

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

XXVII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

METODOLOGÍA PARA EL DESARROLLO DE HIETOGRAMAS DE DISEÑO EN UNA ZONA URBANA PATRIMONIAL BAJO EL CONTEXTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO. CASO: BARRIO LA CHIMBA, SANTIAGO.

JAIME BUSTOS-SILVA¹
VICTOR CUEVAS-VELÁSQUEZ²
SEBASTIÁN AEDO-QUILILONGO³
NURIA CHIARA PALAZZI⁴

RESUMEN

El cambio climático ha intensificado la preocupación por el posible aumento en la frecuencia e intensidad de las precipitaciones extremas, especialmente en contextos urbanos vulnerables. Esta investigación evalúa la variabilidad de los hietogramas de diseño bajo escenarios climáticos futuros en el barrio patrimonial de La Chimba (Santiago de Chile), un sector caracterizado por una alta densidad de inmuebles con destacado valor cultural, resultado de su compleja estratificación urbana y multicultural. A partir de los datos históricos de precipitación diaria de la estación Quinta Normal y proyecciones climáticas del Sexto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental de Cambio Climático, ajustadas mediante técnicas de downscaling estadístico, se estimaron curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) y se generaron tormentas de diseño utilizando el método de bloques alternantes para duraciones de 2 y 6 horas. Los hietogramas fueron desarrollados para tres horizontes temporales: uno histórico (1984–2014) y dos futuros (2020–2050 y 2068–2098). Los resultados muestran un alto nivel de incertidumbre, junto a una tendencia general al aumento en la intensidad de las precipitaciones extremas en los casos más extremos, con comportamientos no lineales entre escenarios. En cuanto a los escenarios globales, los resultados muestran incrementos en las precipitaciones extremas incluso en los escenarios optimistas y reducciones en los intermedios, reflejando la incertidumbre de las proyecciones, además de la naturaleza no estacionaria de los eventos extremos. Estos resultados subrayan la necesidad de revisar los enfoques tradicionales, integrando el cambio climático en la planificación hidrológica y haciendo de los hietogramas un componente central para nuevas estrategias de gestión.

¹ Ingeniero Civil, Universidad Andrés Bello - j.bustossilva@uandresbello.edu

² Profesor Asistente, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Andrés Bello - victor.cuevas@unab.cl

³ Investigador, Centro Latinoamericano, Stockholm Environment Institute - sebastian.aedo@sei.org

⁴ Arquitecta restauradora e Investigadora, Faculty of Architecture, Art, Design and Communications, Universidad Andrés Bello - nuria.palazzi@unab.cl

1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático es una realidad que no podemos ignorar. En Chile se han evidenciado tendencias y anomalías que indican transformaciones significativas en el clima, proporcionando evidencia clara sobre cómo el cambio climático está afectando los patrones de precipitación en el país (DMC, 2023). Esta situación ha generado preocupación respecto al aumento en la frecuencia e intensidad de las precipitaciones extremas, fenómeno observado también a escala global a través de múltiples estudios (Alfieri et al., 2016).

El incremento de estos eventos extremos representa una amenaza significativa para la seguridad y el bienestar de la población, afectando directamente a viviendas, servicios públicos, la economía y el medio ambiente. Aunque las lluvias torrenciales son parte del régimen natural de precipitaciones, sus impactos suelen verse intensificados por factores humanos, tales como la urbanización descontrolada, el uso inadecuado del suelo, la falta de planificación territorial y la existencia de infraestructura insuficiente para enfrentar estas condiciones (Vidal & Romero, 2010). Investigaciones recientes han remarcado la importancia de estudiar estos fenómenos en contextos urbanos, donde factores como la alta densidad poblacional, el deterioro del entorno construido y la desigualdad social agravan los efectos que provocan las precipitaciones extremas (Arnbjerg-Nielsen et al., 2013; Kundzewicz et al., 2014).

En este marco, resulta pertinente examinar cómo estas dinámicas se manifiestan en contextos específicos, tal como ocurre en el barrio La Chimba, ubicado al norte del centro histórico de Santiago, el cual constituye un caso de estudio especialmente relevante para analizar los posibles cambios en los patrones de precipitación extrema bajo diferentes escenarios climáticos. En este sector se concentra una alta densidad de inmuebles con destacado valor patrimonial, tanto tangible como intangible, producto de su historia, arquitectura y carácter multicultural (San Martín, 2018), pero al mismo tiempo concentra múltiples condiciones de vulnerabilidad urbana y social. Pese a su riqueza cultural, el barrio carece de estrategias efectivas de planificación y protección ante eventos climáticos extremos, como crecidas repentinas e inundaciones urbanas. Por tanto, comprender cómo podrían evolucionar las precipitaciones extremas en este territorio resulta fundamental para proteger la población expuesta y el patrimonio construido que forma parte del relato histórico de la ciudad.

