

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXVII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**MEJORAR EL ANÁLISIS DE EVENTOS EXTREMOS MEDIANTE LA
CONSIDERACIÓN DE TEMPERATURA Y PRECIPITACIONES EN CUENCAS CON
COMPONENTE NIVAL**

CAMILA ROJAS M.¹
CRISTIÁN CHADWICK I.²
JORGE GIRONÁS L.³

RESUMEN

El cambio climático ha intensificado la frecuencia e intensidad de eventos extremos de precipitación, afectando el diseño y la operación de infraestructura hidráulica, especialmente en cuencas con régimen nival. Este estudio propone una metodología que incorpora la temperatura en el análisis de eventos extremos, permitiendo ajustar las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) y estimar la escorrentía líquida considerando diferentes áreas aportantes. La cuenca del río Maipo se utilizó como caso de estudio, integrando datos de alta resolución temporal de precipitación (1992–2023) y temperaturas máximas y mínimas diarias. Las precipitaciones se separan por eventos, se les asignó una temperatura representativa, lo que permite clasificarlas en cinco categorías térmicas. Posteriormente, se construyeron curvas IDF-T para cada grupo de temperaturas y se compararon con las IDF clásica. La incorporación de temperatura permitió estimar la isoterma 0°C y con ello, el área efectivamente aportante, generando hietogramas diferenciados por categoría térmica. Los resultados muestran que las IDF-T permiten una estimación más precisa del escurrimiento en condiciones cálidas, mejorando la representatividad del diseño hidráulico ante escenarios de cambio climático. La propuesta metodológica permite integrar la no estacionariedad térmica de forma efectiva y robusta en el diseño de infraestructuras en zonas sensibles a cambios en la temperatura.

¹ Estudiante Titulada en Magister en Ciencias de la Ingeniería, Facultad de Ingeniería y Ciencias, Universidad Adolfo Ibáñez – c.rojas@alumnos.uai.cl

² Profesor Asociado, Facultad de Ingeniería y Ciencias, Universidad Adolfo Ibáñez – cristian.chadwick@uai.cl

³ Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Pontificia Universidad Católica de Chile- jgironas@uc.cl

1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático se ha establecido como un desafío global preeminente, cuyos impactos transfronterizos amenazan la biodiversidad, los ecosistemas y la infraestructura crítica (Marquet et al., 2020; Santibáñez, 2016). Informes del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC) confirman que la actividad humana es el principal impulsor del calentamiento global, intensificando la frecuencia y severidad de fenómenos meteorológicos extremos (Lee et al., 2024). Dentro de este panorama, la alteración del ciclo hidrológico tendrá grandes efectos sobre la intensificación de las precipitaciones extremas y el aumento sostenido de las temperaturas.

Por una parte, las precipitaciones extremas ponen a prueba la resiliencia de la infraestructura hidráulica y de transporte, provocando inundaciones, desbalances sedimentarios y fallas en los sistemas de drenaje (Coumerme Gonzáles, 2021; Cook et al., 2020). Por otra, el aumento de la temperatura global altera directamente la dinámica de las cuencas, especialmente aquellas con un importante componente nival. En estas regiones, temperaturas más altas durante eventos de lluvia pueden provocar el derretimiento acelerado de la nieve (eventos de lluvia sobre nieve), incrementando drásticamente el área de aporte pluvial, el volumen de escorrentía y, en consecuencia, la magnitud de los caudales máximos, como se ha estudiado en la cuenca del río Maipo en Chile (Coumerme Gonzáles, 2021; Lagos Zúñiga, 2012).

Tradicionalmente, la ingeniería civil ha dependido de las curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) para el diseño de obras hidráulicas. Sin embargo, estas herramientas se basan en el supuesto de estacionariedad climática, es decir, asumen que los patrones estadísticos del pasado se mantendrán en el futuro (Cheng & AghaKouchak, 2014). Esta premisa ha quedado obsoleta, lo que resulta en infraestructuras cada vez más vulnerables, diseñadas con estándares que no reflejan la realidad de un clima cambiante (Desai, 2017; Butcher et al., 2021).

La comunidad científica ha reconocido la necesidad de desarrollar curvas IDF no estacionarias (Ombadi et al., 2018), y existen avances en la modelización del aumento de la intensidad de las precipitaciones bajo el principio físico de Clausius-Clapeyron (O’Gorman & Schneider, 2009), aumentos en la temperatura están asociados a aumentos de la humedad atmosférica. Sin embargo, la mayoría de los esfuerzos se han concentrado en responder cómo cambiará la precipitación, prestando una atención insuficiente a cómo la temperatura modifica directamente la dinámica de la cuenca y la generación de la escorrentía. La falta de un marco conceptual y de directrices claras para integrar el componente térmico de manera sistemática en el análisis de extremos (Kourtis & Tsihrintzis, 2022) representa el principal problema a resolver.

