	10%	13%	12%	15%	18%	23%	27%	33%
Rapa Nui	MaxAn (T ₁₀ años)	-4%	6%	14%	-6%	5%	16%	-5%	2%	13%	0%	5%	17%
	MaxAn (T ₁₀₀ años)	-3%	6%	17%	-3%	9%	19%	-4%	4%	17%	3%	7%	21%
	Factor Temp.	3%	4%	5%	4%	5%	6%	4%	6%	8%	9%	12%	16%
Santiago	MaxAn (T ₁₀ años)	-12%	-2%	3%	-11%	-4%	4%	-9%	-5%	5%	-14%	-7%	6%
	MaxAn (T ₁₀₀ años)	-12%	-1%	3%	-8%	-4%	7%	-10%	-2%	11%	-15%	-3%	12%
	Factor Temp.	7%	8%	9%	9%	11%	13%	12%	14%	18%	24%	29%	33%
Concepción	MaxAn (T ₁₀ años)	-9%	1%	9%	-10%	2%	6%	-7%	-2%	7%	-19%	-13%	-3%
	MaxAn (T ₁₀₀ años)	-9%	0%	10%	-9%	4%	9%	-7%	-1%	8%	-19%	-11%	2%
	Factor Temp.	4%	5%	6%	5%	6%	8%	8%	9%	13%	15%	17%	24%

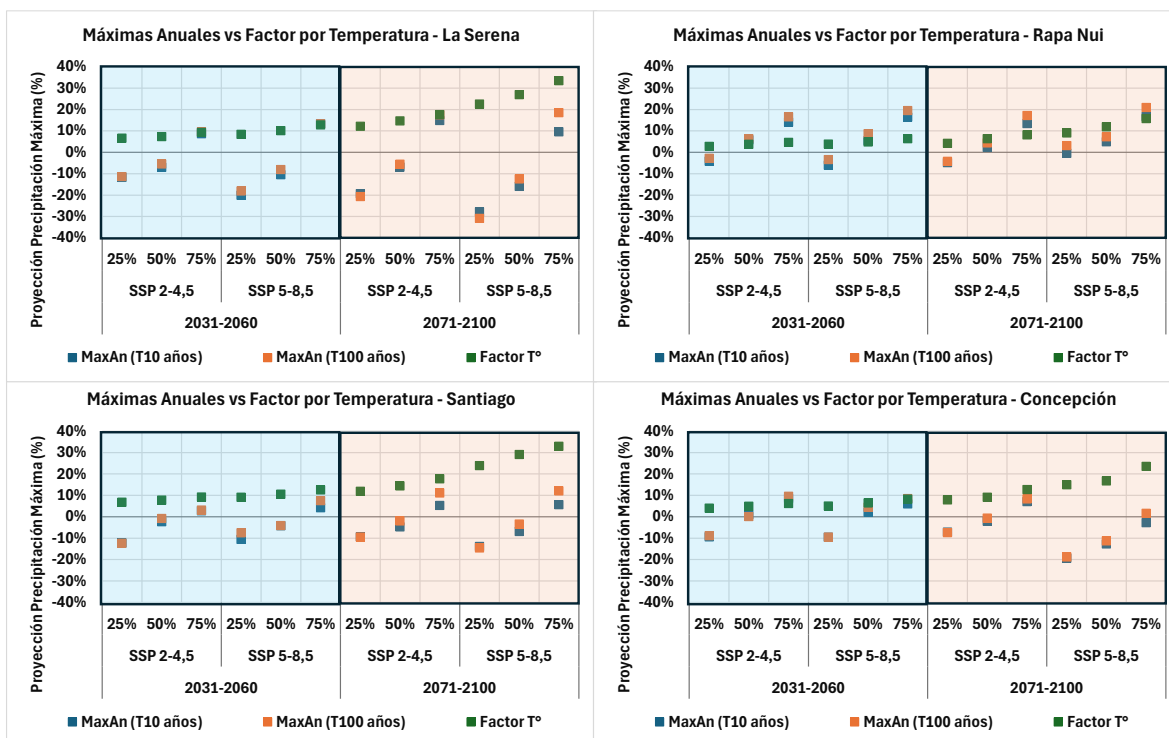


Figura 3. Cambio proyectado de Precipitaciones Máximas, percentiles 25, 50 y 75% de los GCMs. Enfoques Máximas Anuales y Factor por Temperatura