A nivel local, la investigación sobre el impacto del cambio climático en eventos hidrometeorológicos extremos en Santiago ha sido escasa, con excepción de algunos trabajos centrados en escalas regionales o en la Macrozona Central (Gateño et al., 2023). Esta limitada disponibilidad de estudios aplicados a sectores urbanos específicos dificulta la planificación y diseño de infraestructuras resilientes ante escenarios climáticos futuros. En particular, se ha señalado la necesidad de actualizar las curvas IDF empleadas en el diseño de obras hidráulicas, ya que estas se basan en supuestos de estacionariedad que no capturan adecuadamente la dinámica climática observada y proyectada (Hosseinzadehtalaei et al., 2020).

Considerando que los tiempos de concentración en cuencas urbanas son generalmente inferiores a 24 horas, cobra especial importancia analizar la evolución de las precipitaciones extremas en escalas de tiempo más cortas. Estudiar intensidades subdiarias permite representar de forma más precisa cómo responden los entornos urbanos a eventos de alta intensidad y corta duración, aportando herramientas relevantes para el diseño de sistemas de drenaje y estrategias de control de inundaciones (Steiner et al., 1989). En este marco, la incorporación de enfoques no estacionarios a partir de los resultados de los Modelos de Circulación General (GCM) ha mostrado ser efectiva para evaluar cambios en la variabilidad climática y el análisis de eventos extremos (Requena et al., 2021).

Este trabajo busca aportar al conocimiento local mediante el análisis de la variabilidad de los hietogramas de diseño bajo escenarios de cambio climático en el barrio La Chimba. El análisis se basa en una metodología que combina resultados de GCM, técnicas de downscaling estadístico y análisis comparativo de precipitaciones extremas, a partir de la cual se generan insumos climáticos relevantes para la adaptación territorial. En contextos urbanos con alta vulnerabilidad, se requiere avanzar hacia herramientas de diseño capaces de representar la intensidad esperada de las precipitaciones futuras. La generación de hietogramas bajo condiciones no estacionarias responde a esa necesidad, al ofrecer una base más coherente para evaluar el desempeño de sistemas de drenaje frente a escenarios de mayor incertidumbre climática. Diversos estudios han planteado la necesidad de actualizar los métodos tradicionales de diseño, incorporando enfoques capaces de representar los cambios proyectados en la distribución y magnitud de las precipitaciones (Hosseinzadehtalaei et al., 2020).

2. METODOLOGÍA

2.1. FUENTES Y DATOS CLIMÁTICOS

En este estudio se utilizó la información de precipitación diaria en el periodo 1984–2014 de la estación meteorológica Quinta Normal de la Dirección General de Aguas (DGA). Esta estación fue seleccionada por su proximidad al barrio La Chimba, lo que permite una representación más adecuada de las condiciones climáticas locales, y a que corresponde a información oficial nacional, garantizando su calidad y trazabilidad. Respecto a las proyecciones climáticas, se utilizaron 26 GCM provenientes de la base de datos del proyecto NEX-GDDP-CMIP6 (Thrasher et al., 2021), la cual fue actualizada recientemente en marzo de 2024. Estos GCM están disponibles para los cuatro escenarios socioeconómicos del Sexto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (AR6-IPCC): SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5. Estos escenarios se basan en trayectorias socioeconómicas compartidas (Shared Socioeconomic Pathways, SSP) los cuales representan distintos caminos de desarrollo económico, demográfico y tecnológico, que influyen directamente en las emisiones de gases de efecto invernadero y en otros factores climáticos proyectados hasta el año 2100 (IPCC, 2021).

2.2. DOWNSCALING PARA MODELOS CLIMÁTICOS GLOBALES

Los GCM operan a resoluciones espaciales del orden de 100–200 km, lo que limita su aplicabilidad en estudios locales. Para superar esta restricción, se aplicó una técnica de downscaling que proyecta la información climática de gran escala a una escala regional más detallada (Maraun et al., 2010). En primer lugar, se interpolaron los GCM a la ubicación de la estación. Luego, se realizó una corrección de sesgo con el método Unbiased Quantile Mapping (UQM; Chadwick et al., 2023), el cual es una modificación no estacionaria del método Quantile Mapping (QM). El método QM es una transformación de equiprobabilidad basado en información del período histórico. El método UQM incorpora la señal proyectada en la media y la desviación estándar en el proceso de transformación, lo que asegura que se conserve la variación entre los periodos histórico y futuro del GCM. El procedimiento fue implementado en R mediante la librería climQMBC (Chadwick et al., 2023), disponible en <https://github.com/saedoquililongo/climQMBC>.

El método se aplicó a datos diarios de 26 modelos, considerando como periodo histórico las precipitaciones entre 1984 y 2014. La selección de este periodo responde a la recomendación de contar con al menos 30 años de datos (OMM, 2011) y a que el período histórico del AR6-IPCC termina en 2014.