El objetivo de este trabajo es analizar y comprender cómo la interacción entre temperatura y precipitación influye en el análisis de escorrentías extremas en cuencas con componente nival, con el fin de mejorar la planificación y gestión de infraestructuras hidráulicas. Para alcanzar este fin, se categorizan los eventos de precipitaciones por sus temperaturas. Luego, se arman las curvas IDF de manera clásica, mientras que en paralelo se arman curvas IDF-T las cuales son dependientes de la temperatura. Las curvas IDF-T tienen diferentes áreas aportantes, dado que tienen los eventos de precipitaciones categorizados por sus temperaturas. Finalmente, se comparan la precipitación líquida de las curvas IDF, contra aquella generada por las IDF-T, lo que permite incorporar el efecto del área aportante debido a diferentes temperaturas de manera más explícita en el diseño de ingeniería civil.

2. METODOLOGÍA

La presente investigación se fundamenta en un marco metodológico diseñado para cuantificar la influencia de la temperatura en la estimación de escorrentías extremas, superando las limitaciones de los enfoques tradicionales. El procedimiento se estructura desde la adquisición y procesamiento de datos hasta la generación de hidrogramas de diseño y el análisis comparativo de resultados.

El enfoque propuesto se distingue del método clásico al incorporar explícitamente la temperatura como una variable condicionante. Mientras el enfoque tradicional se basa exclusivamente en series de precipitación para construir curvas IDF y estimar la escorrentía, la metodología aquí desarrollada clasifica los eventos de precipitación según rangos térmicos. Esto permite generar curvas IDF-T ajustadas por temperatura, que a su vez modifican la estimación del área aportante líquida de la cuenca, conduciendo a una caracterización más precisa de la producción de escorrentía bajo distintos escenarios climáticos.

Procesamiento de Datos y Análisis Topográfico

La base de datos climáticos se construye a partir de registros de precipitación de alta resolución temporal y de temperaturas diarias (máxima y mínima). Los datos de precipitación analógicos, provenientes de pluviógrafos históricos, son digitalizados mediante software especializado llamado PluvioReader (Burboa et al., 2020) para construir una serie temporal homogénea y continua. Las series de temperatura se obtienen mediante procedimientos automatizados de extracción de datos. Para ambas variables, se aplican técnicas de interpolación lineal para completar registros faltantes, los cuales corresponden al menos del 0,02% del total de los datos. Paralelamente, se realiza un análisis topográfico a partir de un Modelo de Elevación Digital (DEM), procesado en un Sistema de Información Geográfica (SIG). A partir del DEM, se delimita la cuenca hidrográfica y se genera su curva hipsométrica, la cual describe la distribución del área de la cuenca en función de la altitud. Esta curva es un insumo esencial para determinar el área aportante.

Construcción de Curvas IDF Clásicas y Ajustadas por Temperatura

Se generan dos tipos de curvas IDF. Primero, se construyen las curvas IDF clásicas a partir de la serie completa de precipitaciones máximas anuales para diversas duraciones (desde minutos hasta horas). Estas series se ajustan a una distribución de probabilidad de valores extremos, comúnmente la distribución Gumbel, para estimar las intensidades asociadas a distintos períodos de retorno (T) (Kourtis & Tsihrintzis, 2022).

Segundo, se desarrollan las curvas IDF-T dependiente de la temperatura. Este proceso innovador consta de cuatro pasos:

- **Identificación de eventos de precipitación:** Se definen y aíslan eventos individuales a partir de la serie continua de precipitación, utilizando criterios de precipitación mínima y período seco entre eventos (e.g., Zegpi & Fernandez, 2010).
- **Asignación de temperatura a eventos:** A cada evento de precipitación se le asigna una temperatura representativa, basada en los registros de temperatura máxima y mínima diaria. El criterio es tomar la temperatura durante o inmediatamente después del evento, siguiendo un enfoque jerárquico para asegurar la mejor representatividad (Ibañez et al., 2025).

- **Filtrado de eventos por rangos de temperatura:** Los eventos se clasifican en distintas categorías según su temperatura asociada. Esta segmentación se fundamenta en que la temperatura influye directamente en la fase de la precipitación (líquida o sólida) y, por tanto, en la respuesta hidrológica de la cuenca (Vicuña et al., 2013).
- **Construcción de curvas IDF-T por categoría:** Se aplica el mismo procedimiento estadístico de encontrar máximo anuales y ajuste Gumbel a cada subconjunto de eventos filtrados por temperatura, obteniendo así curvas IDF-T para cada condición térmica.

Estimación de la Escorrentía y Análisis Comparativo

La altitud de la isoterma 0°C se calcula para cada escenario térmico utilizando la temperatura mediana de los eventos de la categoría y un gradiente térmico atmosférico estándar (-6,5 °/km). Esta altitud se proyecta sobre la curva hipsométrica de la cuenca para determinar el área aportante efectiva, es decir, la superficie de la cuenca donde la precipitación ocurre en fase líquida.

Posteriormente, se generan hietogramas de diseño para cada período de retorno y condición térmica utilizando el método de bloques alternos. La producción de escorrentía se estima de manera simplificada multiplicando los hietogramas de diseño y sus respectivas áreas aportantes.

