

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXVII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**PARÁMETROS DE DISEÑO DE INFRAESTRUCTURA HIDRÁULICA
EN CHILE CENTRAL CONSIDERANDO EL EFECTO
DEL CAMBIO CLIMÁTICO**

MILO MILLÁN R.¹

RESUMEN

A raíz de eventos extremos de crecidas en cauces naturales ocurridos en el país en años recientes, especialmente las crecidas de junio y agosto del año 2023, la Dirección de Obras Hidráulicas del MOP encargó un estudio al DICTUC denominado “ESTUDIO DE CARACTERIZACIÓN DE LOS EVENTOS DE PRECIPITACIONES Y CRECIDAS DE RÍOS OCURRIDOS EN JUNIO Y AGOSTO DE 2023 EN LA ZONA CENTRAL DE CHILE”, el cual fue concluido a inicios del 2025. Junto con el análisis y caracterización de los eventos del año 2023, se estudiaron temáticas relativas a la planificación territorial, afectaciones por inundación y la incidencia del cambio climático en los principales parámetros hidrológicos que inciden en estas crecidas en cuencas pluvio-nivales.

El presente trabajo se centra en el análisis de los cambios que se están observando en las características de los eventos hidrometeorológicos extremos que afectan a cuencas de Chile central por efecto del cambio climático, generando a raíz de los resultados obtenidos, propuestas de modificaciones en las precipitaciones de diseño y en la línea de nieves asociada, de forma tal de poder enfrentar estos eventos de crecidas de mejor manera a futuro, incorporando dichas propuestas en el diseño de nueva infraestructura hidráulica más resiliente.

¹ Ingeniero Civil, Jefe División de Cauces y Drenaje Urbano, DOH-MOP – email: milo.millan@mop.gov.cl

1. INTRODUCCIÓN

La Dirección de Obras Hidráulicas (DOH) del Ministerio de Obras Públicas (MOP), es un servicio público que tiene entre sus competencias, el “estudio, proyección, construcción y conservación de las obras de defensa de terrenos y poblaciones contra crecidas de corrientes de agua...”.

Dado lo anterior, la DOH desarrolla infraestructura hidráulica para entregar protección a la población ante crecidas en cauces naturales y también se pronuncia técnicamente en materias hidráulicas, respecto a proyectos de otros servicios públicos o de particulares en estos cauces.

Por su parte el DICTUC es un organismo que presta servicios de ingeniería multidisciplinarios y que cuenta con amplia experiencia en el desarrollo de estudios en temas hidráulicos y de cambio climático, que conformó para estos fines un equipo de trabajo con destacados académicos e investigadores de la Pontificia Universidad Católica de Chile.

Por lo anterior, se desarrolló un estudio DOH – DICTUC con uno de sus focos en la adaptación al cambio climático, generando propuestas para la incorporación a los criterios de diseño de la infraestructura hidráulica de aquellos cambios observados en los últimos años en aquellas variables hidrológicas relevantes en la generación de las crecidas en cuencas pluvio-nivales, como son las precipitaciones diarias y las temperaturas asociadas, así como también se analizaron los pronósticos futuros de la evolución de estas variables, considerando las proyecciones de cambio climático, elementos esenciales para la toma de decisiones de diseño que pueda llevar a desarrollar infraestructura hidráulica más resiliente ante eventos extremos.

2. EVENTOS EXTREMOS RECIENTES

Algunos ejemplos recientes de eventos extremos de crecidas, donde se combinan precipitaciones intensas con altas temperaturas en Chile central, son los siguientes:

a) **Evento de enero de 2021:** En relación a este evento, Garreaud et al. (2021) señalaron lo siguiente:

- “Entre el 28 y el 31 de enero de 2021 la zona central de Chile -desde la región de Valparaíso hasta la Araucanía- experimentó una tormenta de gran magnitud, con acumulaciones entre 40 y 120 mm, intensidades superiores a 10 mm/hora, granizo y actividad eléctrica... La tormenta fue iniciada por la llegada al territorio nacional de un río atmosférico zonal (ZAR), una banda donde ocurre un gran transporte de vapor de agua conducido por fuertes vientos del Oeste. De acuerdo con el transporte de vapor de agua, este río califica en la categoría moderado, pero cálido, con una isoterma 0 °C por sobre los 3.500 metros de altura durante el periodo de precipitación”.
- Dicho evento tuvo como principal efecto, la activación de quebradas y cauces en cordillera, con flujos aluvionales en varios casos, afectando infraestructura, caminos y sectores poblados, en comunas como San José de Maipo y Lo Barnechea.

b) **Eventos de junio y agosto del año 2023:** Ocurrieron dos eventos extremos de crecidas en ríos y otros cauces de la zona central de Chile durante el año 2023, en menos de dos meses:

- En el primero de ellos, a contar del día jueves 22 de junio de 2023 ingresó un sistema frontal al territorio nacional, afectando principalmente a la zona central, entre las regiones de Valparaíso a Biobío. Dicho frente resultó ser un sistema frontal cálido, donde las precipitaciones se concentraron con mayor volumen en sectores cordilleranos y precordilleranos; además, vino acompañado de un río atmosférico, que aportó humedad adicional, intensificando las precipitaciones del sistema frontal.
- Las precipitaciones tanto en el valle como en cordillera, activaron ríos, esteros y quebradas de varias regiones del país y producto de este sistema frontal cálido, la isoterma cero estuvo en cotas muy superiores a las normales, incluso sobre los 3.000 m.s.n.m., generando crecidas extraordinarias en la mayoría de los cauces de estas regiones.
- De forma análoga, el día 18 de agosto de 2023 ingresó otro sistema frontal al territorio nacional, que también fue acompañado de un río atmosférico, con una precipitación distribuida tanto en cordillera como en valle central y costa, con una isoterma cero no tan elevada como el evento anterior de junio, aunque igual sobre los valores normales de invierno. Este nuevo evento se concentró entre las regiones de O'Higgins a Biobío, provocando nuevamente crecidas y desborde de ríos, esteros y activación de quebradas.
- Ambos eventos ocasionaron grandes crecidas y numerosos desbordes e inundaciones, con afectación a importante infraestructura pública y privada, entre ellas viviendas, puentes, caminos, bocatomas, terrenos agrícolas, etc.



