

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

**EVALUACIÓN DE ENFOQUE PROBABILÍSTICO PARA LA ESTIMACIÓN DE CAUDALES MÁXIMOS PLUVIALES EN CUENCAS MIXTAS BAJO CAMBIO CLIMÁTICO**

**JORGE ARIAS LEÓN<sup>1</sup>**  
**VIOLETA JIMÉNEZ MONCADA<sup>2</sup>**  
**IGNACIO TORO MENA<sup>3</sup>**  
**RICARDO GONZALEZ VALENZUELA<sup>4</sup>**  
**XIMENA VARGAS MESA<sup>5</sup>**

**RESUMEN**

En cuencas de régimen hidrológico mixto, la estimación del caudal máximo de crecida pluvial depende de la relación entre la precipitación y la elevación de la línea de nieve (LN), ya que esta última define el área aportante pluvial. Los enfoques tradicionales suelen considerar una elevación promedio de la LN o un área pluvial fija, lo que puede conducir a una sub o sobrestimación de los caudales de diseño. Para abordar esta limitación, se evalúa un enfoque basado en el remuestreo aleatorio de las precipitaciones y elevaciones de la LN, obteniendo una distribución empírica de los caudales máximos pluviales que incorpora la variabilidad de ambas, perturbando los resultados con las forzantes de cambio climático, evaluando los escenarios SSP 2-4,5 y 5-8,5, para invierno, periodo 2025-2055. Los resultados muestran una tendencia predominante al alza. En particular, para un período de retorno de 100 años, se proyecta un incremento del caudal máximo del orden del 60%, independientemente del escenario SSP considerado.

---

<sup>1</sup> Ingeniero de Proyectos, Mine Water, WSP – email: [jorge.arias@wsp.com](mailto:jorge.arias@wsp.com)

<sup>2</sup> Ingeniera de Proyectos, Mine Water, WSP – email: [violeta.jimenez@wsp.com](mailto:violeta.jimenez@wsp.com)

<sup>3</sup> Hidrólogo esp. en cambio climático, Mine Water, WSP – [ignacio.toro@wsp.com](mailto:ignacio.toro@wsp.com), [toromena@hotmail.com](mailto:toromena@hotmail.com)

<sup>4</sup> Hidrólogo Senior, Mine Water, WSP Chile – [ricardo.gonzalez@wsp.com](mailto:ricardo.gonzalez@wsp.com)

<sup>5</sup> Profesora Asociada, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile – [xvargas@uchile.cl](mailto:xvargas@uchile.cl)

## 1. INTRODUCCIÓN

En cuencas de régimen hidrológico mixto, el caudal máximo de crecida pluvial depende de la relación entre la precipitación y la elevación de la línea de nieve (LN), ya que esta última determina el área aportante pluvial al separar la superficie en que la precipitación cae de forma líquida (elevaciones menores a LN) y sólida (elevaciones mayores a LN), así como sus parámetros geomorfológicos y su permeabilidad (Curva Número), influyendo en la respuesta de la cuenca (Camarasa et al. 2006).

En el estudio de crecidas en cuencas mixtas, la determinación del área pluvial aportante se basa usualmente en el supuesto de una elevación promedio de la línea de nieve, o en un área de precipitación líquida constante, la cual, en combinación con las precipitaciones máximas, da origen al caudal máximo pluvial. Esto se suele estimar a través de alguna relación empírica (método racional, fórmula de Verni-King, entre otras) o con la aplicación de algún hidrograma unitario como el Triangular, SCS, Linsley, entre otros (Seguel y Stöwhas, 1985).

Estos enfoques no tienen en cuenta la dinámica de las crecidas de origen pluvial en cuencas mixtas, determinada por la frecuencia de los eventos de precipitación y la elevación de la LN, la cual está asociada a la temperatura de cada evento de precipitación y tampoco consideran cómo esta dinámica se refleja en los caudales de crecidas estimados, lo que sí es reflejado en la metodología propuesta por Toro et al. (2025), donde a través de un remuestreo aleatorio independiente de la distribución de probabilidad de las Precipitaciones Máximas ( $P_{\text{máx}}$ ) y sobre la distribución de la LN, se estiman los Caudales Máximos ( $Q_{\text{máx}}$ ) Pluviales.

Por otro lado, el cambio climático introduce una incertidumbre adicional en la hidrología de estas cuencas, dado que el aumento de la temperatura modifica la elevación de la LN y la frecuencia de eventos de precipitación extrema. Esto hace que las series hidrológicas ya no puedan considerarse estacionarias (Lagos et al., 2015), siendo indispensable anticiparse a los efectos que este puede generar en los caudales futuros de crecidas, integrando modelos climáticos que simulen distintos escenarios futuros, como los definidos en las Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (Shared Socioeconomic Pathways o SSP por sus siglas en inglés), considerando escenarios moderados como el SSP 2-4,5, o pesimistas como el SSP 5-8,5 (Tebaldi et al., 2021) en términos de concentraciones de  $\text{CO}_2$ , dado que esto no necesariamente se refleja en magnitud de eventos extremos.

En el marco del cambio climático, la DGOP (2023) ha desarrollado el “Estudio para la incorporación de la variable Cambio Climático en el plan de reconstrucción”. Este estudio constituye un ejemplo concreto de cómo actualmente se están adoptando medidas para considerar los efectos del cambio climático en la planificación y diseño de obras de infraestructura. Para ello, se emplean metodologías de estudios hidrológicos que permiten incorporar el impacto de esta variable en la estimación de parámetros de diseño clave.

Un aumento en la temperatura global podría aumentar el área pluvial aportante en cuencas de régimen hidrológico mixto, lo que resultaría en caudales máximos y volúmenes de escorrentía directa de mayor magnitud (Lagos y Vargas, 2013) Esta situación genera preocupación, dado que estudios indican que durante los años 1963-1992, el mayor porcentaje a nivel mundial de personas afectadas por desastres naturales, así como de daños

materiales y pérdidas humanas, fue producto de inundaciones según la Organización Meteorológica Mundial, WMO (1994). Por lo tanto, una subestimación en los caudales de crecida de diseño podría implicar la pérdida de vidas humanas.

La incorporación de las variaciones de la LN y los efectos del cambio climático en el cálculo de crecidas resulta fundamental para obtener estimaciones más precisas y adaptadas a las condiciones actuales. Estas variables tienen un impacto significativo en la caracterización hidrológica de las cuencas, ya que el aumento de la temperatura y, por consiguiente, incremento de la elevación de la LN derivado del cambio climático afectan la extensión del área pluvial y los caudales generados. Considerar estas dinámicas permite diseñar herramientas y metodologías más robustas, garantizando la adecuada planificación y gestión de recursos hídricos frente a eventos extremos que, debido al cambio climático, se presentan con mayor frecuencia e intensidad.