Finalmente, se realiza un análisis de factores de cambio para cuantificar el impacto del cambio de área aportante debido a la temperatura. Se comparan los resultados de los escenarios térmicos con el escenario clásico en tres componentes: área aportante, precipitación acumulada (hietograma) y producción total de escorrentía. Esto permite aislar y medir la sensibilidad del sistema hidrológico a la variabilidad térmica durante eventos extremos.

3. ÁREA DE ESTUDIO Y DATOS

La metodología descrita se aplica a la cuenca hidrográfica del río Maipo, ubicada en la zona central de Chile (Figura 1). Esta cuenca fue seleccionada por su alta relevancia socioeconómica, su vulnerabilidad a los efectos del cambio climático y la disponibilidad de un robusto registro de datos hidrometeorológicos.

Con una extensión de 14.820 km², la cuenca del Maipo abastece de agua para consumo humano a cerca del 42% de la población de Chile, riego agrícola y generación hidroeléctrica (Vega Contador, 2023; Instituto Nacional De Estadísticas, 2018). Su clima templado y régimen hidrológico mixto, con un fuerte componente nival en la alta montaña, la hacen particularmente sensible a las variaciones de temperatura y precipitación (Dirección General de Aguas, 2021; Ayala et al., 2020). Esta sensibilidad se ha manifestado en eventos hidrometeorológicos extremos históricos (e.g., 1993, 2017, 2023) que han causado graves daños a la infraestructura y las comunidades (Fundación Chile, 2019).

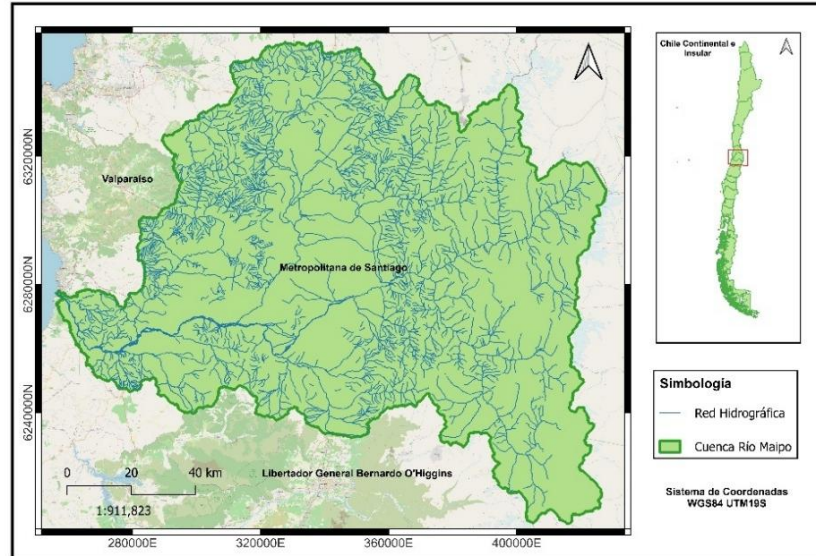


Figura 1: Cartografía de la cuenca Río Maipo

Las tendencias climáticas recientes, caracterizadas por una disminución de las precipitaciones y un aumento de las temperaturas, junto con una creciente impermeabilización del suelo por expansión urbana, han exacerbado el riesgo de inundaciones y aluviones (Vicuña et al., 2021; Fundación Chile, 2019). Esto muestra la urgencia de actualizar las herramientas de planificación y diseño hidrológico.

Para la presente investigación, se utilizaron las siguientes fuentes de datos:

- **Datos Climáticos:** Se emplearon los registros de precipitación y temperatura de la estación meteorológica de Quinta Normal (código 330020), gestionada por la Dirección Meteorológica de Chile (DMC). Se construyó una serie temporal continua de precipitaciones para el período 1992-2023. Los datos de precipitación se consolidaron a una resolución de 5 minutos, combinando registros digitales recientes (2019-2023) con registros pluviográficos históricos (1992-2018) digitalizados con PluvioReader (Burboa et al., 2020). Los datos de temperatura máxima y mínima diaria fueron descargados de la plataforma de la DMC para el mismo período.
- **Datos Topográficos:** Se utilizó un Modelo de Elevación Digital (DEM) obtenido del satélite ALOS PALSAR, con una resolución espacial de aproximadamente 12,5 metros. Este modelo, disponible en el portal del Alaska Satellite Facility (ASF), fue la base para delimitar la cuenca y derivar la curva hipsométrica en un entorno SIG.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización de la Precipitación: Curvas IDF Clásicas y Ajustadas por Temperatura

El análisis parte de la definición de una línea base mediante curvas IDF clásicas, construidas a partir del registro histórico completo (Figura 2). Estas curvas exhiben la relación convencional donde la intensidad de la lluvia decrece con la duración y aumenta con el período de retorno.