Figura 1: Corte Ruta G-25 Sector San Alfonso Enero 2021, San José de Maipo, Región Metropolitana



Figura 2: Desborde río Mataquito Junio 2023, Región del Maule

3. ESTUDIO DOH - DICTUC

Debido a la ocurrencia de eventos como los anteriormente descritos, la DOH encargó al DICTUC elaborar la consultoría “ESTUDIO DE CARACTERIZACIÓN DE LOS EVENTOS DE PRECIPITACIONES Y CRECIDAS DE RÍOS OCURRIDOS EN JUNIO Y AGOSTO DE 2023 EN LA ZONA CENTRAL DE CHILE”, que se enfocó principalmente en caracterizar los eventos y realizar propuestas para enfrentar este tipo de fenómenos climáticos de mejor manera a futuro, tanto en el ámbito de la planificación territorial, como en el diseño de infraestructura hidráulica.

Los principales objetivos del trabajo fueron:

- Caracterizar el comportamiento de los grandes ríos en los eventos de junio y agosto 2023.
- Caracterizar hidrológicamente las crecidas registradas en las cuencas a estudiar.
- Identificar áreas inundadas, puntos de desborde, viviendas e infraestructura afectadas.
- Investigar cambios en los patrones históricos de precipitación y temperaturas durante grandes eventos, considerando también escenarios futuros de cambio climático.
- Recomendar actualizaciones en normas de diseño de nueva infraestructura hidráulica.

Las cuencas y cauces de interés para el estudio se ubican en las regiones de O'Higgins, Maule, Ñuble y Biobío e incluyeron las cuencas de los ríos Rapel, Mataquito, Maule, Itata y Biobío.

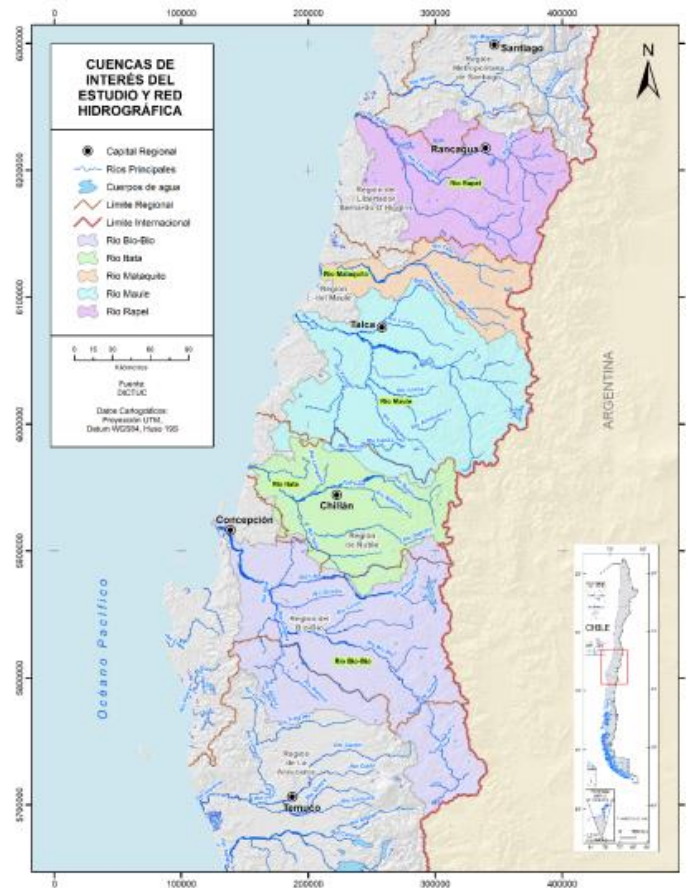


Figura 3: Área en estudio, cuencas de los ríos Rapel, Mataquito, Maule, Itata y Biobío

En el presente trabajo, se presentan algunos de los resultados obtenidos del estudio DOH – DICTUC, relativos a la caracterización hidrológica de los eventos de junio y agosto 2023, así como análisis de cambios en los parámetros hidrológicos de precipitaciones diarias y temperaturas en las últimas décadas y sus proyecciones futuras considerando escenarios de cambio climático.

Con ello finalmente, se proponen ajustes a los valores de los parámetros hidrológicos utilizados tradicionalmente para el diseño de infraestructura hidráulica, que a futuro se espera incorporar a las normas y manuales de diseño.

4. CARACTERIZACIÓN DE PRECIPITACIONES E ISOTERMA CERO EN EVENTOS DE JUNIO Y AGOSTO 2023

Se analizaron los registros horarios de 213 estaciones pluviométricas para el evento de junio 2023 y 189 estaciones para el evento de agosto 2023.

Se muestran en la Figura 4 los periodos de retorno estimados para una precipitación de 24 horas, resaltando con simbología naranja claro en vez de naranja oscuro, cuando la magnitud de agua caída en las 24 horas más lluviosas supera el máximo histórico registrado en la estación.