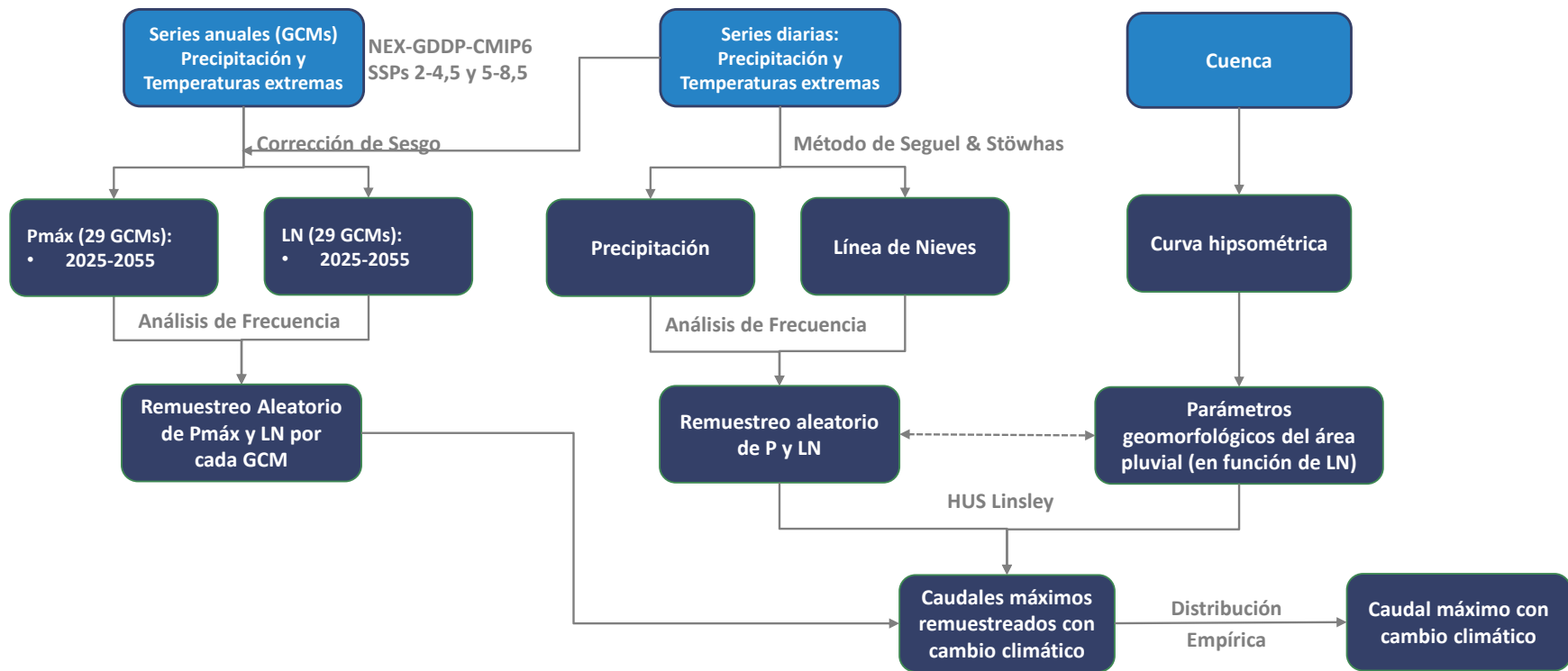
En ese sentido, en el presente trabajo se propone evaluar el impacto del cambio climático sobre los caudales máximos pluviales en cuencas mixtas, utilizando el enfoque propuesto por Toro y otros (2025), que incorpora el efecto conjunto de la precipitación y la elevación de la LN en la generación de eventos de escorrentía pluvial, a través del remuestreo aleatorio de las posibles combinaciones de precipitación y LN, utilizando para ello la distribución de probabilidad de cada una de estas variables, obteniendo como resultado la distribución empírica de los caudales máximos pluviales.

## 2. METODOLOGÍA Y CASO DE ESTUDIO

Se busca evaluar el impacto del cambio climático sobre la magnitud de los caudales máximos pluviales en una cuenca con régimen hidrológico mixto, a través de la aplicación del enfoque probabilístico propuesto por Toro et al. (2025), donde a través del remuestreo de 100.000 posibles combinaciones de  $P_{\text{máx}}$  y LN, se estiman los  $Q_{\text{máx}}$  pluviales, caracterizando los periodos de retorno de los  $Q_{\text{máx}}$  a través de la distribución empírica. La Figura 1 presenta un esquema general de la metodología empleada.

Para esta evaluación se considera la misma cuenca montañosa de régimen mixto evaluada en Toro et al. (2025), ubicada en Chile Central, estimando a través de modelos de cambio climático (GCMs, por sus siglas en inglés *General Circulation Models*) la distribución de probabilidad futura de la  $P_{\text{máx}}$  en 24 horas, así como la asociada a la LN, generando el remuestreo aleatorio para cada GCM, caracterizando para cada uno de ellos su distribución de probabilidad futura, para dos escenarios de concentraciones, SSP 2-4,5 y 5-8,5, para la temporada de invierno y para una ventana temporal de corto plazo, 2025-2055.

El enfoque evaluado considera que la generación del  $Q_{\text{máx}}$  pluvial depende principalmente de la  $P_{\text{máx}}$ , remuestreando esta variable a partir de su distribución de probabilidad, la que es el resultado del análisis de frecuencia de las  $P_{\text{máx}}$  (las que pueden ser diarias o en 24 horas). Por lo anterior, la distribución de probabilidad de la LN corresponde al resultado del análisis de frecuencias de las LN del día de máxima precipitación.



**Figura 1.** Esquema de la metodología empleada

Para cuencas ubicadas a una mayor elevación, muy probablemente la variable principal en la generación de  $Q_{máx}$  pluvial sea la LN máxima asociada a un día con precipitación ( $LN_{máx}$ ), por lo que el remuestreo puede ser aplicado sobre la distribución de  $LN_{máx}$  y sobre la distribución de la precipitación asociada al día de  $LN_{máx}$  (precipitación mayor a cero o algún umbral), analizando combinaciones de menor precipitación, pero de mayor área pluvial. Esa variación del enfoque se profundiza en el análisis realizado por Jiménez et al. (2025).