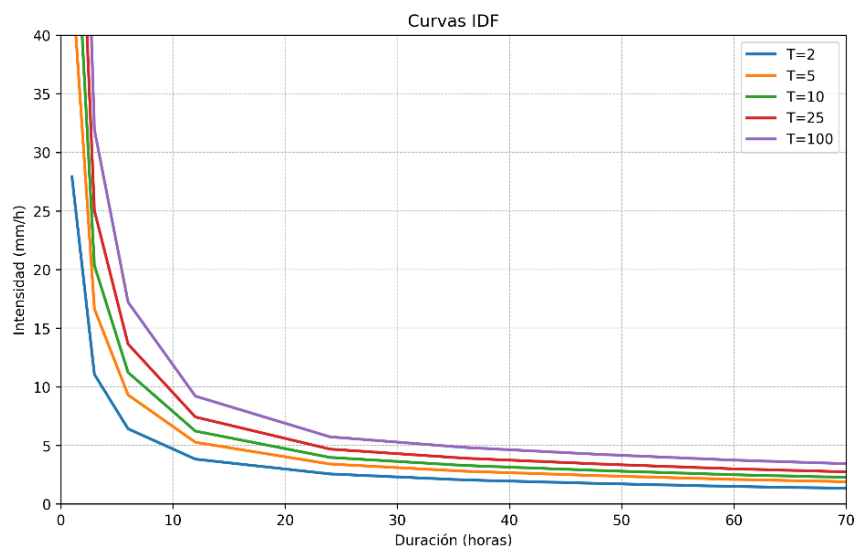


Figura 2: Curvas IDF clásica para la estación Quinta Normal (1992-2023), mostrando períodos de retorno entre 2 y 100 años.

Posteriormente, se definen cinco categorías térmicas: menor a 8°C, entre 8 y 10°C, entre 10 y 12°C, entre 12 y 15°C y finalmente mayor a 15°C. Para cada una de estas categorías se desarrollaron curvas IDF-T. Este análisis muestra que la intensidad de la precipitación es dependiente de la temperatura. Como se ilustra en la Figura 3, las categorías con temperaturas más elevadas generan intensidades de lluvia significativamente mayores, un efecto particularmente notorio las duraciones más cortas.

Con la temperatura media de los eventos de cada categoría térmica se puede determinar la altitud de la isoterma 0°C. Luego, la altitud de la isoterma 0°C se utiliza para estimar la extensión del área aportante líquida. La Tabla 1 muestra que esta área se expande drásticamente con la temperatura, pasando de un 54,7% del total de la cuenca en eventos fríos (menores a 8°C) a un 81,0% en eventos cálidos (mayores a 15°C).

Tabla 1: Resumen del área aportante líquida y nival por categoría de temperatura.

Categoría	Isoterma 0°C (m)	Área líquida (km ²)	% Líquida	Área nival (km ²)	% Nival
Clásica	2.120	9.518	64,23%	5.302	35,77%
Menor a 8°C	1.428	8.104	54,69%	6.716	45,31%
8°C a 10°C	1.905	8.930	60,26%	5.890	39,74%
10°C a 12°C	2.197	9.518	64,23%	5.302	35,77%
12°C a 15°C	2.543	10.352	69,85%	4.468	30,15%
Mayor a 15°C	3.258	12.010	81,04%	2.811	18,96%