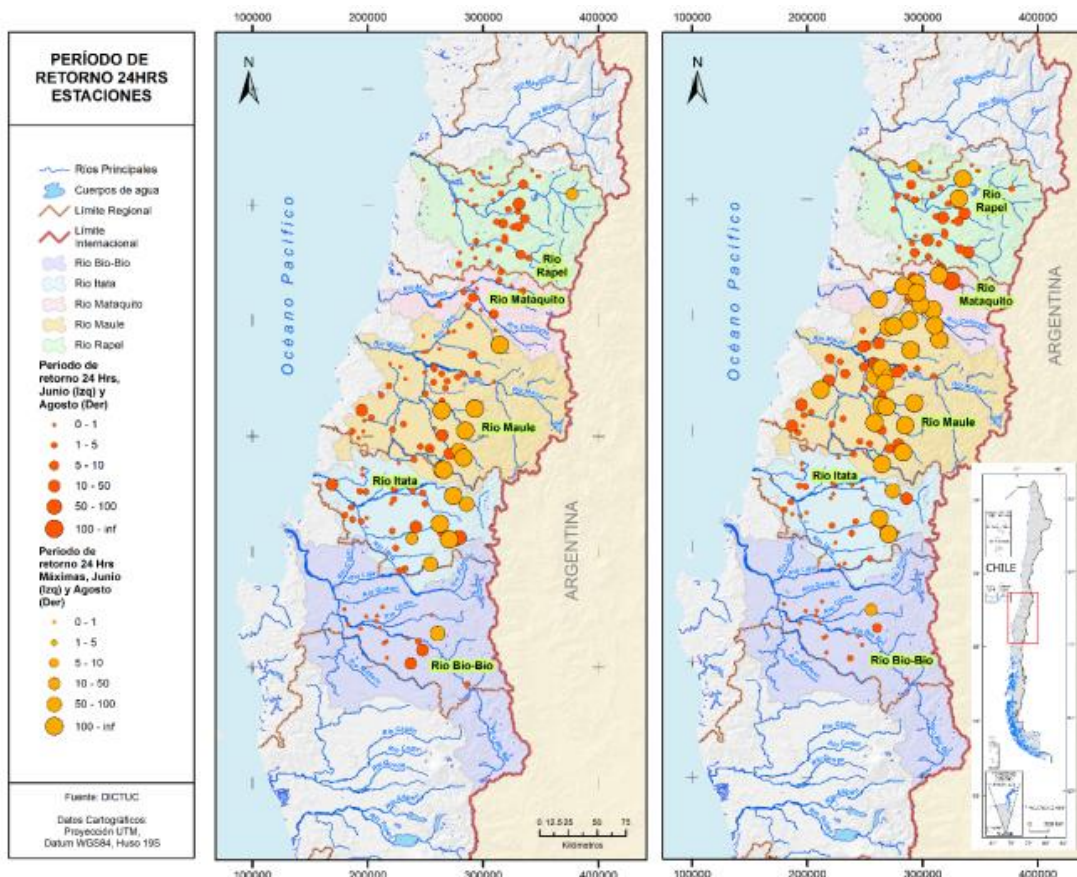


Figura 4: Periodos de Retorno Precipitaciones en 24 horas y Registros Máximos Históricos, eventos junio y agosto 2023

Un dato relevante de este análisis, es que para la precipitación máxima en 24 horas, 17 estaciones en junio 2023 y 33 estaciones en agosto 2023 superaron su registro máximo histórico, efecto que se incrementó para mayores duraciones; por ejemplo, para 72 horas, 36 estaciones en junio 2023 y 48 estaciones en agosto 2023 superaron sus máximos registros históricos.

En relación a la ubicación de la isoterma cero durante los eventos de junio y agosto 2023, se analizaron las temperaturas registradas en estaciones representativas en cada cuenca, para determinar su evolución durante toda la duración de ambos eventos. Se analizaron 43 estaciones para el evento de junio 2023 y 48 para el de agosto 2023. Con ello, se realizó un análisis espacial de las temperaturas basado en los gradientes de esta variable con la elevación a la que se registra, los resultados se muestran en la figura siguiente:

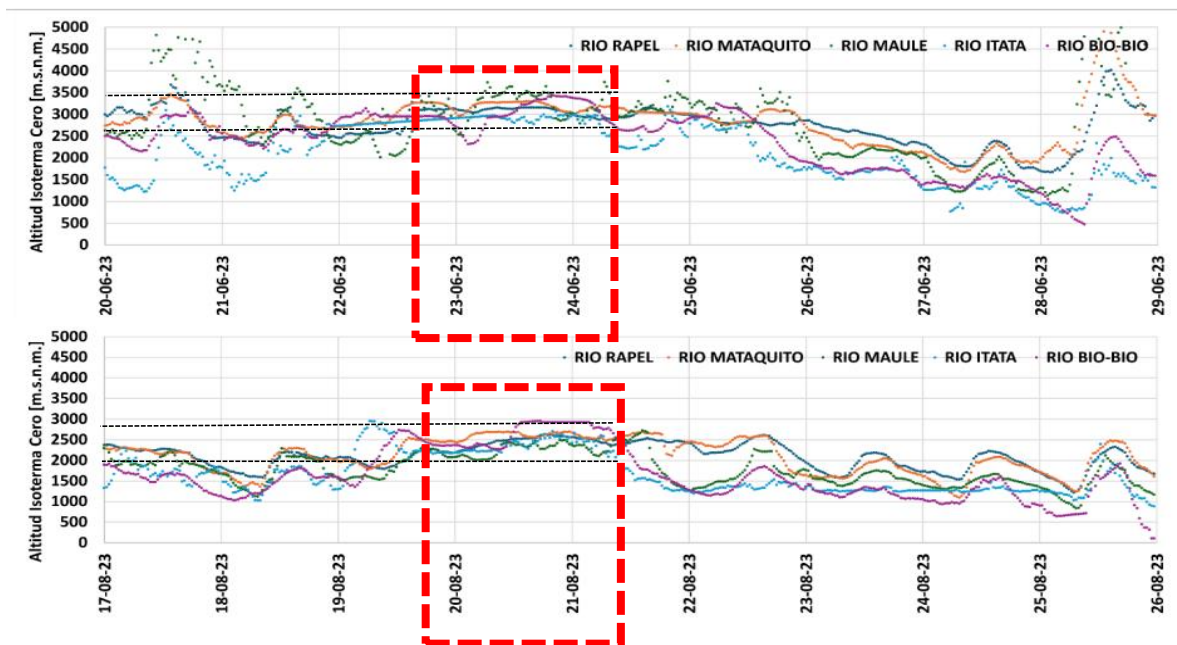


Figura 5: Evolución Isoterma Cero durante eventos de junio y agosto 2023

(Se enmarcan en línea roja los días donde se concentraron las mayores precipitaciones con isoterma cero elevada)

Se destaca en la Figura 5 para el evento de junio 2023, dos días donde se concentró el mayor volumen de precipitación con una isoterma cero elevada, con un valor medio de aproximadamente **3.100 m.s.n.m.**, mientras que para los mismos dos días del evento de agosto 2023, esta isoterma cero se ubicó a unos **2.500 m.s.n.m.**

Si se comparan los valores anteriores con los valores del estudio de Peña y Vidal (1993), recomendados en el Manual DGA de 1995, para determinar la línea de nieves promedio en el área de este estudio, aproximadamente entre los 34° y los 38° de latitud sur (adoptando los valores del mismo estudio, gradiente de temperatura de -5° C/km y temperatura umbral de 1° C), se tiene:

Manual DGA 1995: Entrega un rango para las latitudes indicadas desde 1.780 m.s.n.m. a 850 m.s.n.m, es decir un valor promedio de línea de nieves en esta zona de 1.315 m.s.n.m.