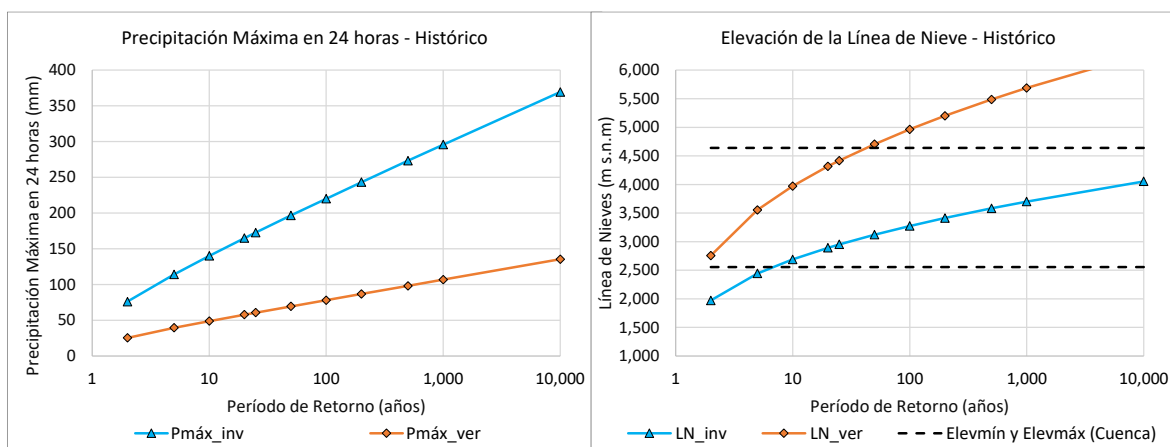
Se define como caso de estudio el análisis de una cuenca montañosa ubicada en Chile Central, la cual por confidencialidad no será identificada, la cual posee un régimen mixto (nivo-pluvial), con elevación media de 3.427 m s.n.m.. Los parámetros geomorfológicos se presentan en la Tabla 1, mientras que la discretización de estos en función de la elevación (lo que luego se vincula con la LN, definiendo así la cuenca pluvial para cada remuestreo) se presenta en los Anexos.

Dado que se observa una cobertura de suelo principalmente homogénea, se adopta un valor constante de la curva número (CN), independiente de la elevación de LN, considerando que para invierno se tendrá una humedad antecedente II, sin embargo, podría también vincularse a la elevación a través del producto CN30-CL (Toro et al., 2023).

**Tabla 1.** Parámetros geomorfológicos de la cuenca y subcuenca analizadas

Parámetro	Unidad	Cuenca
Área total	(km <sup>2</sup> )	67,0
Curva Número   Abstracción Inicial (invierno)	(-)   (mm)	75   16,9
Elevación mínima cuenca	(m s.n.m)	2.557
Elevación máxima cuenca	(m s.n.m)	4.640
Elevación media de la cuenca	(m s.n.m)	3.427
Pendiente media de la cuenca	%	54,7
Largo cauce principal	(km)	15,8
Largo cauce principal al centro de gravedad	(km)	8,4
Elevación mínima cauce	(m s.n.m)	2.570
Elevación máxima cauce	(m s.n.m)	3.745
Pendiente media del cauce	%	7,4

Las  $P_{m\acute{a}x}$  en 24 horas y la elevación de la LN del día de máxima precipitación se caracterizan a través de los registros meteorológicos de una estación ubicada dentro de la cuenca, a una elevación en torno a los 3.500 m s.n.m., con registros que abarcan el periodo 1991-2023 (33 años). La distribución de probabilidad adoptada para  $P_{m\acute{a}x}$  de invierno corresponde a Gumbel, mientras que para LN se escogió la Normal, valores que se presentan en la Figura 2.



**Figura 2.** Precipitación Máxima en 24 horas y elevación de la Línea de Nieve

La tormenta de diseño utilizada para determinar los hidrogramas de crecidas en 24 horas corresponde a la de Basilio Espíldora Grupo III, considerada como adecuada para temporada de invierno, dado que los eventos son más homogéneos y del tipo frontal.

### **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 29 GCMs, dado que fueron descartados los que no presentaban proyecciones para ambos escenarios, además de eliminar modelos que presentan problemas estadísticos.

Estos GCMs corresponden al experimento Coupled Intercomparison Project 6 (CMIP6; Riahi et al. (2017) utilizados en el Sexto Reporte de Cambio Climático (AR6) del IPCC (2021). Se analizan los escenarios SSP 2-4,5 (moderado) y 5-8,5 (pesimista), los que provienen de la combinación de posibles desarrollos de la sociedad (SSP por Social Socioeconomic Pathways) y de concentraciones de gases de efecto invernadero (RCP por Representative Concentration Pathways). Para este estudio se opta por analizar directamente las series de máximas diarias para precipitación y las temperaturas mínima y máxima del día de máxima precipitación, a partir de las cuales se estima la LN, extrayéndolas desde los modelos y luego corrigiéndolas, como se recomienda por Srivastav et al. (2014), dado que una corrección a nivel diario no preservará adecuadamente los estadísticos de los valores extremos.

Se corrige el sesgo a escala anual de las  $P_{\text{máx}}$  diarias de los 29 GCM utilizados, para los SSP 2-4,5 y 5-8,5 mediante el método Quantile Delta Mapping con distribución empírica (QDM, (Cannon et al., 2015)), el cual corrige los GCMs preservando los cambios proyectados sobre sus percentiles (probabilidad), manteniendo la señal de cambio entre el periodo futuro e histórico simulado. Para el caso de la temperatura mínima y máxima es equivalente, con la diferencia de que se corrige utilizando la distribución Normal con un enfoque aditivo.

Para la corrección de los GCMs se considera como periodo histórico observado 1991-2023 de las  $P_{\text{max}}$  en 24 horas y la temperatura mínima y máxima del día de máxima precipitación, luego de verificar que ninguna de las series presenta tendencia estadísticamente significativa (test de Mann-Kendall). Para buscar garantizar la estacionariedad, la corrección de sesgo se realiza sobre ventanas móviles (Kourtis y Tsihrintzis, 2022).

En general, al corregir los GCMs se considera sólo hasta el término del periodo histórico de simulación, que en este caso corresponde al año 2014, debido a que posterior a dicho año, los GCMs utilizan proyecciones de concentraciones de gases de efecto invernadero. En este caso se considera incluir los últimos años registrados (2015-2023) en base a suponer que la diferencia entre las proyecciones de concentraciones y las observadas para estos últimos años no es determinante, en relación con la incorporación de información reciente y valiosa en el contexto de, por ejemplo, la mega sequía.