2.3. EVALUACIÓN CON KGE

Para evaluar la representatividad de los modelos climáticos y seleccionar aquellos que mejor representen las condiciones de precipitación en el área de estudio, se utilizó el Coeficiente de Kling-Gupta (KGE) (Gupta et al., 2009). Este análisis se enfocó en las precipitaciones máximas de 24 horas anuales, lo que permite centrar la evaluación en los eventos extremos de lluvia, que son los más relevantes para el diseño de hietogramas y la planificación de infraestructura. El KGE se calcula mediante la siguiente expresión (1):

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + \left(\frac{\mu_s}{\mu_o} - 1\right)^2 + \left(\frac{\sigma_s}{\sigma_o} - 1\right)^2} \quad (1)$$

En esta ecuación, r representa el coeficiente de correlación entre los datos observados y simulados, μ_s y μ_o corresponden a las medias de las series simulada y observada, respectivamente, mientras que σ_s y σ_o son sus desviaciones estándar. Estos tres componentes permiten evaluar simultáneamente el grado de asociación temporal, el sesgo en la magnitud de la media y la capacidad del modelo para reproducir la variabilidad de los datos.

El valor del KGE varía desde números negativos hasta 1, donde este último representa una coincidencia perfecta entre el modelo y los datos observados. En esta investigación, se seleccionaron los modelos que obtuvieron valores más cercanos a 1, lo que indica que son más representativos de los patrones de precipitación extrema observados en el barrio La Chimba. Esta

metodología permitió filtrar los GCM corregidos por downscaling, priorizando aquellos con mejor ajuste estadístico para su uso en las etapas siguientes del estudio.

2.4. CONSTRUCCIÓN DEL HIETOGRAMA DE DISEÑO

Para desarrollar la tormenta de diseño, se llevó a cabo un análisis de frecuencia de eventos extremos de precipitación, seguido por la construcción de curvas IDF y la generación del hietograma mediante el método de bloques alternantes. Este procedimiento se ajustó a los lineamientos del Plan Maestro de Aguas Lluvias del Gran Santiago (MOP, 2001), que establece como tiempos de concentración referenciales las duraciones de 2 y 6 horas.

El análisis de frecuencia se realizó a partir de la serie de máximas anuales de precipitación en 24 horas, correspondiente a 31 años de datos por intervalo de estudio. Este análisis se aplicó a tres periodos específicos: 1984–2014, 2020–2050 y 2068–2098, con el objetivo de contrastar los eventos extremos históricos con aquellos proyectados para el futuro cercano y lejano. Para cada periodo se evaluó la probabilidad de ocurrencia de eventos de distintas intensidades, ajustando las series a seis distribuciones teóricas: Normal, Lognormal, Gamma de dos parámetros, Pearson tipo III, Log-Pearson tipo III y Gumbel. La elección de la distribución más adecuada se efectuó mediante el test de Kolmogorov–Smirnov, con un nivel de significancia del 5%, lo que permitió determinar si las series de datos se ajustaban adecuadamente a cada distribución. Aquella que obtuvo el mejor ajuste se utilizó para estimar los valores de precipitación asociados a los periodos de retorno de 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 75, 100, 200 y 500 años.

Una vez obtenidos estos valores, se procedió a construir las curvas IDF correspondientes. Para ello, se empleó la ecuación propuesta por Bernard (1932), la cual ha sido adaptada y utilizada en Chile por Pizarro et al. (2007) en la elaboración de curvas IDF a nivel nacional. Esta ecuación (2) define la relación entre la intensidad de precipitación, la duración del evento y su periodo de retorno:

$$I = \frac{K \cdot T^m}{D^n} \quad (2)$$

En esta expresión, I corresponde a la intensidad de precipitación en milímetros por hora, T al periodo de retorno en años, y D a la duración del evento en minutos. Los parámetros K , m y n fueron ajustados a los datos mediante regresión lineal múltiple, considerando la información de precipitación para el sector en estudio. Para obtener intensidades en intervalos menores a 24 horas, se utilizó además la fórmula de Grunsky, ampliamente aplicada en hidrología chilena y recogida en el texto Fundamentos de Hidrología Aplicada (Stowhas, 2017).

Posteriormente, las curvas IDF obtenidas fueron validadas mediante comparación con las propuestas por Pizarro et al. (2007), específicamente en su estudio para las regiones Metropolitana, Maule y Biobío. Esta comparación permitió verificar la consistencia de los parámetros K , m y n en

la zona de estudio, asegurando coherencia con valores previamente reportados en la literatura nacional. Con el objetivo de representar la distribución temporal de la precipitación dentro de cada evento, se utilizó el método de bloques alternantes, ampliamente reconocido en hidrología aplicada (Chow et al., 1988; Pilgrim y Cordery, 1993). El Manual de Obras de Vialidad, Pavimentación y Aguas Lluvias (Serviu Metropolitano, 2020) indica que en Chile no existen relaciones validadas específicamente para el cálculo del tiempo de concentración en cuencas urbanas, por lo que recomienda el uso de fórmulas empíricas según el criterio del proyectista. Esto otorga flexibilidad para adaptar la metodología a las condiciones particulares de cada cuenca. En este caso, se definieron hietogramas con duraciones de 2 y 6 horas, siguiendo las directrices del Plan Maestro de Aguas Lluvias del Gran Santiago.