Isoterma Cero Eventos Jun/Ago 2023: Valor medio línea de nieves de unos 2.900 m.s.n.m. y 2.300 m.s.n.m., respectivamente.

Es decir, se observa una importante diferencia entre los valores registrados en estos eventos del año 2023 respecto a las recomendaciones del Manual DGA desarrollado en el año 1995, que finalmente incide en un aumento del área pluvial de la cuenca y la consiguiente generación de un caudal de crecida muy superior al esperado si se adoptara la recomendación de Peña y Vidal del Manual DGA 1995.

5. ANALISIS DE CAMBIOS DE PATRONES HISTÓRICOS Y PROYECCIONES CON CAMBIO CLIMÁTICO

5.1 Temperaturas en días de lluvia

Se estudió la evolución de la isoterma cero en días con precipitación durante las últimas décadas en las cinco cuencas en análisis (desde la cuenca del río Rapel hasta la cuenca del río Biobío); como es de esperarse en un contexto de aumentos de temperatura, se observa una tendencia significativa al alza de la isoterma 0°C en días con precipitación. Se consideraron todos los días del registro histórico en los cuales se ha medido al menos 1 mm de precipitación diaria, junto con la mediana de la isoterma 0°C correspondiente a ese día, proyectada a partir del registro de temperatura mínima de cada estación seleccionada, empleando un gradiente adiabático saturado de -5 °C/km.

En la Figura 6 se muestra, a modo de ejemplo, la cuenca del río Mataquito, con una tendencia consistente de aumento de la isoterma cero en días de lluvia en el periodo histórico analizado (1983-2023), de 74 metros/década en esta cuenca.

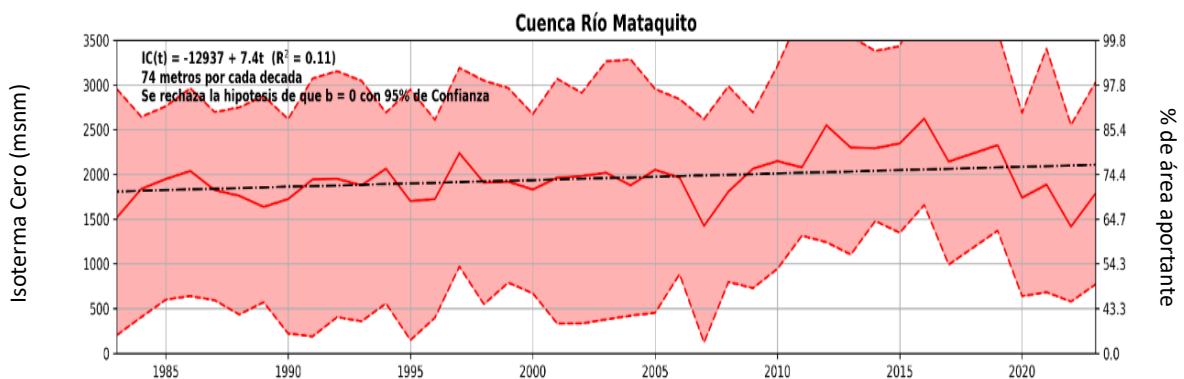


Figura 6: Evolución de la Isoterma cero en días de precipitación durante las últimas décadas.

La Tabla 1 muestra para todas las cuencas analizadas, el aumento promedio por década de la elevación de la isoterma 0°C en los días de lluvia (en metros/década) y el área aportante de las cuencas que recibe precipitación líquida (en km² y también en %).

Se aprecia un alza de la elevación de la isoterma 0°C del orden de 75 – 100 metros por década en las cuencas de la zona de estudio, con excepción de la cuenca del río Biobío, donde este aumento ha sido mayor (169 metros/década). También se observa que el área aportante en días con precipitación ha aumentado significativamente en cada cuenca, llegándose a una situación bastante notable en la cuenca del río Biobío, donde el área aportante que recibe precipitación líquida ha aumentado, en promedio, en un 22,4%.

Tabla 1. Tendencia histórica promedio de aumento de la isoterma 0°C en días con precipitación y del área aportante pluvial de cada cuenca en el periodo analizado (1983-2023).

Cuenca	Río Rapel	Río Mataquito	Río Maule	Río Itata	Río Biobío
Aumento de elevación de la isoterma 0°C (m/década)	+98	+74	+82	+99	+169
Aumento de área aportante pluvial periodo 1983-2023 (Km² y (%))	+676 (+4,9%)	+361 (+5,7%)	+1612 (+7,7%)	+833 (+7,4%)	+8744 (+22,4%)

Este incremento de la isoterma cero, en promedio de 104 metros por década, o bien de 418 metros de aumento total en el periodo 1983-2023, no explica por sí solo lo observado en los eventos del año 2023, con una línea de nieves superando en algunos momentos del evento de junio 2023 por unos 1.600 metros de elevación los valores recomendados por Peña y Vidal en el Manual DGA de 1995; y por unos 1.000 metros en el evento de agosto 2023.

Dado lo anterior, se investigó la ocurrencia de días de precipitación (eventos por año) con isoterma cero elevada, sobre el percentil 90 % de su distribución, con objeto de evaluar el comportamiento histórico de precipitaciones cálidas.

A modo de ejemplo se muestra en la Figura 7 los resultados obtenidos en la cuenca del río Itata, observándose en las cinco cuencas en estudio un aumento significativo de días de lluvia con isoterma cero elevada (sobre percentil 90%) desde el año 2010 en adelante, lo que implica una mayor proporción de la cuenca recibiendo precipitación líquida.