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 las proyecciones con respecto al caso histórico, 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, la que corresponde a 2025-2055, permitiendo evaluar el efecto del cambio climático sobre una ventana cercana.

### **Precipitaciones Máximas**

Se extraen 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), para luego realizar un análisis de frecuencia a cada modelo, escenario y ventana temporal de interés (2025-2055), estimando para cada GCM periodos de retorno a partir de la distribución de mejor ajuste, reportando luego los percentiles 25, 50 y 75%.

### **Línea de Nieve y Discretización de la Cuenca Pluvial**

Se extraen las temperaturas mínima y máxima del día de máxima precipitación del periodo histórico observado y las simuladas por los GCMs desde las series ya corregidas (un valor por año), estimando la elevación de la LN para el clima histórico y para los GCMs., para luego realizar un análisis de frecuencia a cada modelo, escenario y ventana temporal de interés (2025-2055), estimando para cada GCM periodos de retorno a partir de la distribución de mejor ajuste, reportando luego los percentiles 25, 50 y 75%.

En paralelo, la cuenca completa debe ser discretizada para distintas bandas de elevación, permitiendo vincular así sus parámetros morfométricos con la elevación de la LN, obteniendo, por ejemplo, el área, la pendiente, el largo del cauce principal, largo del cauce al centro de gravedad, tiempo de concentración, curva número (en caso de utilizar productos grillados como el de Toro et al. (2023)), entre otros parámetros en función de la LN.

### **Caudal Máximo Pluvial y Remuestreo Aleatorio**

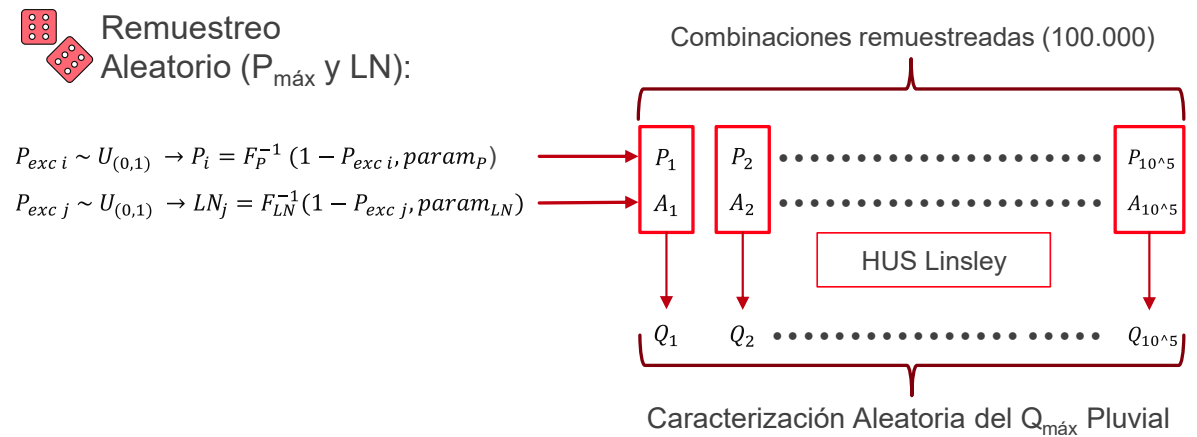
Los caudales máximos instantáneos pluviales se generan a partir de la combinación entre la  $P_{\text{máx}}$  y LN alcanzada durante el evento, lo que permite definir el área aportante (pluvial), la curva número y los parámetros morfométricos de la cuenca para dicho evento.

Aunque la distribución de probabilidad de los caudales máximos pluviales es desconocida, esta proviene de la combinación de las  $P_{\text{máx}}$  y LN, pudiendo obtener la distribución de ambas variables por separado, a través de un análisis de frecuencia. Considerando esto, se caracteriza la distribución de probabilidad de los caudales máximos pluviales a través del remuestreo aleatorio de 100.000 combinaciones de  $P_{\text{máx}}$  y LN.

Para el remuestreo se generan de manera independiente 100.000 números aleatorios entre 0 y 1, para ambas variables. A partir de estos, se estima el valor correspondiente de  $P_{\text{máx}}$  y LN en sus respectivas distribuciones de probabilidad para el periodo histórico observado y para cada GCM y escenario evaluado. Con la LN resultante, se determina el área pluvial mediante la curva hipsométrica de cada cuenca, así como los parámetros morfométricos asociados a dicha área de la cuenca.

Para cada combinación de  $P_{m\acute{a}x}$  y LN, se estima el caudal máximo instantáneo de origen pluvial utilizando el Hidrograma Unitario Sintético de Linsley, calibrado para Chile (DGA, 1995), considerando los parámetros de cuencas ubicadas entre la III y la VI Región (Zona I).

Se obtienen así 100.000 estimaciones de caudal máximo pluvial, lo cual permitiría caracterizar periodos de retorno desde 2 hasta 10.000 años a través de la distribución empírica. En la Figura 3 se presenta un esquema que ejemplifica la metodología aplicada para la caracterización de caudales máximos pluviales para cada GCM y escenario evaluado.



**Figura 3.** Esquema del Remuestreo Aleatorio

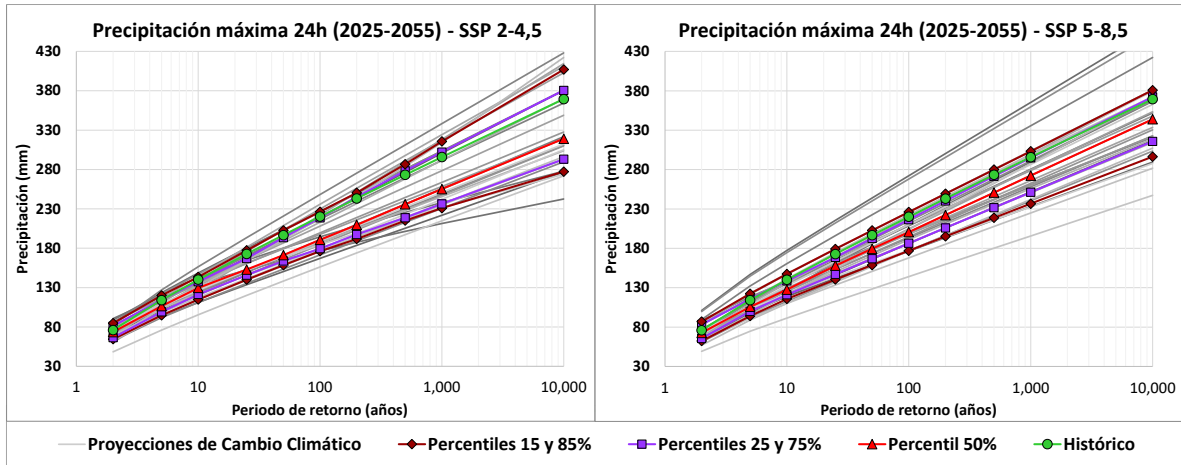
Cabe señalar que este enfoque permite evaluar, dependiendo de la cuenca, combinaciones en las cuales la LN se encuentra bajo la salida de la cuenca, generando caudales nulos (es decir toda la precipitación corresponde a nieve), así como también la posibilidad de que la precipitación remuestreada sea menor a la abstracción inicial del suelo, no generando escorrentía. Estos casos se presentarán en la medida de que las características morfológicas de la cuenca, además de las distribuciones de probabilidad de  $P_{m\acute{a}x}$  y LN así lo permitan.