De la Tabla 4 y Figura 3 se observa que los resultados dependen de la zona de estudio, obteniéndose por ejemplo, hacia fines de siglo y percentil 75%, proyecciones más altas con el enfoque de Factor por Temperatura para todos los lugares (24 a 33%), a excepción de Rapa Nui, donde predomina el enfoque de Máximas Anuales. Se destaca también que el enfoque de Factor por Temperatura, por construcción, presenta solo aumentos en la intensidad de precipitaciones, sin embargo estos pueden ser acotados al compararlos con el enfoque de Máximas Anuales, sobre todo para ventanas temporales cercanas, dado que en ese caso el aumento de la temperatura no es tan severo como hacia fines de siglo.

Para Factor por Temperatura se tiene que siempre el escenario SSP 5-8,5 entrega valores mayores que el SSP 2-4,5, aunque estos pueden ser comparables en magnitud, diferenciándose a fines de siglo. Esto se debe a que el SSP 5-8,5 es el escenario que presentan mayores aumentos de temperatura, evidenciándose hacia 2100, donde las trayectorias de concentraciones se separan notablemente.

El análisis comparativo en detalle de los enfoques de Máximas Anuales y Factor de Temperatura para las ventanas 2031-2060 y 2071-2100, diferenciando entre La Serena, Rapa Nui, Santiago y Concepción se presenta en la Tabla 5.

Tabla 5. Análisis Comparativo de Máximas Anuales versus Factor por Temperatura, 2031-2060 y 2071-2100

Comparación Máximas Anuales vs Factor por Temperatura	2031-2060	2071-2100
La Serena	<p><u>Máximas Anuales:</u> -) Hasta percentil 50% se proyectan disminuciones, independiente del SSP -) No hay diferencias significativas entre periodos de retorno -) SSP 5-8,5 muestra una mayor incertidumbre y un aumento comparable para el percentil 75% entre ambos SSPs</p> <p><u>Factor por Temperatura:</u> -) Proyecta aumentos para todos los percentiles -) Muestra una incertidumbre acotada, dado que hay poca diferencia entre percentiles de un mismo SSP -) Se proyecta un aumento comparable para el percentil 75% en ambos SSPs</p> <p><u>Comparación:</u> -) Factor por Temperatura muestra una menor dispersión en sus proyecciones -) Considerando al percentil 75%, ambos enfoques entregan proyecciones similares</p>	<p><u>Máximas Anuales:</u> -) Hasta percentil 50% se proyectan disminuciones, independiente del SSP -) Hay diferencias entre periodos de retorno, siendo mayores para el SSP 5-8,5 -) SSP 5-8,5 muestra una mayor incertidumbre, sin embargo se tienen valores comparables para el percentil 75% en ambos SSPs</p> <p><u>Factor por Temperatura:</u> -) Proyecta aumentos para todos los percentiles -) Muestra una incertidumbre acotada, pero mayor que en el caso 2031-2060 -) SSP 5-8,5 proyecta un mayor aumento para el percentil 75%</p> <p><u>Comparación:</u> -) Factor por Temperatura muestra una menor dispersión en sus proyecciones -) Para el SSP 2-4,5 y percentil 75%, ambos enfoques entregan proyecciones similares -) Para el SSP 5-8,5 y percentil 75%, el Factor por Temperatura muestra aumentos mucho más severos que Máximas Anuales</p>
Rapa Nui	<p><u>Máximas Anuales:</u> -) Desde percentil 50% se proyectan aumentos, independiente del SSP -) No hay diferencias significativas entre periodos de retorno -) SSPs muestran una incertidumbre similar, así como un aumento comparable para el percentil 75%</p> <p><u>Factor por Temperatura:</u> -) Proyecta aumentos para todos los percentiles -) Muestra una incertidumbre acotada, dado que hay poca diferencia entre percentiles de un mismo SSP</p>	<p><u>Máximas Anuales:</u> -) Desde percentil 25% se proyectan aumentos para SSP 5-8,5 -) Hay diferencias leves entre periodos de retorno -) SSPs muestran una incertidumbre similar, así como un aumento comparable para el percentil 75%</p> <p><u>Factor por Temperatura:</u> -) Proyecta aumentos para todos los percentiles -) Muestra una incertidumbre acotada, pero mayor que en el caso 2031-2060 -) SSP 5-8,5 proyecta un mayor aumento para el percentil 75%</p>