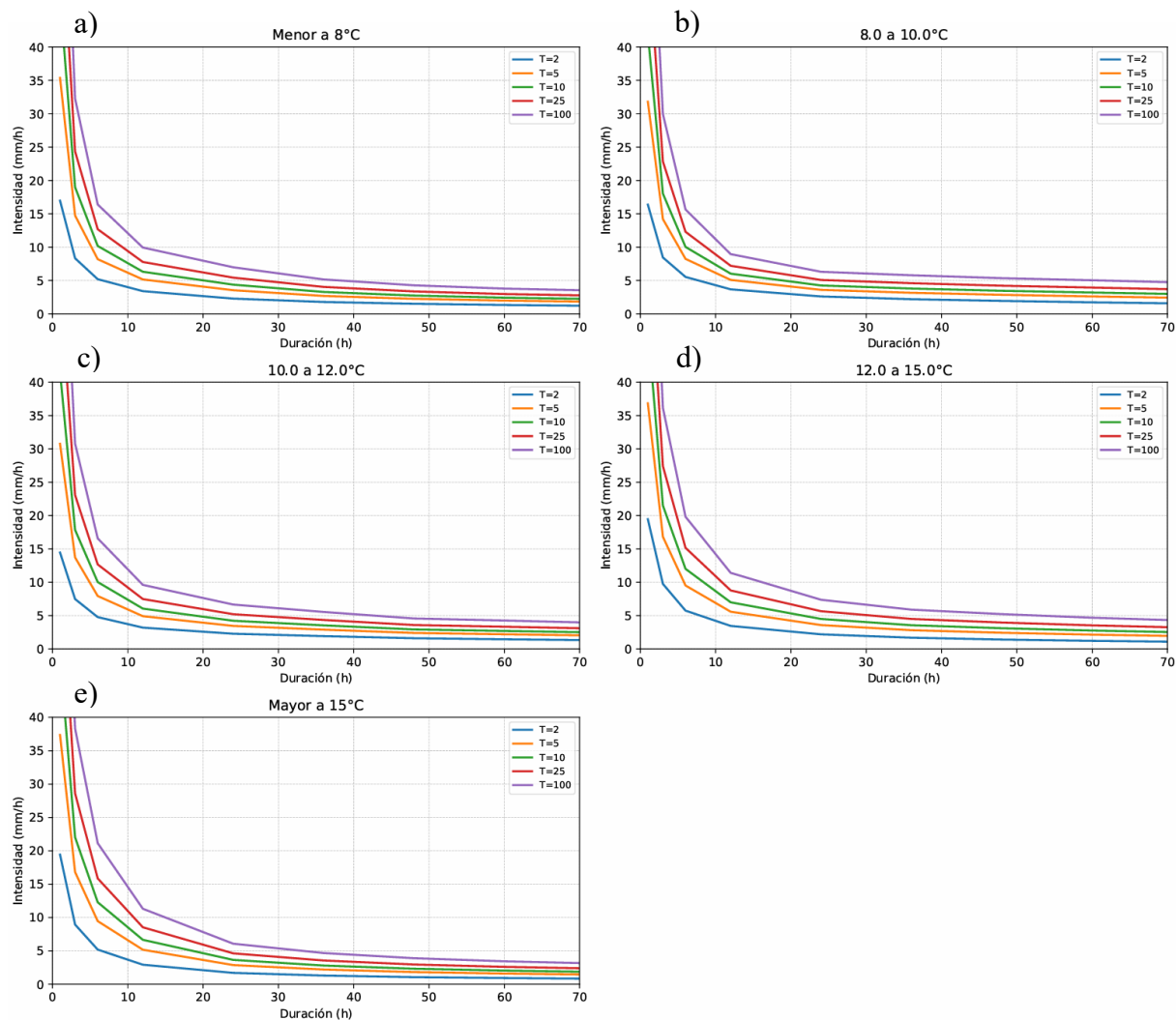


Figura 3: Curvas IDF-T diferenciadas por categoría de temperatura: (a) menor a 8,0°C, (b) entre 8,0 y 10,0°C, (c) entre 10,0 y 12,0°C, (d) entre 12,0 y 15,0°C, y (e) mayor a 15,0°C.

Estimación del Área Aportante y su Factor de Cambio

El Factor de Área Aportante (Tabla 2) cuantifica esta variación respecto al escenario clásico. Se observa que, en eventos con temperaturas superiores a 15°C, el área que genera escorrentía inmediata es casi un 29% mayor que la asumida en un análisis tradicional.

Tabla 2: Factores de área aportante por categoría térmica

Categoría Térmica	Factor de Área	Variación
IDF Clásica	1,00	0,0%
Menor a 8°C	0,87	-13,09%
8°C a 10°C	0,96	-2,24%
10°C a 12°C	1,02	+2,07%
12°C a 15°C	1,11	+11,02%
Mayor a 15°C	1,29	+28,79%

Hietogramas de Diseño y su Factor de Cambio

A partir de la IDF (Figura 2) se construye el hietograma de diseño con bloque alterno. De manera similar se utilizaron las cinco IDF-T condicionales a las temperaturas (Figura 3), para formar hietogramas de diseño con bloque alterno (por ejemplo, $T=100$ en Figura 4). Para un período de retorno de 100 años, la máxima intensidad del hietograma se consigue para la categoría $>15^{\circ}\text{C}$ que es mayor que el hietograma clásico (Figura 4).

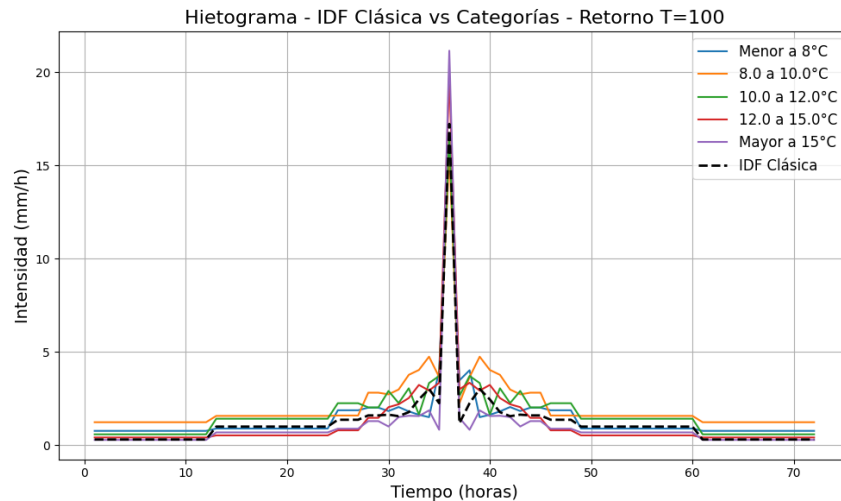


Figura 4: Hietograma comparativo para cada categoría con un período de retorno 100 años

El Factor de Hietograma (Tabla 3 y Tabla 4) compara la precipitación acumulada en la parte central del hietograma de diseño clásico, contra aquellos construidos con las IDF-T que dependen de la temperatura. Para duraciones cortas (1 hora), las categorías cálidas tienden a superar al modelo clásico en especial para períodos de retorno grande ($T=100$ y 1000 con factor de 1,23 y 1,29, respectivamente). Para duraciones largas (72 horas), la categoría de temperatura intermedia ($8,0-10,0^{\circ}\text{C}$) presenta la mayor precipitación, con factores mayores a 1,60 para períodos de retorno de 5 años o más.