### 3. RESULTADOS

Para cada variable se presentan los períodos de retorno, tanto la estimación del período histórico observado como las proyecciones de los GCMs al 2025-2055, SSPs 2-4,5 y 5-8,5. Se destacan los percentiles 25, 50 y 75 de los GCMs, caracterizando la incertidumbre y proporcionando alternativas que permitan evaluar distintos niveles de riesgo.

#### Proyección de Precipitaciones Máximas en 24 horas

En la Figura 4 se presentan las proyecciones de cambio climático de las  $P_{m\acute{a}x}$  en 24 horas para el período 2025-2055, escenarios SSP 2-4,5 y 5-8,5, destacando el caso histórico y los percentiles 25, 50 y 75% estimados en base a los GCMs. Los valores se muestran en la **Tabla 4**, adjunta en Anexos.

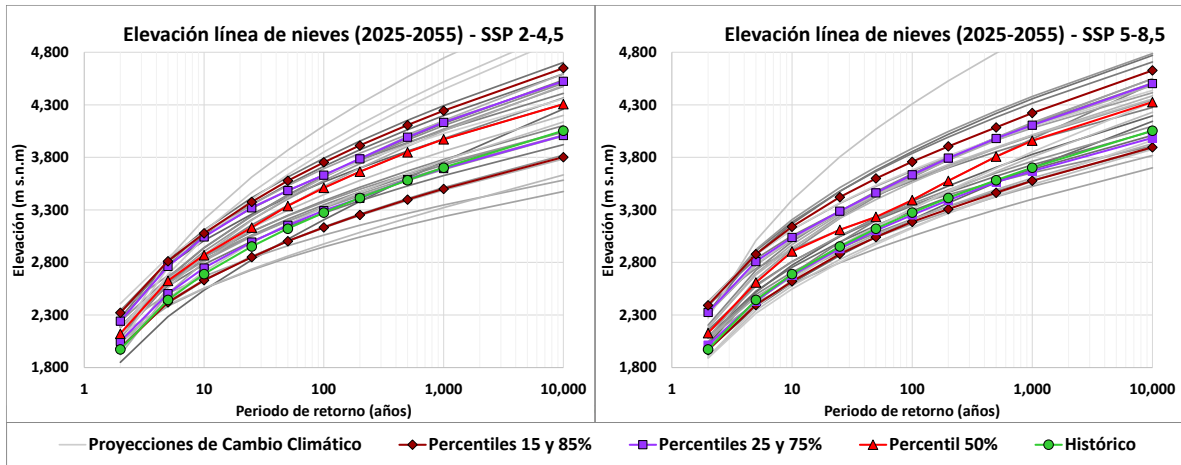


**Figura 4.** Proyecciones de Precipitaciones Máximas en 24 horas en período 2025-2055, escenarios SSP 2-4,5 y 5-8,5

Los resultados muestran una alta dispersión para ambos escenarios, lo que ratifica la necesidad de evaluar más de un escenario y un gran número de modelos. El percentil 75% de las proyecciones de cambio climático estima  $P_{m\acute{a}x}$  similares a las del período histórico, por ende, la mayoría de los modelos proyecta disminuciones hacia el futuro proyectado (2025-2055) para ambos escenarios SSP.

### Proyección de Elevación de Línea de Nieve

En la Figura 5 se presentan las proyecciones de cambio climático de la elevación de la LN para el período 2025-2055, escenarios SSP 2-4,5 y 5-8,5, destacando el caso histórico y los percentiles 25, 50 y 75% estimados en base a los GCMs. Los valores se muestran en la **Tabla 5**, adjunta en Anexos.



**Figura 5.** Proyecciones de Elevación de Línea de Nieve, período 2025-2055, escenarios SSP 2-4,5 y 5-8,5

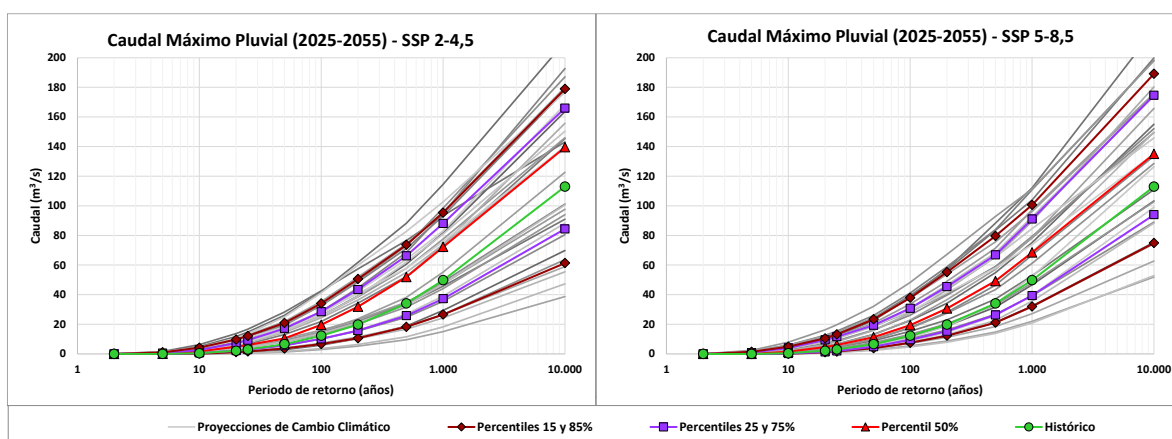
Se observa que, si bien los resultados presentan una alta dispersión en ambos escenarios la gran mayoría de los GCMs proyecta un aumento en la elevación de la LN, lo que conlleva

un aumento del área pluvial aportante en eventos de precipitación para 2025-2055, siendo ligeramente mayor para el escenario SSP 5-8,5. Este comportamiento está estrechamente vinculado al aumento de temperaturas esperado hacia el futuro y contrasta con las  $P_{m\acute{a}x}$ , donde se evidencia una se\u00f1al clara de disminuci\u00f3n.