Comparación Máximas Anuales vs Factor por Temperatura	2031-2060	2071-2100
	<p>-) Se proyecta un aumento comparable para el percentil 75% en ambos SSPs</p> <p><u>Comparación:</u></p> <p>-) Factor por Temperatura muestra una menor dispersión en sus proyecciones</p> <p>-) Considerando al percentil 75%, Máximas Anuales presenta aumentos que superan ampliamente los estimados por Factor por Temperatura</p>	<p><u>Comparación:</u></p> <p>-) Factor por Temperatura muestra una menor dispersión en sus proyecciones</p> <p>-) Para el SSP 2-4,5 y percentil 75%, Máximas Anuales presenta aumentos que superan ampliamente los estimados por Factor por Temperatura</p> <p>-) Para el SSP 5-8,5 y percentil 75%, Máximas Anuales presenta aumentos que superan levemente los estimados por Factor por Temperatura</p>
Santiago	<p><u>Máximas Anuales:</u></p> <p>-) Hasta percentil 50% se proyectan disminuciones, independiente del SSP</p> <p>-) No hay diferencias significativas entre periodos de retorno</p> <p>-) SSPs muestran una incertidumbre similar, así como un aumento comparable para el percentil 75%</p> <p><u>Factor por Temperatura:</u></p> <p>-) Proyecta aumentos para todos los percentiles</p> <p>-) Muestra una incertidumbre acotada, dado que hay poca diferencia entre percentiles de un mismo SSP</p> <p>-) Se proyecta un aumento comparable para el percentil 75% en ambos SSPs</p> <p><u>Comparación:</u></p> <p>-) Factor por Temperatura muestra una menor dispersión en sus proyecciones</p> <p>-) Para ambos SSPs y percentil 75%, el Factor por Temperatura muestra mayores aumentos que Máximas Anuales</p>	<p><u>Máximas Anuales:</u></p> <p>-) Hasta percentil 50% se proyectan disminuciones, independiente del SSP</p> <p>-) Hay diferencias entre periodos de retorno, siendo mayores para el SSP 5-8,5</p> <p>-) SSP 5-8,5 muestra una mayor incertidumbre, sin embargo se tienen valores comparables para el percentil 75% en ambos SSPs</p> <p><u>Factor por Temperatura:</u></p> <p>-) Proyecta aumentos para todos los percentiles</p> <p>-) Muestra una incertidumbre acotada, pero mayor que en el caso 2031-2060</p> <p>-) SSP 5-8,5 proyecta un mayor aumento para el percentil 75%</p> <p><u>Comparación:</u></p> <p>-) Factor por Temperatura muestra una menor dispersión en sus proyecciones</p> <p>-) Para ambos SSPs y percentil 75%, el Factor por Temperatura muestra aumentos mucho más severos que Máximas Anuales</p>
Concepción	<p><u>Máximas Anuales:</u></p> <p>-) Desde percentil 50% se proyectan aumentos, independiente del SSP</p> <p>-) No hay diferencias significativas entre periodos de retorno</p> <p>-) SSPs muestran una incertidumbre similar, así como un aumento comparable para el percentil 75%</p>	<p><u>Máximas Anuales:</u></p> <p>-) Hasta percentil 50% se proyectan disminuciones, independiente del SSP</p> <p>-) Hay leves diferencias entre periodos de retorno, siendo mayores para el SSP 5-8,5</p>