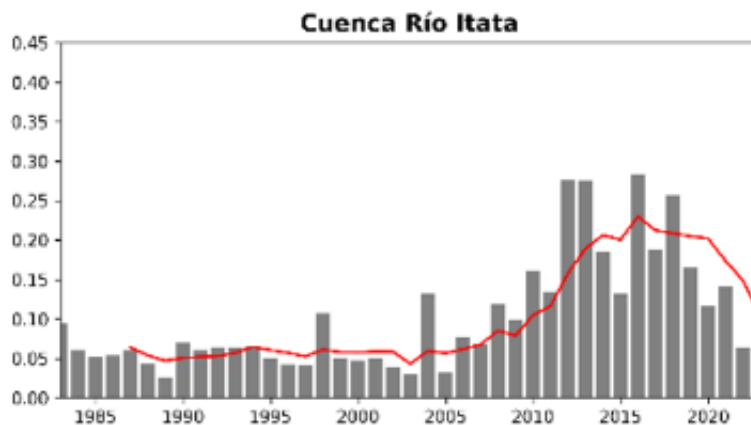


Figura 7: Número de días por año con Isoterma Cero sobre su percentil 90% histórico

Nota: en los dos últimos años del periodo analizado (2022-2023), esta tendencia disminuye, por lo cual se debe continuar monitoreando esta variable, ya que el incremento observado en el periodo 2010-2021 pudiera estar influenciado por el efecto de la megasequía.

5.2 Precipitaciones máximas diarias

Se evaluó el comportamiento de la precipitación máxima diaria anual, independientemente de las condiciones de temperatura. Se utilizaron las series de precipitación máxima diaria anual, considerando el período entre 1983 y 2023. Se seleccionaron únicamente aquellas estaciones cuya serie de datos tuviera una duración mínima de 25 años y que no presentaran más de 5 años consecutivos sin registros. De un total de 347 estaciones, 92 cumplieron con los criterios de selección, todas pertenecientes a la DGA. En la Figura 8, se muestran a modo de ejemplo, los resultados de tendencia para la Estación DGA Los Queñes, en la cuenca del río Mataquito, que muestra una disminución de la precipitación máxima diaria anual en el periodo 1983-2023.

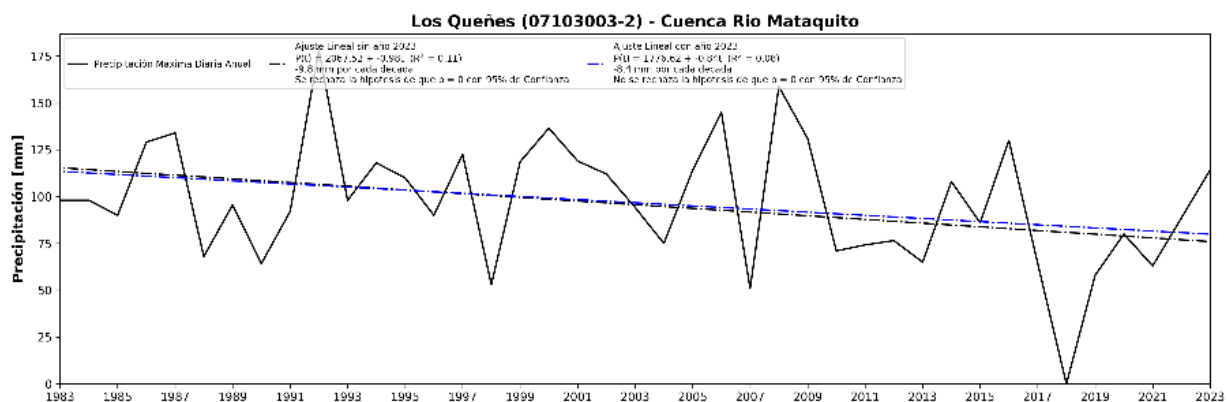


Figura 8: Evolución de la precipitación máxima diaria anual durante las últimas décadas. Cuenca del río Mataquito.

En ninguna de las 92 estaciones analizadas, se detectó una tendencia al aumento en la precipitación máxima diaria en las últimas cuatro décadas (1983-2023). En 41 de estas 92 estaciones se observó una tendencia a la disminución, mientras que el resto de las estaciones no presentaron una variación significativa, positiva o negativa. Se puede entonces concluir que la evidencia indica que en los últimos 40 años en Chile central, la precipitación máxima diaria no está aumentando con el tiempo; lo que si manifiesta una tendencia significativa al alza, es el número anual de días de precipitación con condiciones cálidas de isoterma 0°C anormalmente alta.

5.3 Cambio Climático

Se consideraron dos escenarios de proyecciones de cambio climático en las próximas décadas, el SSP2-4,5 y el SSP5-8,5, seleccionados entre los actuales cinco escenarios en que se basan todos los modelos climáticos. El primero representa un escenario intermedio de emisión de gases de

efecto invernadero, mientras que el segundo es una condición más extrema, donde se continúa la tendencia histórica de emisión de estos gases.

Se utilizaron 27 Modelos de Circulación Global (GCM) indicados en la Tabla 2 y se seleccionaron 5 estaciones meteorológicas, una por cada cuenca en estudio, la información extraída corresponde a la precipitación diaria y temperatura media diaria.

Tabla 2: Modelos GCM utilizados en el análisis

N°	Modelo	Institución (País/Región)
1	ACCESS-ESM1-5-gn	CSIRO-ARCCSS (Australia)
2	BCC-CSM2-MR-gn	BCC (China)
3	CanESM5-gn	CCCMA (Canada)
4	CESM2-WACCM-gn	NCAR (EE.UU.)
5	CMCC-CM2-SR5-gn	CMCC (Italia)
6	CMCC-ESM2-gn	
7	EC-Earth3-CC	EC-Earth Consortium (Europa)
8	EC-Earth3	
9	EC-Earth3-Veg	
10	EC-Earth3-Veg-LR	CAS (China)
11	FGOALS-g3-gn	
12	GFDL-CM4-gr1	NOAA-GFDL (EE. UU.)
13	GFDL-CM4-gr2	
14	GFDL-ESM4-gr1	CCCR-IITM (India)
15	IITM-ESM-gn	
16	INM-CM4-8-gr1	INM (Rusia)
17	INM-CM5-0-gr1	IPSL (Francia)
18	IPSL-CM6A-LR-gn	
19	KIOST-ESM-gr1	KIOST (Corea del Sur)
20	MIROC6-gn	JAMSTEC, AORI, NIES, RCCS (Japón)
21	MPI-ESM1-2-HR-gn	MPI-M (Alemania)
22	MPI-ESM1-2-LR-gn	
23	MRI-ESM2-0-gn	MRI (Japón)
24	NESM3-gn	NUIST (China)
25	NorESM2-LM-gn	NCC (Noruega)
26	NorESM2-MM-gn	
27	TaiESM1-gn	AS-RCEC (Taiwán)