La comparaci\u00f3n entre las proyecciones del percentil 50% y la estimaci\u00f3n hist\u00f3rica indica que, para un per\u00edodo de retorno de 10 a\u00f1os, la elevaci\u00f3n de la l\u00ednea de nieve aumentar\u00eda entre 180 y 216 metros, dependiendo del escenario SSP considerado. Este incremento se traduce en una expansi\u00f3n significativa del \u00e1rea pluvial de la cuenca, que podr\u00eda triplicarse o incluso quintuplicarse en relaci\u00f3n con el valor hist\u00f3rico. Los detalles de estas estimaciones pueden revisarse en la **Tabla 6**, adjunta en Anexos.

### Proyecci\u00f3n de Caudales M\u00e1ximos Pluviales

En la Figura 6 se presentan las proyecciones de cambio clim\u00e1tico de los caudales m\u00e1ximos pluviales en el per\u00edodo 2025-2055, para los escenarios SSP 2-4,5 y 5-8,5, correspondientes a un evento de precipitaci\u00f3n m\u00e1xima de 24 horas de duraci\u00f3n. Se muestran los percentiles 25, 50 y 75% estimados en base a los GCMs junto con los estimados en el per\u00edodo hist\u00f3rico.



**Figura 6.** Proyecciones de Caudal M\u00e1ximo Pluvial en per\u00edodo 2025-2055, escenarios SSP 2-4,5 y 5-8,5

Se observa que, si bien los resultados para 2025-2055 presentan una alta dispersi\u00f3n, la gran mayor\u00eda de los modelos proyecta un aumento relevante en los caudales m\u00e1ximos pluviales, donde el factor determinante lo constituye el aumento de la LN y, por consiguiente, del \u00e1rea pluvial, independientemente del SSP considerado.

Se observa que el percentil 50% de las proyecciones se sit\u00fa por encima de la estimaci\u00f3n hist\u00f3rica, lo que indica una tendencia predominante al alza en los caudales m\u00e1ximos pluviales para el per\u00edodo 2025-2055. En particular, para este percentil y un per\u00edodo de retorno de 100 a\u00f1os, se proyecta un incremento del caudal m\u00e1ximo del orden del 60%, independientemente del SSP.

La Tabla 2 presenta la relaci\u00f3n entre las variables proyectadas y sus valores hist\u00f3ricos, considerando los percentiles 25, 50 y 75%.

**Tabla 2.** Estimación histórica, proyecciones y cambios proyectados del caudal máximo pluvial

Proyección de Q <sub>máx</sub> 24h (2025-2055)		Percentil	Periodo de Retorno (años)								
			2	5	10	25	50	100	1.000	10.000	
Caudal Máximo Pluvial (m <sup>3</sup> /s)	Histórica	-	0,0	0,0	0,5	3,0	6,6	12,3	49,8	113,0	
	SSP 2-4,5	25%	0,0	0,0	0,6	2,9	5,8	10,2	37,3	84,4	
		50%	0,0	0,2	1,8	6,0	10,5	19,6	72,3	139,5	
		75%	0,0	0,6	2,7	9,3	17,2	28,5	88,1	166,0	
	SSP 5-8,5	25%	0,0	0,0	0,3	2,0	4,8	9,5	39,4	94,0	
		50%	0,0	0,0	1,5	6,0	11,3	19,4	68,5	135,0	
		75%	0,0	0,9	4,0	11,6	19,3	30,8	91,0	174,7	
	Cambio sobre Caudal Máximo Pluvial (%)	SSP 2-4,5	25%	-	-	20%	-3%	-12%	-17%	-25%	-25%
			50%	-	-	260%	100%	59%	59%	45%	23%
75%			-	-	440%	210%	161%	132%	77%	47%	
SSP 5-8,5		25%	-	-	-40%	-33%	-27%	-23%	-21%	-17%	
		50%	-	-	200%	100%	71%	58%	38%	19%	
		75%	-	-	700%	287%	192%	150%	83%	55%	

Se observa que, incluso considerando una ventana temporal de corto plazo para las proyecciones de caudales máximos pluviales, se obtiene un aumento significativo respecto del periodo histórico. Este incremento es más severo en los periodos de retorno más bajos, dado que el aumento del área pluvial en esos casos es mayor.

Si bien para el caso histórico se estimaban caudales nulos para periodos de retorno bajo, el enfoque aplicado es capaz de reflejar que, bajo condiciones proyectadas de cambio climático, estos pasan a tener caudales mayores a cero.

En base a los resultados se puede suponer que, si los cambios para una ventana de corto plazo son significativos, estos lo serán aún más para ventanas de mediano y largo plazo, dado que se espera un mayor incremento de la temperatura y por consiguiente, del área pluvial.

#### 4. CONCLUSIONES

El análisis probabilístico de la relación entre la  $P_{máx}$  y la elevación de la LN en cuencas con régimen hidrológico mixto permite comprender de mejor forma los factores que determinan los caudales máximos de crecida pluvial. Los enfoques tradicionales pueden llevar a subestimar o sobreestimar los caudales de diseño, lo que resalta la importancia de métodos más integrales.

El enfoque utilizado en este estudio incorpora el efecto conjunto de las proyecciones de  $P_{máx}$  y las elevaciones de la LN, evaluadas individualmente para cada GCM considerado. Esto proporciona un marco de evaluación más robusto, ya que las estimaciones se basan directamente en las proyecciones de cada GCM, sin aplicar transformaciones sobre los registros históricos.

Las proyecciones de  $P_{\text{máx}}$  en 24 horas muestran principalmente disminuciones para el período 2025-2055 con respecto al histórico, independientemente del escenario SSP considerado. En cuanto a las proyecciones de la elevación de LN para el día de máxima precipitación se obtiene un aumento consistente para el período 2025-2055 respecto al histórico. Considerando el percentil 50% de las proyecciones, para un período de retorno de 10 años se estima un incremento en la elevación que oscila entre 180 y 216 metros, lo que se reflejaría en un incremento del área pluvial del orden de 3 a 5 veces.

En cuanto a las proyecciones del caudal máximo pluvial, se obtiene una tendencia predominante al alza para el período 2025–2055. En particular, para un período de retorno de 100 años, se proyecta un incremento del caudal máximo del orden del 60%, independientemente del escenario SSP considerado.