Comparación Máximas Anuales vs Factor por Temperatura	2031-2060	2071-2100
	<p><u>Factor por Temperatura:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> -) Proyecta aumentos para todos los percentiles -) Muestra una incertidumbre acotada, dado que hay poca diferencia entre percentiles de un mismo SSP -) Se proyecta un aumento comparable para el percentil 75% en ambos SSPs <p><u>Comparación:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> -) Factor por Temperatura muestra una menor dispersión en sus proyecciones -) Considerando al percentil 75%, ambos enfoques entregan proyecciones similares 	<ul style="list-style-type: none"> -) SSP 5-8,5 muestra una mayor incertidumbre, sin embargo SSP 2-4,5 proyecta mayores aumentos para percentil 75% <p><u>Factor por Temperatura:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> -) Proyecta aumentos para todos los percentiles -) Muestra una incertidumbre acotada, pero mayor que en el caso 2031-2060 -) SSP 5-8,5 proyecta un mayor aumento para el percentil 75% <p><u>Comparación:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> -) Factor por Temperatura muestra una menor dispersión en sus proyecciones -) Para el SSP 2-4,5 y percentil 75%, Factor por Temperatura presenta aumentos que superan levemente los estimados por Máximas Anuales -) Para el SSP 5-8,5 y percentil 75%, Factor por Temperatura presenta aumentos que superan ampliamente los estimados por Máximas Anuales

4. CONCLUSIONES

La comparación entre los enfoques de Máximas Anuales y Factor por Temperatura permite obtener una idea sobre la aplicabilidad de este último enfoque en Chile, así como de sus limitaciones. Esto permite analizar la factibilidad de dicho método a la hora de estimar proyecciones de precipitaciones con cambio climático, robusteciendo los análisis y obteniendo así diseños más resilientes bajo un clima cambiante.

Para la comparación histórica, con el enfoque de Factor por Temperatura, se estiman aumentos de entre 0,1 y 0,6°C al comparar los periodos 1995-2024 contra 1950-1979. Dichos aumentos se traducen en un aumento de entre 1 y 4% de la precipitación máxima diaria, mostrando una nula correspondencia para Rapa Nui. Las magnitudes de los cambios estimados a partir del enfoque de Factor por Temperatura se encuentran dentro del rango en que se puede atribuir a variabilidad natural, y no a un cambio relacionado con el aumento de temperatura.

Se debe tener en consideración como una limitación del enfoque de Factor por Temperatura, la imposibilidad de estimar variaciones para cada periodo de retorno, dado que entrega un valor único a partir de la variación sobre temperatura. Además, la relación de aumento de intensidad versus variación en temperatura se puede considerar o no válida, sin embargo su aplicación es en extremo rápida y sencilla. Por otro lado, para el caso de Máximas Anuales, se debe señalar que la representación de eventos extremos de precipitación por parte de los GCMs suele ser deficiente, por lo que no necesariamente las proyecciones sobre esta variable pueden ser consideradas como totalmente confiables o válidas.

Con respecto a las proyecciones de cambio climático hacia fines de siglo y percentil 75%, se observa que Rapa Nui muestra proyecciones más severas para el enfoque de Máximas Anuales Mientras que ha predominado Factor por Temperatura para los lugares ubicados en Chile Continental, mostrando una atenuación hacia el Sur.

Para Factor por Temperatura se tiene que, para fines de siglo, siempre el escenario SSP 5-8,5 entrega valores mayores que el SSP 2-4,5, siendo en ambos casos aumentos. Por otro lado, Máximas Anuales presenta rangos mayores de incertidumbre, mostrando tanto reducciones como incrementos, siendo para Rapa Nui predominantemente incrementos, dados a partir del percentil 25%.

Para Chile Continental, principalmente Santiago y Concepción, emplear el Enfoque de Factor por Temperatura podría ser una opción a considerar para estimar proyecciones de la precipitación máxima diaria, dado que funciona como una especie de envolvente en términos de proyecciones máximas (percentil 75%), con respecto al método de Máximas Anuales, sin diferir fuertemente de dichos valores, permitiendo obtener una estimación rápida y sencilla que alimente el diseño o verificación de obras considerando el cambio climático.

Como trabajo futuro se propone explorar la dependencia de las proyecciones con respecto a la latitud para un mayor número de estaciones en Chile Continental, buscando diferenciar comportamientos entre Costa, Valle y Cordillera.

También resulta interesante estimar el cambio sobre la temperatura media de la temporada húmeda. De poder validarse correctamente el supuesto del Factor por Temperatura, se podría esperar una mejor correspondencia entre el cambio de la temperatura de los meses húmedos con la variación sobre la precipitación máxima, además de evaluar si el Factor por Temperatura tiene una mejor coincidencia con algún periodo de retorno en particular. En este caso, se da una mejor relación con el periodo de retorno de 100 años para el histórico.