3. RESULTADOS

3.1. VALORES DE KGE

La Figura 1 presenta los valores KGE de los 26 GCM analizados en el período 1984–2014 en la estación Quinta Normal, considerando tanto su versión original como corregida mediante el método UQM. Los resultados muestran que, sin corrección de sesgo, la mayoría de los modelos presenta un bajo nivel de representatividad, con valores negativos o próximos a cero, mientras que, tras la corrección de sesgo, se observa una mejora general en el desempeño, aunque con variabilidad entre modelos.

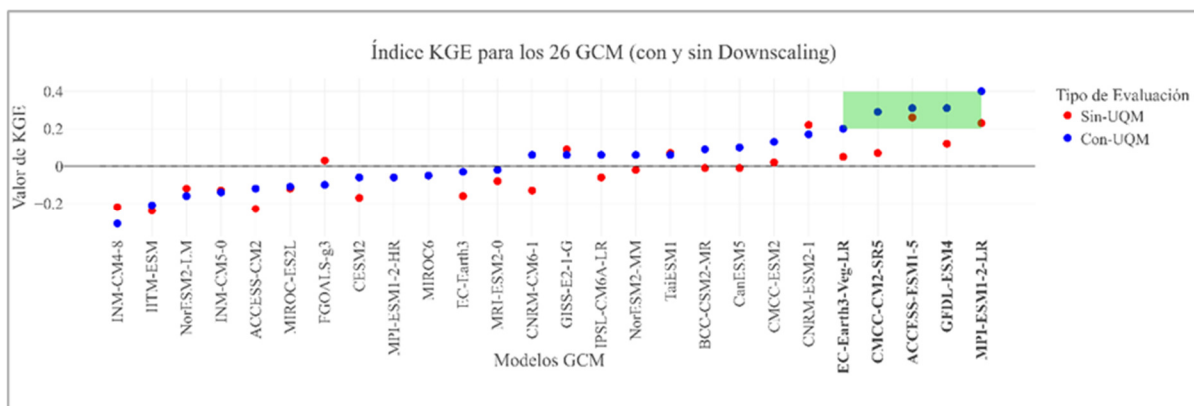


Figura 1. Índice KGE antes y después de la corrección de sesgo para los 26 modelos. Se destacan los cinco con mejor desempeño ($KGE > 0.2$).

En este trabajo se consideraron los cinco GCM corregidos con mayor KGE, los cuales alcanzaron valores entre 0.2 y 0.4. Este rango, si bien no responde a una escala oficial, se consideró como satisfactorio tomando como referencia los umbrales comúnmente aplicados al coeficiente NSE (Molnar, 2011). Cabe señalar que el KGE no cuenta con una escala de interpretación universal, por lo que esta analogía debe entenderse solo como un criterio orientativo (Knoben et al., 2019). De esta forma, los modelos seleccionados fueron: MPI-ESM1-2-LR, GFDL-ESM4, ACCESS-ESM1-

5, CMCC-CM2-SR5 y EC-Earth3-Veg-LR, los cuales serán considerados en las siguientes etapas del análisis por su mayor capacidad predictiva y coherencia con el régimen histórico observado.

3.2. TORMENTA DE DISEÑO

Se realizó un análisis de frecuencia para estimar los valores de precipitación máxima en 24 horas asociados a periodos de retorno entre 5 y 500 años, utilizando los cinco GCM corregidos con el método UQM y seleccionados por su desempeño en base a la métrica KGE. La distribución de mejor ajuste fue determinada mediante el test de Kolmogorov–Smirnov ($\alpha = 5\%$). Los cálculos se realizaron para cuatro escenarios SSP y tres periodos temporales: 1984–2014, 2020–2050 y 2068–2098.