Tabla 3: Factores entre los hietogramas de IDF-T por categorías térmicas en comparación a IDF clásica para duración de 1 h

Categoría	T=2	T=5	T=25	T=100	T=200	T=1000
IDF Clásica	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Menor a 8°C	0,81	0,88	0,93	0,95	0,96	0,97
8°C a 10°C	0,86	0,89	0,90	0,91	0,91	0,92
10°C a 12°C	0,75	0,85	0,93	0,96	0,98	1,00
12°C a 15°C	0,90	1,02	1,11	1,15	1,17	1,19
Mayor a 15°C	0,81	1,02	1,16	1,23	1,25	1,29

Tabla 4: Factores entre los hietogramas de IDF-T por categorías térmicas en comparación a IDF clásica para duración de 72 h

Categoría	T=2	T=5	T=25	T=100	T=200	T=1000
IDF Clásica	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Menor a 8°C	1,23	1,19	1,18	1,17	1,17	0,16
8°C a 10°C	1,49	1,60	1,65	1,67	1,68	1,69
10°C a 12°C	1,27	1,33	1,36	1,37	1,37	1,38
12°C a 15°C	0,92	0,96	0,98	0,99	0,99	1,00
Mayor a 15°C	0,67	0,75	0,80	0,82	0,82	0,83

Producción de Escorrentía y Factor de Cambio Final

La etapa final integra todos los componentes anteriores para calcular la producción de escorrentía. La Figura 5 muestra que, para un período de retorno de 100 años, la intensidad máxima es mayor en las categorías cálidas.

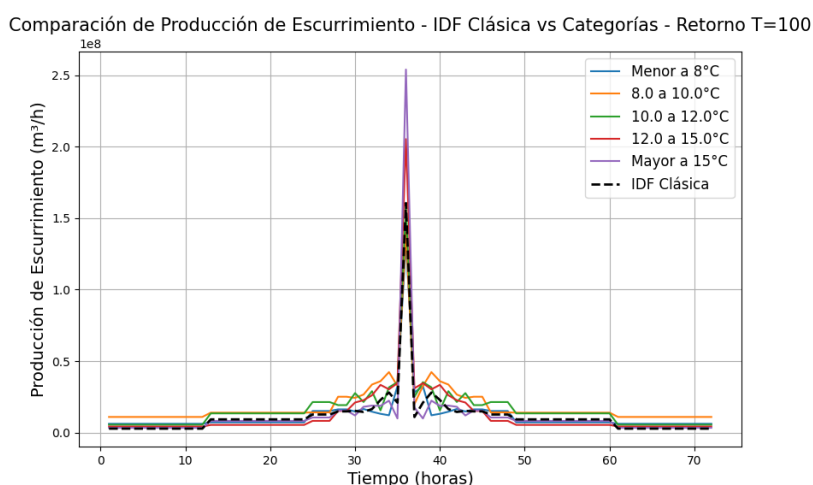


Figura 5: Comparación de producción de escurrimiento horario entre categorías térmicas e IDF clásica para período de retorno T=100 años

El resultado más relevante corresponde al Factor de Producción de Escorrentía (Tabla 5 y Tabla 6), indicador que cuantifica la discrepancia entre el método clásico y el enfoque que considera los cambios en el área aportante asociado a la temperatura. Este factor se estimó como la razón entre la escorrentía generada para cada categoría térmica y la obtenida de la curva IDF clásica. Esto permite evaluar cómo varía la producción de escorrentía en función de la temperatura y el período de retorno. Los hallazgos más importantes son:

- Al analizar **duraciones cortas y de alta intensidad (1 hora)**, la subestimación del método clásico es más severa en condiciones cálidas. La escorrentía en un evento $>15^{\circ}\text{C}$ puede ser hasta un 66% mayor (factor de 1,66) que la estimada tradicionalmente. Incluso para períodos de retorno pequeño (5 años), ya se tiene un aumento de más de un 30%.
- Al analizar **largas duraciones (72 horas)**, la mayor subestimación se desplaza a una categoría de temperatura intermedia ($8,0\text{--}10,0^{\circ}\text{C}$), donde la escorrentía puede ser un 62%

mayor (factor de 1,62). Incluso para períodos de retorno pequeño como 2 y 5 años, ya se tiene un aumento de más de un 40% y 50%, respectivamente.