En trabajos futuros se debiese analizar si se obtienen los mismos resultados en otros lugares, con los GCMs descargados directamente desde el sitio <https://aims2.llnl.gov/search/cmip6/>, utilizando otros métodos de downscaling, entre otros.

REFERENCIAS

Ball, J., Babister, M., Nathan, R., W., W., Weinmann, E., Retallick, M., & Testoni, I. (2019). Australian Rainfall and Runoff: A Guide to Flood Estimation. Commonwealth of Australia (Geoscience Australia), Version 4.2.

Cannon, A., Sobie, S., & Murdock, T. (2015). Bias Correction of GCM Precipitation by Quantile Mapping: How Well Do Methods Preserve Changes in Quantiles and Extremes? *Journal of Climate*.

Chadwick, C., Gironás, J., González-Leiva, F., & Aedo, S. (2023). Bias adjustment to preserve changes in variability: the unbiased mapping of GCM changes. *Hydrological Sciences Journal*. doi:10.1080/02626667.2023.2201450.

CSA. (2019). Technical guide: Development, interpretation and use of rainfall intensity-duration-frequency (IDF) information: Guideline for Canadian water resources practitioners. Canadian Standards Association.

IPCC. (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.

Kendall, M.G. (1975). Rank correlation methods. London: Charles Griffin.

Kourtis, I., & Tsihrintzis, V. (2022). Update of intensity-duration-frequency (IDF) curves under climate change: a review. *Water Supply*, 22. doi:10.2166/ws.2022.152.

Loyola, C., Toro, I., González, R., & Robles, S. (2024). Assessment of extreme precipitation events under climate change scenarios in search of a resilient closure design. *Mine Closure 2024: Proceedings of the 17th International Conference on Mine Closure*, Australian Centre for Geomechanics, (pp. 993-1004). Perth. doi: https://doi.org/10.36487/ACG_repo/2415_71.

Mann, H.B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 13(3), 245–259. doi: 10.2307/1907187.

Milly, P. C., Betancourt, J., Falkenmark, M., Hirsch, R. M., Kundzewicz, Z. W., Lettenmaier, D. P., & Stouffer, R. J. (2008). Stationarity is dead: Whither water management?. *Science*, 319 (5863), 573-574.

O'Neill, B. C., Tebaldi, C., Van Vuuren, D. P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., ... & Sanderson, B. M. (2016). The scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 9(9), 3461-3482.

Riahi, K., Van Vuuren, D., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B., & Fujimori, S. (2017). The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environmental Change*, 42. doi: <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>.

SEA. (2023). Criterio de evaluación en el SEIA: Cambio climático en la evaluación ambiental del recurso hídrico.

Srivastav, R., Schardong, A., & Simonovic, S. (2014). Equidistance Quantile Matching Method for Updating IDF Curves under Climate Change. *Water Resources Management*, 28. doi: <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0626-y>.

Tebaldi, C., Kevin, D., Veronika, E., Erich, F., John, F., Pierre, F., . . . Katarzyna, B. (2021). Climate model projections from the Scenario Model Intercomparison Project (Scenario MIP) of CMIP6.

Thrasher, B., Wang, W., & Michaelis, A. (2022). NASA Global Daily Downscaled Projections, CMIP6. *Sci Data* 9, 262. doi: <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01393-4>.

Toro, I., Morales, H., Loyola, C., & Chadwick, C. (2023). Proyección de Precipitaciones Máximas y Precipitación Máxima Probable para Rapa Nui, escenarios SSP 2-4,5 y 5-8,5. XXVI Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica, Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica. Valdivia, Chile.

Van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., ... & Rose, S. K. (2011). The representative concentration pathways: an overview. *Climatic change*, 109(1), 5.

Vergara-Temprado, J., Ban, N., & Schär, C. (2021). Extreme sub-hourly precipitation intensities scale close to the Clausius-Clapeyron rate over Europe. *Geophysical Research Letters*, 48. doi: <https://doi.org/10.1029/2020GL089506>.