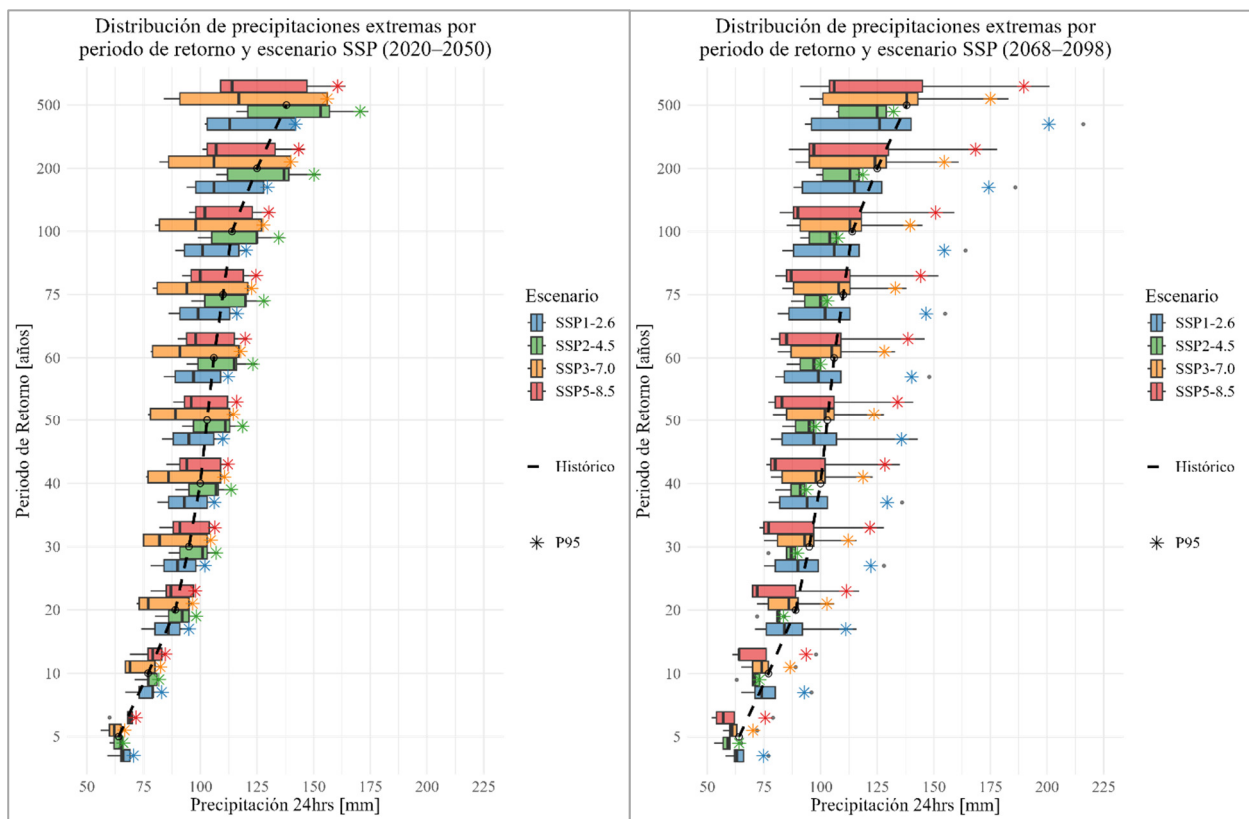


Figura 2. Distribución de precipitaciones extremas estimadas para distintos periodos de retorno bajo escenarios SSP, comparadas con el valor histórico (1984–2014). Periodos: 2020–2050 (izquierda) y 2068–2098 (derecha).

La Figura 2 presenta la comparación entre las precipitaciones proyectadas con los cinco GCM en los cuatro escenarios SSP y los valores históricos (1984–2014). Para el periodo 2020–2050, el análisis del percentil 95 muestra que los escenarios SSP1-2.6, SSP3-7.0 y SSP5-8.5 superan los valores históricos en varios periodos de retorno. En particular, el escenario SSP2-4.5 presenta valores de P95 consistentemente superiores al histórico en todos los periodos de retorno, e incluso

mayores que los observados en escenarios con mayores niveles de emisiones. En el periodo 2068–2098, esta situación cambia: los valores de P95 en SSP2-4.5 disminuyen respecto al histórico, mientras que los escenarios SSP1-2.6, SSP3-7.0 y SSP5-8.5 presentan aumentos sostenidos y superan al histórico desde periodos de retorno de 10 años. Destaca el caso de SSP1-2.6, que muestra el mayor incremento de todos los escenarios en este horizonte temporal. Además, se observa una amplia dispersión en los resultados entre modelos dentro de cada SSP, lo que evidencia la incertidumbre estructural de las proyecciones. Esto se aprecia claramente en el tamaño de las cajas de los diagramas, donde conviven proyecciones tanto de aumento como de disminución en la precipitación extrema.

Tabla 1. Ecuaciones IDF derivadas para distintos horizontes temporales y escenarios climáticos.

Horizonte Temporal	Escenario	K	m	n	Ecuación IDF
Histórico	Histórico	83,89	0,1639	0,5000	$I = \frac{83,89 \cdot T^{0,1639}}{D^{0,5}}$
	SSP1-2.6	93,50	0,1514	0,5000	$I = \frac{93,50 \cdot T^{0,1514}}{D^{0,5}}$
2020-2050	SSP2-4.5	82,23	0,2029	0,5000	$I = \frac{82,23 \cdot T^{0,2029}}{D^{0,5}}$
	SSP3-7.0	85,89	0,1825	0,5000	$I = \frac{85,89 \cdot T^{0,1825}}{D^{0,5}}$
	SSP5-8.5	90,37	0,1752	0,5000	$I = \frac{90,37 \cdot T^{0,1752}}{D^{0,5}}$
2068-2098	SSP1-2.6	91,11	0,2111	0,5000	$I = \frac{91,11 \cdot T^{0,2111}}{D^{0,5}}$
	SSP2-4.5	81,37	0,1581	0,5000	$I = \frac{81,37 \cdot T^{0,1581}}{D^{0,5}}$
	SSP3-7.0	88,30	0,1956	0,5000	$I = \frac{88,30 \cdot T^{0,1956}}{D^{0,5}}$
	SSP5-8.5	94,74	0,1979	0,5000	$I = \frac{94,74 \cdot T^{0,1979}}{D^{0,5}}$