Tabla 5: Factores de producción de escorrentía por categorías térmicas frente a IDF clásica para duración de 1 h

Categoría	T=2	T=5	T=25	T=100	T=200	T=1000
IDF Clásica	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Menor a 8°C	0,70	0,76	0,81	0,83	0,83	0,85
8°C a 10°C	0,83	0,85	0,86	0,87	0,87	0,88
10°C a 12°C	0,76	0,87	0,95	0,98	1,00	1,02
12°C a 15°C	1,00	1,14	1,23	1,28	1,29	1,32
Mayor a 15°C	1,04	1,31	1,50	1,58	1,61	1,66

Tabla 6: Factores de producción de escorrentía por categorías térmicas frente a IDF clásica para duración de 72 h

Categoría	T=2	T=5	T=25	T=100	T=200	T=1000
IDF Clásica	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Menor a 8°C	1,07	1,04	1,02	1,02	1,01	1,01
8°C a 10°C	1,43	1,53	1,58	1,60	1,61	1,62
10°C a 12°C	1,30	1,35	1,38	1,40	1,40	1,41
12°C a 15°C	1,02	1,07	1,09	1,10	1,10	1,10
Mayor a 15°C	0,86	0,97	1,03	1,05	1,06	1,07

En definitiva, la cadena de resultados demuestra que la omisión de la temperatura induce a errores sistemáticos al minuto de estimar el área aportante y por ende la evaluación de las crecidas. El análisis condicionado por temperatura revela riesgos hidrológicos que permanecen ocultos para los métodos tradicionales, siendo una herramienta útil para incorporar el efecto de la temperatura en el diseño de infraestructura en cuencas con componente nival. En un futuro bajo un creciente contexto de cambio climático este tipo de enfoques se volverá aún más importante.

5. CONCLUSIÓN

La incorporación de la temperatura en la evaluación de eventos extremos demuestra tiene una doble influencia – sobre la intensidad de la precipitación y sobre la extensión del área aportante. El efecto combinado genera una magnificación de la escorrentía, revelando deficiencias en los enfoques de diseño hidrológico tradicionales, en cuencas con componente nival. En dichas cuencas, omitir el efecto de la temperatura puede conducir a una subestimación sistemática y significativa del riesgo real de crecidas.

Los resultados establecen que eventos de precipitaciones con altas temperaturas intensifican la respuesta hidrológica a través de dos mecanismos principales. En primer lugar, se produce un incremento en la intensidad de la precipitación; para la hora de mayor intensidad y un período de retorno alto (e.g., 100 años) y condiciones más cálidas ($>15^{\circ}\text{C}$) se generaron intensidades un 29% mayores que en condiciones frías ($<8^{\circ}\text{C}$). Esta diferencia podría estar asociada también a efectos en la cola de la distribución estadística de precipitaciones extremas, dado que la estratificación por

categorías térmicas reduce la longitud efectiva de las series de precipitaciones y, por tanto, incrementa la sensibilidad a valores extremos y a la presencia de outliers. Esta limitación metodológica refuerza la necesidad de ampliar las series temporales disponibles y aplicar técnicas de ajuste más robustas frente a valores atípicos. En segundo lugar, se constató una expansión del área aportante efectiva, que aumentó hasta en un 28% en los escenarios más cálidos debido al ascenso de la isoterma 0°C.

El efecto combinado de estos factores resulta en una magnificación de la producción de escorrentía. El análisis demostró que, para un evento extremo, el volumen de escorrentía generado en la categoría más cálida fue un 19% superior al estimado con la curva IDF clásica. Estos hallazgos, cuantificados mediante factores de cambio, confirman que el método convencional subestima sistemáticamente la magnitud de la escorrentía en los escenarios térmicos más críticos, lo que puede comprometer la seguridad de las obras hidráulicas al ser subdimensionadas.

En trabajos futuros se debiese explorar si se obtienen resultados similares en otras cuencas. Un aspecto que también se debiese analizar con una mayor profundidad son los hietogramas y profundizar en los motivos que generan que ciertos rangos de temperatura están generando mayores intensidades de precipitaciones que el método tradicional. Por último, trabajos futuros debiesen explorar la estimación de escorrentía directa para acercar aún más estos resultados al diseño de ingeniería civil.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al proyecto FONDECYT de Iniciación N.º 11220952 y al Programa de Apoyo a la Investigación de la Universidad Adolfo Ibáñez por el financiamiento del Proyecto Puente FONDECYT 2025 que permitió llevar a cabo esta investigación. Asimismo, se reconoce el valioso apoyo de Andrés Burboa y el Dr. Claudio Meier por facilitar el uso del software *PluvioReader* y brindar asesoría técnica durante el procesamiento de datos pluviográficos.