Las estaciones meteorológicas utilizadas en el análisis de proyecciones futuras son:

- Estación DGA 06015003-6 Rengo, cuenca Rapel
- Estación DMC 340031 General Freire, Curicó Ad., cuenca Mataquito
- Estación DGA 07378002-0 Talca U.C., cuenca Maule
- Estación DGA 08113001-9 Coihueco Embalse, cuenca Itata
- Estación DMC 370020 Quilaco, cuenca Biobío

El análisis de escenarios futuros se realizó comparando para el periodo de tiempo futuro y los dos escenarios de emisión de GEI (SSP5-8,5 y SSP2-4,5) cuál sería el cambio relativo de las condiciones medidas de la variable relevante.

Los resultados de la modelación de escenarios futuros para los periodos 2020-2040, 2040-2070 y 2070-2100 en las variables precipitación diaria y temperatura en días de lluvia, se entregan en la Tabla 3 a continuación.

Tabla 3: Proyecciones de cambio en Precipitaciones Diarias y Temperaturas en días de lluvias para distintos escenarios de cambio climático.

Cuenca	ΔPr (%)	ΔT_{med} (°C)	Cuenca	ΔPr (%)	ΔT_{med} (°C)
SSP2-4,5 (2020-2040)			SSP5-8,5 (2020-2040)		
Rapel	9,32	0,46	Rapel	11,85	0,51
Mataquito	8,23	0,45	Mataquito	14,43	0,49
Maule	5,96	0,46	Maule	9,38	0,49
Itata	2,45	0,46	Itata	2,86	0,49
Biobío	9,48	0,46	Biobío	3,55	0,48
Promedio	7.09	0.46	Promedio	8.41	0.49
SSP2-4,5 (2040-2070)			SSP5-8,5 (2040-2070)		
Rapel	1,16	0,9	Rapel	10,06	1,25
Mataquito	-0,89	0,89	Mataquito	10,12	1,24
Maule	-2,64	0,89	Maule	5,45	1,22
Itata	-0,8	0,88	Itata	1,7	1,21
Biobío	0,74	0,86	Biobío	4,11	1,19
Promedio	-0.49	0.88	Promedio	6.29	1.22
SSP2-4,5 (2070-2100)			SSP5-8,5 (2070-2100)		
Rapel	7,12	1,34	Rapel	7,06	2,43
Mataquito	10,2	1,34	Mataquito	4,58	2,41
Maule	6,49	1,34	Maule	5,78	2,4
Itata	1,74	1,34	Itata	6,33	2,37
Biobío	7,87	1,3	Biobío	9,98	2,32
Promedio	6.68	1.33	Promedio	6.75	2.39

Tomando como periodo de mayor interés para diseño, las proyecciones de cambio climático en el periodo 2040-2070 (dado que muchos proyectos de infraestructura hidráulica se evalúan a 30 años plazo), se tiene que en términos de variación de temperaturas en días de lluvia (DTmed), la variación de éstas, alcanzaría valores positivos de 0,88 °C y 1,22 °C en promedio para los escenarios SSP2-4,5 y SSP5-8,5 analizados.

En el caso de las precipitaciones diarias (DPr) se proyecta una variación de -0,49% y +6,29% para los mismos escenarios antes mencionados en el periodo 2040-2070, aunque se destaca que en el escenario SSP5-8,5 podría ocurrir una variación positiva de precipitación diaria del orden de 10% en las cuencas de Rapel y Mataquito. Adicionalmente, resulta relevante destacar que en el escenario a corto plazo (2020-2040) se observan variaciones positivas aún mayores en la precipitación diaria, con valores promedio de 7,09% y 8,41% para los escenarios SSP2-4,5 y SSP5-8,5, respectivamente.

6. PROPUESTAS DE MODIFICACIÓN DE PARÁMETROS DE DISEÑO

6.1 Temperatura en días de lluvia

A partir del análisis de los cambios de temperatura durante los eventos de precipitación y su impacto en la isoterma 0°C, se recomienda modificar los valores propuestos en el Manual DGA (1995), elevando la isoterma cero más allá de lo proyectado en los escenarios de cambio climático analizados, ya que este incremento sólo alcanzaría un valor entre 0,88 °C y 1,22 °C en promedio, lo cual no permitiría cubrir eventos de precipitación cálida como los observados en junio y agosto de 2023.

Adicionalmente, se detectó un incremento significativo en la cantidad de días de lluvia por año con isoterma cero elevada (sobre percentil 90%), aproximadamente desde el año 2010 en adelante, lo cual permite pensar en adoptar recomendaciones más conservadoras.

Durante el evento de junio de 2023, la isoterma cero se mantuvo cercana a los 3.000 m.s.n.m. en varias cuencas, por lo que se analizó el valor de esta isoterma cero considerando cuantiles altos (80%, 90% y 95%) mediante una distribución normal.

La Tabla 4 presenta estos valores según los distintos escenarios analizados. Se puede ver que las elevaciones de la Isoterma 0°C alcanzadas durante junio del 2023 están en torno al percentil 90%-95% de las esperadas en el futuro medio (años 2040 a 2070). De este modo se propone considerar estos valores en el diseño hidráulico de infraestructura crítica o bien, cuando se estime que la falla de las obras pueda significar pérdidas significativas.

A modo de referencia se incluye en la Tabla 4 la altitud de la isoterma 0°C promedio y durante las 24 horas de máxima precipitación de los eventos de junio y agosto 2023. En general, los valores observados para el evento de junio 2023 son bastante altos, por lo que debieran considerarse en el diseño o análisis hidrológico en situaciones que requieran un diseño conservador.