Los caudales máximos pluviales proyectados resultan de la combinación de las proyecciones entre las  $P_{\text{máx}}$  y la elevación de la LN. Si bien se estima una disminución de las  $P_{\text{máx}}$ , este efecto se revierte por el importante ascenso de la LN, que amplía el área pluvial aportante, lo que se refleja en incremento de los caudales máximos de origen pluvial.

Se recomienda ampliar este análisis incorporando proyecciones para ventanas temporales más lejanas, como finales de siglo, pues si los cambios de corto plazo resultan significativos, es probable que lo sean aún más en horizontes lejanos, asociados a un mayor incremento de temperatura y, por ende, del área pluvial. Asimismo, se sugiere considerar la temporada de verano, donde las  $P_{\text{máx}}$  son menores pero la elevación de la línea de nieve es mayor, factor que, dada su estrecha relación con los caudales máximos pluviales, podría favorecer crecidas estivales superiores a las invernales. Un enfoque con mayor alcance temporal y estacional permitiría anticipar de forma más efectiva eventos extremos futuros y planificar infraestructura de manera más eficiente y resiliente.

## REFERENCIAS

- Camarasa, A., López, M., & Pascual, J. (2006). Análisis Mediante SIG de los Parámetros de Producción de Escorrentía. Valencia.
- 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*.
- Dirección General de Obras Públicas (DGOP). (2023). Estudio para la incorporación de la variable Cambio Climático en el plan de reconstrucción. Santiago, Chile.
- Dirección General de Aguas (DGA). (1995). Manual de Crecidas.
- 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.
- Jiménez, V., Toro, I., González, R., & Vargas, X. (2025). Enfoque probabilístico para la estimación del caudal máximo pluvial en cuencas mixtas y su aplicación bajo escenarios de cambio climático. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil.

- 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
- Lagos, M., & Vargas, X. (2013). Diseño hidrológico en cuencas de régimen hidrológico mixto, incertidumbre y cambio climático: el caso del embalse Puclaro.
- Lagos, M., Bobadilla, M., Vargas, X., Cepeda, J., Silva, V., Uribe, F., & Vásquez, N. (2015). Proyecciones de crecidas en cuencas andinas bajo distintos modelos de circulación general.
- 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 17<sup>th</sup>. International Conference on Mine Closure, Australian Centre for Geomechanics*, (págs. 993-1004). Perth. doi: [https://doi.org/10.36487/ACG\\_repo/2415\\_71](https://doi.org/10.36487/ACG_repo/2415_71)
- 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.
- Seguel, R., & Stöwhas, L. (1985). “Estimación de crecidas de diseño en cuencas mixtas pluvio nivales”. VII Congreso Nacional de Ingeniería Hidráulica, SOCHID.
- 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., & al., e. (2022). NASA Global Daily Downscaled Projections, CMIP6. *Sci Data* 9, 262. doi:<https://doi.org/10.1038/s41597-022-01393-4>.
- Toro, I., Jiménez, V., Arias, J., González, R., & Vargas, X. (2025). Estimación del Caudal Máximo Pluvial en Cuencas Mixtas sin Control Fluviométrico a través de un Enfoque Probabilístico. XXVII Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica. Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica. Concepción, Chile.
- Toro, I., Morales, H., González, R., & Vargas, X. (2023). CN30-CL, Curva Número grillada de 30 metros de resolución para Chile Continental. XXVI Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica. Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica. Valdivia, Chile.
- World Meteorological Organization (WMO). (1994). Guide to hydrological practices.

## ANEXOS

**Tabla 3.** Discretización de parámetros geomorfológicos de la cuenca analizada

Cuenca	Área	Elevación Mínima	Elevación Máxima	Rango Elevación	Elevación Media	Pendiente Media	Largo Cauce Principal	Largo Cauce - CG	Tiempo al Peak	Tiempo Uniforme	Tiempo Base
	(km <sup>2</sup> )	(m s.n.m.)	(m s.n.m.)	(m)	(m s.n.m.)	(%)	(km)	(km)	(h)	(h)	(h)
C1	0,7	2.557	2.609	52	2.579	54,7	0,4	0,2	0,05	0,01	0,47
C2	1,6	2.557	2.661	104	2.600	54,7	0,8	0,4	0,09	0,02	0,75
C3	2,5	2.557	2.713	156	2.622	54,7	1,2	0,6	0,12	0,02	0,99
C4	3,6	2.557	2.765	208	2.644	54,7	1,6	0,8	0,16	0,03	1,21
C5	4,8	2.557	2.817	260	2.666	54,7	2,0	1,0	0,19	0,03	1,40
C6	6,1	2.557	2.869	312	2.687	54,7	2,4	1,3	0,22	0,04	1,59
C7	7,5	2.557	2.922	365	2.709	54,7	2,8	1,5	0,25	0,05	1,76
C8	9,0	2.557	2.974	417	2.731	54,7	3,2	1,7	0,28	0,05	1,93
C9	10,7	2.557	3.026	469	2.753	54,7	3,6	1,9	0,31	0,06	2,09
C10	12,6	2.557	3.078	521	2.774	54,7	3,9	2,1	0,34	0,06	2,25
C11	14,6	2.557	3.130	573	2.796	54,7	4,3	2,3	0,37	0,07	2,40
C12	16,9	2.557	3.182	625	2.818	54,7	4,7	2,5	0,39	0,07	2,54
C13	19,6	2.557	3.234	677	2.840	54,7	5,1	2,7	0,42	0,08	2,69
C14	22,4	2.557	3.286	729	2.861	54,7	5,5	2,9	0,45	0,08	2,82
C15	25,2	2.557	3.338	781	2.883	54,7	5,9	3,1	0,48	0,09	2,96
C16	28,4	2.557	3.390	833	2.905	54,7	6,3	3,3	0,50	0,09	3,09
C17	32,2	2.557	3.442	885	2.927	54,7	6,7	3,6	0,53	0,10	3,22
C18	36,1	2.557	3.494	937	2.948	54,7	7,1	3,8	0,56	0,10	3,35
C19	40,2	2.557	3.546	989	2.970	54,7	7,5	4,0	0,58	0,11	3,47
C20	44,3	2.557	3.599	1.042	2.992	54,7	7,9	4,2	0,61	0,11	3,60
C21	48,0	2.557	3.651	1.094	3.013	54,7	8,3	4,4	0,63	0,12	3,72
C22	51,5	2.557	3.703	1.146	3.035	54,7	8,7	4,6	0,66	0,12	3,84
C23	54,8	2.557	3.755	1.198	3.057	54,7	9,1	4,8	0,68	0,12	3,96
C24	57,6	2.557	3.807	1.250	3.079	54,7	9,5	5,0	0,71	0,13	4,07
C25	59,5	2.557	3.859	1.302	3.100	54,7	9,9	5,2	0,73	0,13	4,19
C26	61,0	2.557	3.911	1.354	3.122	54,7	10,3	5,4	0,76	0,14	4,30
C27	62,5	2.557	3.963	1.406	3.144	54,7	10,7	5,6	0,78	0,14	4,41
C28	63,7	2.557	4.015	1.458	3.166	54,7	11,1	5,8	0,81	0,15	4,52
C29	64,6	2.557	4.067	1.510	3.187	54,7	11,4	6,1	0,83	0,15	4,63
C30	65,3	2.557	4.119	1.562	3.209	54,7	11,8	6,3	0,85	0,16	4,74
C31	65,8	2.557	4.171	1.614	3.231	54,7	12,2	6,5	0,88	0,16	4,85
C32	66,2	2.557	4.223	1.666	3.253	54,7	12,6	6,7	0,90	0,16	4,95
C33	66,4	2.557	4.275	1.718	3.274	54,7	13,0	6,9	0,93	0,17	5,06
C34	66,5	2.557	4.328	1.771	3.296	54,7	13,4	7,1	0,95	0,17	5,16
C35	66,7	2.557	4.380	1.823	3.318	54,7	13,8	7,3	0,97	0,18	5,26
C36	66,8	2.557	4.432	1.875	3.340	54,7	14,2	7,5	1,00	0,18	5,36
C37	66,9	2.557	4.484	1.927	3.361	54,7	14,6	7,7	1,02	0,19	5,46
C38	66,9	2.557	4.536	1.979	3.383	54,7	15,0	7,9	1,04	0,19	5,56
C39	67,0	2.557	4.588	2.031	3.405	54,7	15,4	8,1	1,07	0,19	5,66
C40	67,0	2.557	4.640	2.083	3.427	54,7	15,8	8,4	1,09	0,20	5,76