REFERENCIAS

- Ayala, A., Farías-Barahona, D., Huss, M., Pellicciotti, F., McPhee, J., & Farinotti, D. (2020). Glacier runoff variations since 1955 in the Maipo River basin, in the semiarid Andes of central Chile. *The Cryosphere*, 14(6), 2005–2027. <https://doi.org/10.5194/tc-14-2005-2020>
- Burboa, A. (2020). *PluvioReader: Herramienta para digitalización de registros pluviográficos* [Software]. GitHub. <https://github.com/AndresBurboa/PluvioReader>
- Burboa, A., Vargas, J., & Meier, C. I. (2020). *PluvioReader: A software for digitizing weekly siphoning-type pluviograph strip charts*. *Computers & Geosciences*, 139, 104463. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2020.104463>
- Butcher, J. B., Zi, T., Pickard, B. R., Job, S. C., Johnson, T. E., & Groza, B. A. (2021). Efficient statistical approach to develop intensity-duration-frequency curves for precipitation and runoff under future climate. *Climatic Change*, 164(1), 3. <https://doi.org/10.1007/s10584-021-02963-y>
- Cheng, L., & AghaKouchak, A. (2014). Nonstationary precipitation intensity-duration-frequency curves for infrastructure design in a changing climate. *Scientific Reports*, 4(1), 7093. <https://doi.org/10.1038/srep07093>

- Cook, L. M., McGinnis, S., & Samaras, C. (2020). The effect of modeling choices on updating intensity-duration-frequency curves and stormwater infrastructure designs for climate change. *Climatic Change*, 159, 289–308. <https://doi.org/10.1007/s10584-019-02649-6>
- Coumerme González, D. A. (2021). Caracterización de eventos meteorológicos extremos en la parte alta del río Maipo, Chile: efecto de eventos de lluvia sobre nieve y proyecciones por cambio climático [Tesis de magíster, Universidad de Chile]. Repositorio Académico de la Universidad de Chile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/181685>
- Desai, H. (2017). Relating extreme temperature and precipitation to improve IDF curve estimates for Ontario in response to climate change [Tesis doctoral, University of Waterloo]. UWSpace. <http://hdl.handle.net/10012/12467>
- Dirección General de Aguas. (2021). Boletín Hidrológico Mayo 2021. Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile.
- Fundación Chile. (2019). Transición Hídrica: El futuro del agua en Chile.
- Ibañez, M., Gironás, J., Garreaud, R., Muñoz, R., Oberli, C., Chadwick, C., & Meier, C. (in press). Characterizing and comparing surface and free air atmosphere temperature profiles in an Andean subtropical mountain catchment.
- Instituto Nacional de Estadísticas. (2018). Síntesis de los resultados Censo 2017.
- Kourtis, I. M., & Tsihrintzis, V. A. (2022). Update of intensity-duration-frequency (IDF) curves under climate change: A review. *Water Supply*, 22(5), 4951–4974. <https://doi.org/10.2166/ws.2022.152>
- Lagos Zúñiga, M. Á. (2012). Impacto del cambio climático en eventos extremos y análisis de la vulnerabilidad de algunas obras hidráulicas en Chile [Tesis de magíster, Universidad de Chile]. Repositorio Académico de la Universidad de Chile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/112051>
- Lee, H., Calvin, K., Dasgupta, D., Krinner, G., Mukherji, A., Thorne, P., Trisos, C., Romero, J., Aldunce, P., & Ruane, A. C. (2024). Climate change 2023 synthesis report summary for policymakers. CLIMATE CHANGE 2023 Synthesis Report: Summary for Policymakers.
- Marquet, P. A., et al. (2020). Biodiversidad y cambio climático en Chile: Evidencia científica para la toma de decisiones. Ministerio del Medio Ambiente, Gobierno de Chile.
- O’Gorman, P. A., & Schneider, T. (2009). Scaling of precipitation extremes over a wide range of climates simulated with an idealized GCM. *Journal of Climate*, 22(21), 5676–5685. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2701.1>
- Ombadi, M., Nguyen, P., Sorooshian, S., & Hsu, K.-I. (2018). Developing intensity-duration-frequency (IDF) curves from satellite-based precipitation: Methodology and evaluation. *Water Resources Research*, 54(10), 7752–7766. <https://doi.org/10.1029/2018WR022929>
- Santibáñez, F. (2016). El cambio climático y los recursos hídricos de Chile. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA). https://opia.fia.cl/601/articles-91835_archivo_01.pdf
- Vega Contador, L. A. (2023). Evaluación de los indicadores e índices de seguridad hídrica propuestos para el plan de adaptación al cambio climático en Chile caso estudio: Cuenca del río Maipo [Tesis de magíster, Universidad de Chile]. Repositorio Académico de la Universidad de Chile. <https://doi.org/10.58011/w01c-hc06>
- Vicuña, S., Vargas, X., Boisier, J. P., Mendoza, P. A., Gómez, T., Vásquez, N., & Cepeda, J. (2021). Impacts of climate change on water resources in Chile. En A. T. Fernald, J. J. Gironás, & A. M. de la Fuente (Eds.), *Water resources of Chile* (pp. 347–363). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-56901-3_19
- Zegpi, M., & Fernandez, B. (2010). Hydrological model for urban catchments—analytical development using copulas and numerical solution. *Hydrological Sciences Journal*, 55(7), 1123–1136. <https://doi.org/10.1080/02626667.2010.512466>