Destaca como caso especial la cuenca del río Biobío, donde los valores de la isoterma 0°C en la crecida de junio 2023 superan por un margen importante incluso el percentil 95% calculado. Al ser la cuenca ubicada más al sur de todas las analizadas, es posible que las temperaturas de este evento fueron demasiado extraordinarias respecto a sus condiciones habituales.

Tabla 4: Proyecciones de Isoterma Cero en escenarios futuros de cambio climático y comparación con eventos de Junio y Agosto 2023.

Cuenca	Línea de Nieves Peña y Vidal (msnm)	Altitud Isoterma Cero (msnm)				Periodo	Elevación Isoterma Cero (msnm) Proyección en escenarios futuros con Cambio Climático							
		Promedio evento		En las 24 horas de mayor precipitación			SSP2-4.5				SSP5-8.5			
		Jun 2023	Ago 2023	Jun 2023	Ago 2023		Perc. 50	IC 80%	IC 90%	IC 95%	Perc. 50	IC 80%	IC 90%	IC 95%
Rapel	1662	2807	2172	3073	2320	2020-2040	1724	2615	2869	3089	1806	2697	2951	3171
						2040-2070	1866	2757	3011	3231	1918	2809	3063	3283
						2070-2100	1924	2815	3069	3289	2116	3007	3261	3481
Mataquito	1480	2936	2122	3227	2457	2020-2040	1550	2493	2762	2995	1556	2499	2768	3001
						2040-2070	1658	2601	2870	3103	1718	2661	2930	3163
						2070-2100	1722	2665	2934	3167	1938	2881	3150	3383
Maule	1322	2891	1659	3181	2343	2020-2040	1390	2282	2537	2756	1426	2318	2573	2792
						2040-2070	1500	2392	2647	2866	1526	2418	2673	2892
						2070-2100	1596	2488	2743	2962	1758	2650	2905	3124
Itata	977	2571	1380	2798	2442	2020-2040	1049	1908	2153	2364	1045	1904	2149	2360
						2040-2070	1143	2002	2247	2458	1207	2066	2311	2522
						2070-2100	1251	2110	2355	2566	1401	2260	2505	2716
Biobío	868	2707	1540	3143	2493	2020-2040	950	1866	2128	2353	952	1868	2130	2355
						2040-2070	1024	1940	2202	2427	1100	2016	2278	2503
						2070-2100	1134	2050	2312	2537	1328	2244	2506	2731

6.2 Precipitaciones máximas diarias

En el caso de precipitaciones máximas diarias, el análisis de tendencia en las últimas décadas, indicó una disminución en algunas estaciones, mientras que otras no presentaron una variación significativa, sin embargo, al realizar proyecciones futuras con cambio climático, se proyecta una variación de entre -0,49% y +6,29% para los escenarios SSP2-4,5 y SSP5-8 respectivamente, destacando que en el escenario SSP5-8,5 podría ocurrir una variación positiva de la precipitación diaria del orden de un 10% en las cuencas de Rapel y Mataquito, por lo cual, se propone adoptar conservadoramente este valor, es decir, un incremento en la precipitación diaria de un 10% para el periodo 2040-2070.

Esta propuesta también considera que en el escenario a corto plazo (2020-2040) se observan variaciones positivas aún mayores en la precipitación diaria, con valores promedio en las cuencas analizadas de 7,09% y 8,41% para los escenarios SSP2-4,5 y SSP5-8,5, respectivamente.

6.3 Resumen recomendaciones de diseño con cambio climático

Se presenta en la Tabla 5 una propuesta de modificación a la línea de nieves de diseño en las cuencas analizadas, adoptando el percentil 90% de la distribución de la Isoterma Cero, con la proyección al periodo 2040-2070 en el escenario de cambio climático SSP2-4,5. Los valores de Isoterma cero indicados en la Tabla 4, se ajustaron para determinar una línea de nieves comparable con el trabajo previo de Peña y Vidal de 1993, adoptando los mismos valores de dicho estudio para el gradiente de temperatura de $-0,5^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ y temperatura umbral de 1°C .

Tabla 5: Recomendaciones de Modificación a Parámetros de Diseño con Cambio Climático

Cuenca	Línea de Nieves (m.s.n.m.)	Propuesta Nueva Línea de Nieves (m.s.n.m.)	Propuesta Incremento en la Precipitación Máxima Diaria Anual (%)
	Peña y Vidal (1993)	Periodo 2040-2070	Periodo 2040-2070
Rapel	1.662	2.811	+10%
Mataquito	1.480	2.670	+10%
Maule	1.322	2.447	+10%
Itata	977	2.047	+10%
Biobío	868	2.002	+10%

Esta propuesta, conservadora y formulada en un escenario de alta incertidumbre hidrológica respecto a proyecciones futuras a raíz del cambio climático, implica en la práctica elevar la línea de nieves en promedio en unos 1.100 m.s.n.m., respecto a las recomendaciones del Manual DGA de 1995 (basadas en el trabajo de Peña y Vidal), equivalente a casi 6°C de aumento de la isoterma cero en días de lluvia.

6.4 Ejemplo de aplicación y comparación con eventos 2023

Se evaluó el efecto de aplicar las recomendaciones de una nueva línea de nieves e incremento de la precipitación máxima diaria del punto anterior en la cuenca del río Mataquito, en Licantén, sector cercano a su desembocadura, respecto a la situación del Manual DGA de 1995.

Para ello se utiliza la fórmula de Verni y King modificada, propuesta en el Manual DGA de 1995.

$$Q = C(T) * 0,00618 * P_{24}^{1,24} * A_p^{0,88}$$

Donde:

Q (m³/s): Caudal máximo instantáneo máximo asociado al período de retorno T años.

C(T) : Coeficiente empírico de período de retorno T años.

P_{24} (mm): Precipitación máxima diaria asociada al período de retorno de T años.
 A_p (km²): Área pluvial de la cuenca.

Tabla 6: Cálculo Caudal Máximo Instantáneo Río Mataquito en Licantén

Escenario de Análisis	C (T=100)	Línea de Nieves	Área Pluvial	P24 (T=100)	Caudal Max. Inst.
		(m.s.n.m.)	(Km2)	(mm)	(m3/s)
Manual DGA (1995)	0,7384	1.480	3.447	206,0	4.379
Propuesta Cambio Climático	0,7384	2.670	5.118	226,6	6.979

Se observa en la Tabla 6 que la propuesta de cambio en línea de nieves y precipitación tiene como efecto un aumento de casi un 60% en el caudal máximo instantáneo calculado.