Con base en los resultados de precipitación diaria previamente estimados, se calcularon las intensidades subdiarias y se ajustaron las curvas IDF siguiendo el procedimiento descrito en la metodología. La Tabla 1 presenta los coeficientes obtenidos mediante el método de Bernard para cada escenario climático y horizonte temporal, incluyendo el periodo histórico. Cabe señalar que el parámetro n se mantuvo constante en 0.5 en todos los casos, dado que se aplicó el método de Grunsky para estimar la distribución temporal de la precipitación en duraciones menores a 24 horas. Los resultados muestran un aumento en el valor del coeficiente K para los escenarios SSP1-2.6 y SSP5-8.5 hacia fines de siglo. Sin embargo, dado que el parámetro m también varía, la magnitud final de las intensidades proyectadas depende de la combinación de ambos. En cambio, el escenario SSP2-4.5 presenta una disminución en K , reflejando comportamientos divergentes entre escenarios.

A partir de las ecuaciones IDF obtenidas, se generaron hietogramas de diseño correspondientes a eventos de 2 y 6 horas, considerando un periodo de retorno de 100 años. La Figura 3 resume los resultados para el periodo histórico y los escenarios proyectados, diferenciando entre los horizontes 2020–2050 y 2068–2098.

En el horizonte futuro cercano, se observan aumentos en la intensidad de precipitación respecto a los valores históricos en todos los escenarios. El más crítico es el escenario SSP2-4.5, que presenta los valores más altos que los históricos para ambas duraciones, seguido por el SSP5-8.5. En tanto, los escenarios SSP1-2.6 y SSP3-7.0 también presentan valores mayores que los históricos, aunque de menor magnitud.

En el periodo futuro lejano, las proyecciones son aún más contrastantes. Los escenarios SSP1-2.6 y SSP5-8.5 exhiben los mayores incrementos en los hietogramas de precipitación, con aumentos del orden de 30–35 % para ambas duraciones con respecto a los valores históricos, lo que implica un agravamiento de los extremos hídricos hacia fines de siglo. El escenario SSP3-7.0 también presenta un alza relevante. En cambio, el escenario SSP2-4.5 muestra una disminución respecto al caso histórico, evidenciando una trayectoria con menor intensidad proyectada en este horizonte.