**Tabla 4.** Estimación histórica, proyecciones y cambios de Precipitación Máxima

Variable	Estimación/ Proyección	Percentil	Periodo de Retorno (años)							
			2	5	10	25	50	100	1.000	10.000
P <sub>máx</sub> (mm)	Histórica	-	76,1	114,1	140,1	172,8	196,7	220,1	295,8	369,4
	SSP 2-4,5	25%	66,3	99,1	121,3	145,8	163,8	179,4	236,3	293,0
		50%	73,5	106,4	129,6	153,0	171,2	190,7	255,2	319,1
		75%	81,0	114,6	137,4	166,9	193,5	218,6	302,1	380,5
	SSP 5-8,5	25%	65,6	100,0	121,1	147,0	166,8	186,4	251,2	315,8
		50%	72,7	105,8	127,6	158,0	179,4	200,6	272,4	344,0
75%		83,2	115,8	138,7	168,5	192,6	216,4	294,9	372,2	
Cambio sobre P <sub>máx</sub> (%)	SSP 2-4,5	25%	-13%	-13%	-13%	-16%	-17%	-18%	-20%	-21%
		50%	-3%	-7%	-7%	-11%	-13%	-13%	-14%	-14%
		75%	6%	0%	-2%	-3%	-2%	-1%	2%	3%
	SSP 5-8,5	25%	-14%	-12%	-14%	-15%	-15%	-15%	-15%	-15%
		50%	-4%	-7%	-9%	-9%	-9%	-9%	-8%	-7%
		75%	9%	1%	-1%	-2%	-2%	-2%	0%	1%

**Tabla 5.** Estimación histórica, proyecciones y cambios de Elevación Línea de Nieve

Variable	Estimación/ Proyección	Percentil	Periodo de Retorno (años)							
			2	5	10	25	50	100	1.000	10.000
Elevación LN (m s.n.m.)	Histórica	-	1.973	2.444	2.690	2.952	3.122	3.275	3.702	4.054
	SSP 2-4,5	25%	2.049	2.503	2.748	2.994	3.154	3.294	3.694	4.008
		50%	2.122	2.626	2.870	3.133	3.338	3.511	3.972	4.307
		75%	2.241	2.763	3.043	3.320	3.484	3.631	4.133	4.525
	SSP 5-8,5	25%	2.013	2.432	2.679	2.932	3.104	3.252	3.670	3.986
		50%	2.128	2.609	2.906	3.111	3.234	3.393	3.960	4.326
75%		2.325	2.809	3.039	3.289	3.463	3.634	4.107	4.503	
Cambio sobre Elevación LN (m)	SSP 2-4,5	25%	77	59	58	42	32	19	-9	-46
		50%	150	182	180	181	216	236	270	253
		75%	269	319	353	368	362	357	431	471
	SSP 5-8,5	25%	41	-12	-11	-20	-18	-23	-32	-68
		50%	155	166	216	158	112	118	258	272
		75%	352	365	349	336	341	359	405	449

**Tabla 6.** Estimación histórica, proyecciones y cambios de Área Pluvial

Variable	Estimación/ Proyección	Percentil	Periodo de Retorno (años)							
			2	5	10	25	50	100	1.000	10.000
Área Pluvial (km <sup>2</sup> )	Histórica	-	0,0	0,0	2,1	8,4	14,3	43,2	51,4	64,4
	SSP 2-4,5	25%	0,0	0,0	3,2	9,7	15,6	43,7	50,9	63,6
		50%	0,0	1,0	6,1	14,7	25,2	59,2	62,8	66,5
		75%	0,0	3,5	11,3	24,2	35,3	63,3	65,4	66,9
	SSP 5-8,5	25%	0,0	0,0	1,8	7,8	13,6	41,8	49,3	63,1
		50%	0,0	0,7	7,0	13,8	19,6	57,7	62,4	66,5
75%		0,0	4,5	11,2	22,5	33,7	63,0	65,1	66,9	
Cambio sobre Área Pluvial (km <sup>2</sup> )	SSP 2-4,5	25%	0,0	0,0	1,1	1,3	1,3	0,5	-0,5	-0,8
		50%	0,0	1,0	4,0	6,3	10,9	16,0	11,4	2,1
		75%	0,0	3,5	9,2	15,8	21,0	20,1	14,0	2,5
	SSP 5-8,5	25%	0,0	0,0	-0,3	-0,6	-0,7	-1,4	-2,1	-1,3
		50%	0,0	0,7	4,9	5,4	5,3	14,5	11,0	2,1
		75%	0,0	4,5	9,1	14,1	19,4	19,8	13,7	2,5