De acuerdo al análisis de la estación fluviométrica DGA existente en este mismo sector, el caudal máximo de los eventos del año 2023 se alcanzó en el evento de agosto, con un caudal máximo instantáneo estimado en 5.868 m³/s.

Es decir, en base a este ejercicio, las recomendaciones del presente trabajo permitirían diseñar infraestructura más resiliente ante eventos como los del año 2023, tomando en cuenta además los aumentos de temperatura e incremento de las precipitaciones máximas diarias que se proyectan con la información actualmente disponible para el periodo 2040-2070, por efectos del cambio climático.

7. COMENTARIOS FINALES

La zona central del país ha estado frecuentemente expuesta a eventos extremos de carácter hidrometeorológico, tales como grandes crecidas en ríos y aluviones en quebradas, sin embargo, en los últimos años estos eventos se han intensificado, lo cual introduce una alta incertidumbre en la determinación de los parámetros de diseño de la infraestructura hidráulica, en particular, para proyectar a futuro caudales máximos de crecidas.

Considerando las tendencias actuales observadas y las proyecciones de cambio climático, se propone modificar aquellos parámetros hidrológicos más relevantes en la generación de crecidas pluviales en las grandes cuencas pluvio-nivales del centro del país, desde el río Rapel hasta el río Biobío, estos parámetros son, la precipitación máxima diaria anual y la línea de nieves asociada a estos eventos.

Esta propuesta busca entregar elementos para diseñar infraestructura más resiliente ante eventos extremos, sin embargo, ello implicará un aumento en los caudales de diseño respecto a metodologías tradicionales y por lo tanto se espera también un aumento en el costo de dicha infraestructura.

Por lo anterior, esta propuesta adicionalmente debe evaluarse desde una mirada técnico – económica, en términos del incremento de costos de la nueva infraestructura, comparado con un eventual beneficio futuro (por daño evitado) de difícil cuantificación precisa. Se espera trabajar este tema con el Ministerio de Desarrollo Social y Familia, que elabora las metodologías de evaluación social de los proyectos de inversión pública.

Se propone aplicar estas consideraciones primeramente al diseño de infraestructura crítica, como es aquella destinada a entregar protección a la población, servicios básicos y para actividades económicas relevantes. Por ejemplo, defensas fluviales que protegen poblaciones, puentes viales y ferroviarios, grandes bocatomas y canales de riego, infraestructura sanitaria y de energía, entre otros.

Adicionalmente, se requiere actualizar la normativa de diseño de infraestructura hidráulica del MOP, como el Manual de Carreteras de la Dirección de Vialidad, el Manual de Cálculo de Crecidas y Caudales Mínimos en Cuencas sin Información Fluviométrica de la DGA y el Manual de Drenaje Urbano de la DOH.

Finalmente, el cambio climático introduce un elemento de alta incertidumbre en la proyección hidrológica de eventos futuros, por lo cual, se requiere avanzar en diseños flexibles y/o adaptables a condiciones futuras inciertas, así como continuar el monitoreo en los próximos años de la evolución de las variables analizadas y de los avances en la modelación del cambio climático que permitan reducir estas incertidumbres.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el trabajo de todos los funcionarios de la Dirección de Obras Hidráulicas que colaboraron en el desarrollo de este trabajo, en especial, al Inspector Fiscal del estudio, a la Jefa del Departamento de Obras Fluviales y demás profesionales de ese departamento, que aportaron con su experiencia, comentarios, análisis y revisión de los resultados obtenidos.

También, a todo el equipo del DICTUC, que desarrolló un enorme trabajo de recopilación de antecedentes, procesamiento de datos, desarrollo de metodologías y análisis de resultados, para lo cual contó con el aporte de destacados académicos e investigadores de la Pontificia Universidad Católica de Chile, en especial de su Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental.

REFERENCIAS

Covián F. y Stöwhas L. (2015): “Modelación probabilística de la Línea de Nieves durante eventos de tormenta entre los 28,5° y 46,5° LS”. XXII Congreso Nacional de Ingeniería Hidráulica, SOCHID, 2015.

DGA, 1995. Manual de Cálculo de Crecidas y Caudales Mínimos en Cuencas sin Información Fluviométrica.

Dirección de Vialidad – MOP, 2025. Manual de Carreteras.

DOH - DICTUC, 2025. Estudio de Caracterización de los Eventos de Precipitaciones y Crecidas de Ríos Ocurridos en Junio y Agosto de 2023 en la Zona Central de Chile. Participaron por DOH: Milo Millán R. y Marcia Agurto C. como Jefaturas DOH y Andrés Abarca A. con Valentina Neira P. como Inspectores Fiscales titular y subrogante respectivamente, además de aportes de otros profesionales del Departamento de Obras Fluviales. Por DICTUC: Jorge Gironás L. como Jefe de Proyecto, Bonifacio Fernández L., Rodrigo Cienfuegos, Sebastián Vicuña, David Morales y Magdalena Vicuña como especialistas, junto con un equipo de profesionales.

DOH - MOP, 2013. Manual de Drenaje Urbano.

Garreaud R. (2013). Warm winter storms in Central Chile. *Journal of Hydrometeorology*, 14(5), 1515-1534

Garreaud R., Vergara I. y Viale M. (2019): Análisis: ¿Una tormenta de invierno en pleno verano? Entendiendo el extraordinario evento de finales de enero de 2021 en Chile central. CR2, 2019.

Link, O., Brox-Escudero, L. M., González, J., Aguayo, M., Torrejón, F., Montalva, G., & Eguibar-Galán, M. Á. (2019). A paleo-hydro-geomorphological perspective on urban flood risk assessment. *Hydrological Processes*, 33(25), 3169-3183

Peña H. y Vidal F. (1993): “Estimación estadística de la línea de nieves durante los eventos de precipitación entre latitudes 28 y 38 grados sur.” XI Congreso Nacional de Ingeniería Hidráulica, SOCHID, 1993.