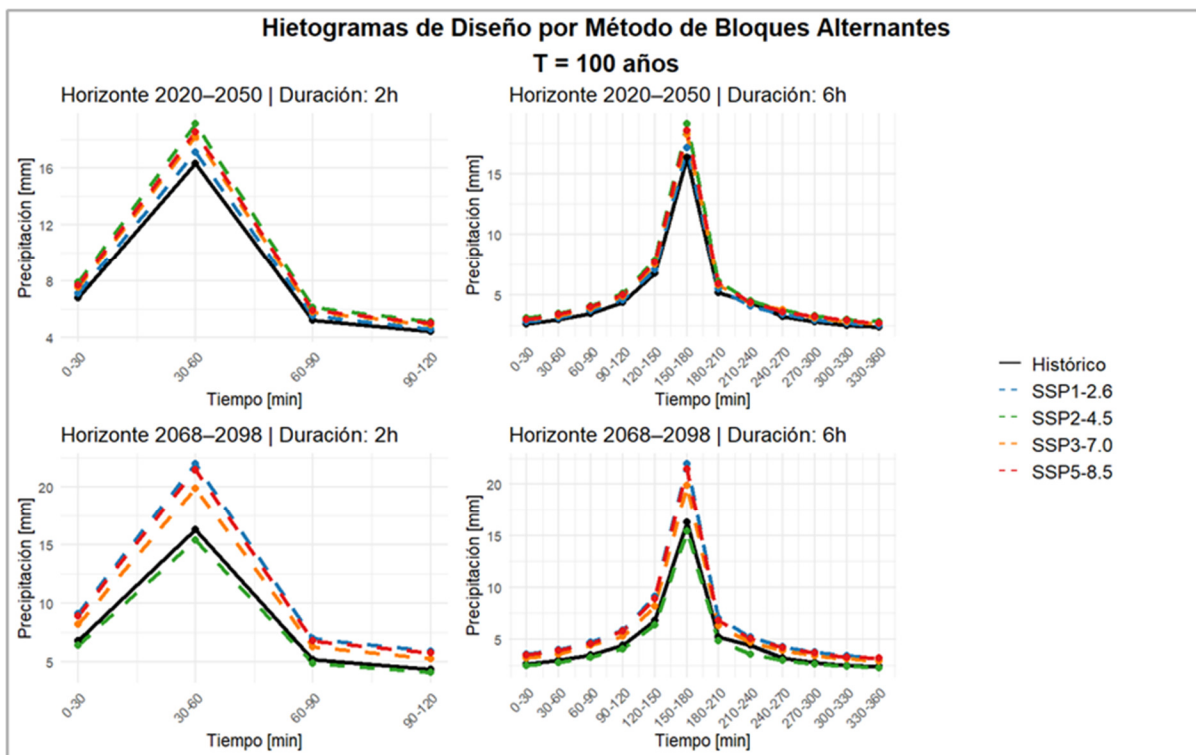


Figura 3. Hietogramas de diseño por bloques alternantes para duraciones de 2 h y 6 h, construidos a partir de las ecuaciones IDF con $T = 100$ años bajo distintos escenarios SSP y el periodo histórico.

4. CONCLUSIONES

Este estudio aborda la generación de hietogramas de diseño para el barrio La Chimba, en Santiago, considerando los efectos del cambio climático en las precipitaciones extremas. La metodología presentada en este trabajo combina técnicas como el downscaling estadístico no estacionario y la construcción de curvas IDF bajo escenarios de cambio climático para estimar precipitaciones extremas a escala local.

Los resultados de este trabajo muestran una alta incertidumbre respecto a los potenciales cambios en las precipitaciones extremas. Sin embargo, en los casos pesimistas se identifica una tendencia general hacia el incremento en la intensidad y frecuencia de estos eventos, en distintos escenarios y horizontes temporales. Esta tendencia no es homogénea entre escenarios, ya que cada uno presenta tanto disminuciones como aumentos, reflejando la complejidad e incertidumbre inherente a las proyecciones climáticas. En este sentido, los resultados permiten concluir que, en la mayoría de los escenarios, se proyecta un aumento en la magnitud e intensidad de la precipitación tanto en el futuro cercano (2020–2050) como en el lejano (2068–2098), lo que podría eventualmente incrementar la superficie de inundación y las velocidades del agua, exponiendo aún más las zonas patrimoniales construidas del barrio La Chimba.

La metodología y las proyecciones de este trabajo permiten entender las potenciales condiciones futuras ante un clima incierto, junto a las incertidumbres asociadas, capturando la influencia de las condiciones climáticas cambiantes y facilitando la identificación de escenarios críticos para la planificación de estrategias más robustas frente a amenazas de inundación. Adicionalmente, esta metodología y sus resultados servirán como base para futuros estudios de modelación hidrológica y planificación de infraestructura, especialmente en sectores urbanos con alta vulnerabilidad social, exposición territorial y valor patrimonial.

Los datos generados en este estudio constituyen un aporte relevante para evaluar la efectividad de distintas metodologías, contrastar resultados y refinar los análisis en investigaciones futuras, contribuyendo al avance del conocimiento en hidrología urbana bajo condiciones de cambio climático. Este aporte reafirma la necesidad de continuar desarrollando herramientas científicas orientadas a la protección del patrimonio urbano frente a amenazas hidrometeorológicas. Por ello, el desarrollo de hietogramas de diseño bajo escenarios climáticos se posiciona como un componente esencial para la planificación y diseño de infraestructura urbana. Estos hietogramas permitirán a urbanistas e ingenieros proyectar sistemas de drenaje más robustos y adaptativos, capaces de responder a la variabilidad climática proyectada y de reducir la exposición de comunidades y edificaciones patrimoniales como las de La Chimba a los riesgos de inundación.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por el fondo de investigación NUCLEOS/UNAB/2024/81360982 de la Universidad Andrés Bello.

REFERENCIAS

Alfieri, J. G., Ban, N. C., Lettenmaier, D. P., & Porporato, A. (2016). Precipitation extremes under climate change: A review of current research. *Journal of Hydrometeorology*, 17(2), 345–367.

Arnbjerg-Nielsen, K., Willems, P., Olsson, J., Beecham, S., Pathirana, A., Bülow Gregersen, I., Madsen, H., & Nguyen, V.-T.-V. (2013). Impacts of climate change on rainfall extremes and urban drainage systems: A review. *Water Science & Technology*, 68(1), 16–28. <https://doi.org/10.2166/wst.2013.251>

Bernard, M. M. (1932). Formulas for rainfall intensities of long durations. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 96, 592–606.

Chadwick, C., Gironás, J., González-Leiva, F., and Aedo, S. (2023). Bias adjustment to preserve changes in variability: the unbiased mapping of GCM changes. *Hydrological Sciences Journal*, 68(8), 1184–1201. <https://doi.org/10.1080/02626667.2023.2201450>

Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). *Applied Hydrology*. McGraw-Hill.

Dirección Meteorológica de Chile. (2023). Reporte anual de la evolución del clima en Chile: Informe climático del año 2022. Oficina de Cambio Climático, Sección Climatología.

Gateño, F., Mendoza, P., Vásquez, N., Jiménez, H., Jerez, C., Lagos-Zúñiga, M., Vargas, X., Rubio-Álvarez, E., & Montserrat, S. (2023). Diagnóstico de modelos del CMIP6 para evaluar el impacto del cambio climático en Chile. En XXVI Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica. Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica.

Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., & Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377(1–2), 80–91.

Hosseinzadehtalaei, P., Tabari, H., & Willems, P. (2020). Climate change impact on short-duration extreme precipitation and intensity–duration–frequency curves over Europe. *Journal of Hydrology*, 590, 125249. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125249>

IPCC. (2021). Cambio climático 2021: impactos, adaptación y vulnerabilidad. Contribución del Grupo de trabajo II al sexto informe de evaluación del IPCC [H.-O. Pörtner et al. (Eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge y Nueva York, 3056 pp. doi:10.1017/9781009325844.

Knoben, W. J. M., Freer, J. E., & Woods, R. A. (2019). Technical note: Inherent benchmark or not? Comparing Nash–Sutcliffe and Kling–Gupta efficiency scores. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(10), 4323–4331.

Kundzewicz, Z. W., Kanae, S., Seneviratne, S. I., Handmer, J. W., Nicholls, N., Peduzzi, P., Mechler, R., Bouwer, L. M., Arnell, N. W., Mach, K., Muir-Wood, R., Brakenridge, G. R., Kron, W., Benito, G., Honda, Y., Takahashi, K., & Sherstyukov, B. (2014). Flood risk and climate change: global and regional perspectives. *Hydrological Sciences Journal*, 59(1), 1–28. <https://doi.org/10.1080/02626667.2013.857411>

Maraun, D., Wetterhall, F., Ireson, A. M., Chandler, R. E., Kendon, E. J., Widmann, M., & Rust, H. W. (2010). Precipitation downscaling under climate change: Recent developments to bridge the gap between dynamical models and the end user. *Reviews of Geophysics*, 48(3).

Molnar, P. (2011). On the typical range, sensitivity, and normalization of Mean Squared Error and Nash–Sutcliffe Efficiency type metrics. *Water Resources Research*, 47(10), W10521.

Ministerio de Obras Públicas (MOP). (2001). Plan Maestro de Evacuación y Drenaje de Aguas Lluvias del Gran Santiago: Informe Final (Consultoría PM-01). CADE-IDEPE, Dirección de Obras Hidráulicas.

Organización Meteorológica Mundial. (2011). Guía de prácticas climatológicas (OMM-Nº 100). Ginebra, Suiza.

Pilgrim, D. H., & Cordery, I. (1993). Flood Runoff. En D. R. Maidment (Ed.), *Handbook of Hydrology* (Cap. 9). McGraw-Hill.

Pizarro, R., Cisternas, R., Salgado, R., & Valdés, R. (2007). Curvas intensidad-duración-frecuencia para las regiones Metropolitana, Maule y Biobío. Intensidades desde 15 minutos a 24 horas. Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas, Chile.

Requena, A. I., Burn, D. H., & Coulibaly, P. (2021). Technical guidelines for future intensity-duration-frequency curve estimation in Canada. *Canadian Water Resources Journal*, 46, 87–104.

San Martín, K. (2018). Renovación urbana en áreas patrimoniales: La manzana como unidad de planificación y diseño urbano para la protección del Barrio Recoleta-Dominica, La Chimba. Pontificia Universidad Católica de Chile.

Serviú Metropolitano. (2020). Manual de Obras de Vialidad, Pavimentación y Aguas Lluvias. Subdirección de Pavimentación y Obras Viales. Recuperado de <http://pavimentacion.metropolitana.minvu.cl/mpall3.asp>

Steiner, T. A., Caro, R. C., & Catalán, G. H. (1989). Modelos para el cálculo de colectores de aguas lluvias. Presentado en el IX Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica, Santiago, Chile.

Stowhas, L. (2017). Fundamentos de Hidrología Aplicada. Departamento de Obras Civiles, Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile.

Thrasher, B., Wang, W., Michaelis, A., Melton, F., Lee, T., & Nemani, R. (2021). NASA Global Daily Downscaled Projections, CMIP6. NASA Earth Exchange. Recuperado de <https://nex-gddp-cmip6.s3.us-west-2.amazonaws.com/index.html>

Vidal, C., & Romero, H. (2010). Efectos ambientales de la urbanización de las cuencas de los ríos Biobío y Andalién sobre los riesgos de inundación y anegamiento de la ciudad de Concepción. En L. Pérez & R. Hidalgo (Eds.), *Concepción metropolitana (AMC). Planes, procesos y proyectos. Serie GEOlibros*, Instituto de Geografía, Pontificia Universidad Católica de Chile.