

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXVII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**CURVASIDF.CL: PLATAFORMA DE CURVAS INTENSIDAD DURACIÓN
FRECUENCIA EN ALTA RESOLUCIÓN ESPACIAL PARA CHILE**

CRISTÓBAL SOTO ESCOBAR¹
MAURICIO ZAMBRANO-BIGIARINI^{2,3}
VIOLETA TOLORZA⁴
RENÉ GARREAUD^{5,3}

RESUMEN

Este estudio aborda la estimación de curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) en Chile continental, un insumo clave para el diseño de obras hidráulicas, bajo los retos de la escasez de registros sub-diarios y la no estacionariedad asociada al cambio climático. A partir de cinco productos de precipitación horaria en grilla (IMERGv06B, IMERGv07B, ERA5, ERA5-Land, y CMORPH-CDR) y 161 pluviómetros, se calcularon intensidades máximas anuales (I_{max} mm/h), utilizando distribuciones de Gumbel estacionarias y no estacionarias para varias duraciones (1–72h) y períodos de retorno (2–100 años). Las intensidades derivadas fueron ajustadas mediante factores de corrección de sesgo para sincronizarlas con datos in situ y se evaluaron tendencias mediante la prueba modificada de Mann-Kendall. Se destacó la influencia de la longitud de la serie de datos —analizando tanto períodos de 20 como de 40 años— y los supuestos de estacionariedad en la estimación de I_{max} para el diseño hidrológico. Se encontraron tendencias decrecientes significativas en las intensidades extremas en gran parte del país, especialmente en el centro-sur y en productos específicos como CMORPH-CDR y ERA5-Land. El análisis espacial mostró que las mayores intensidades extremas se localizan en Chile central-sur y los Andes entre Maule y La Araucanía (35–40°S) para duraciones de 24h o más, patrones relevantes para la infraestructura hidráulica. Además, las diferencias entre métodos estacionarios y no estacionarios resultaron menores a 5 mm/h para la mayoría de los casos. Como aporte central, los resultados —incluyendo valores I_{max} validados y listos para uso práctico— están integrados en una plataforma web pública y amigable: <https://curvasIDF.cl/>. Esta herramienta facilita la selección de parámetros de diseño robustos y actualizados, apoyando así a ingenieros y tomadores de decisiones en el dimensionamiento seguro y eficiente de obras hidráulicas en un contexto de variabilidad climática y restricciones de datos.

¹ Ingeniero Consultor en ICASS Spa - email: cristobal.soto.9@gmail.com

² Departamento de Ingeniería en Obras Civiles, Universidad de La Frontera - email: mauricio.zambrano@ufrontera.cl

³ Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia, (CR)2, Universidad de Chile

⁴ Universidad de La Frontera, Temuco, Chile

⁵ Departamento de Geofísica, Universidad de Chile, Santiago, Chile

1. INTRODUCCIÓN

La estimación precisa de eventos de precipitación extrema es clave en ingeniería, hidrología y ciencias climáticas. Las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) son una herramienta ampliamente usada para representar relaciones estadísticas entre intensidad (mm/h), duración (horas) y frecuencia de eventos extremos (Sherman, 1931; Bernard, 1932; Haruna et al., 2023). Estas se han construido predominantemente bajo el supuesto de estacionariedad en extremos de precipitación, es decir, una distribución de probabilidad invariante en el tiempo ha sido ampliamente debatido en décadas recientes (Koutsoyiannis y Montanari, 2015; Serinaldi y Kilsby, 2015; Serinaldi, 2015; Milly et al., 2015; Beven, 2016).

Por otro lado, las curvas IDF no estacionarias consideran la naturaleza dependiente del tiempo de los parámetros de distribución y pueden capturar tendencias existentes en la intensidad de precipitación (por ejemplo, Agilan y Umamahesh, 2018; Ouarda et al., 2019; Yan et al., 2021; Silva et al., 2021; Vinnarasi y Dhanya, 2022; Schlef et al., 2023). Por lo tanto, se han desarrollado varios enfoques en las últimas décadas para computar curvas intensidad-duración-frecuencia no estacionarias, para enfrentar patrones de precipitación cambiantes (por ejemplo, Cheng y Aghakouchak, 2014; Salas et al., 2018).

Respecto a la fuente de datos utilizada para construir curvas IDF, tradicionalmente se han derivado de mediciones puntuales obtenidas de pluviómetros instalados en tierra (por ejemplo, Chow et al., 1988; Koutsoyiannis et al., 1998). Sin embargo, los datos de precipitación basados en puntos obtenidos de pluviómetros, aunque valiosos, presentan limitaciones para capturar la verdadera variabilidad espacio-temporal de patrones de precipitación, debido al reubicación de estaciones, el uso de diferentes tipos de pluviómetros, entre otros (Pollock et al., 2018; Morbidelli et al., 2020; Fadhel y Saleh, 2021).

Para superar estas limitaciones, los productos de precipitación grillados han emergido en décadas recientes, proporcionando conjuntos de datos espacialmente continuos y temporalmente homogéneos que ofrecen una representación más comprensiva de dinámicas de precipitación (Huffman et al., 2017; Xie et al., 2017; Muñoz-Sabater et al., 2021).

Estos productos de precipitación grillados han abierto nuevas oportunidades para mejorar la precisión y representación espacial de curvas IDF, especialmente en regiones con topografía compleja y variabilidad climática (Ombadi et al., 2018; Faridzad et al., 2018; Sun et al., 2019; Noor et al., 2021; Venkatesh et al., 2022). Su resolución y cobertura mejoradas los convierten en herramientas valiosas para diversas aplicaciones científicas y de ingeniería, mientras también avanzan nuestro entendimiento de eventos de precipitación extrema.

En este estudio, tenemos como objetivo abordar los desafíos previamente mencionados derivando. En particular, abordamos las siguientes preguntas de investigación:

1. ¿Cuál es la distribución espacial de las intensidades máximas anuales de precipitación estacionarias para diferentes duraciones?
2. ¿Hay alguna tendencia significativa en las intensidades máximas anuales de precipitación estacionarias que justifique usar curvas IDF no estacionarias?

3. ¿Es la diferencia entre curvas IDF estacionarias y no estacionarias lo suficientemente significativa para justificar usar un análisis no estacionario?
4. ¿Cuál es el impacto de la longitud típica de datos de productos de precipitación utilizados para estimar curvas IDF estacionarias y no estacionarias?

Adicionalmente, proporcionaría una plataforma web amigable para permitir el uso de los resultados de este trabajo.

2. ZONA DE ESTUDIO Y DATOS CONSIDERADOS

2.1 Zona de estudio

Nuestra área de estudio es Chile continental, con más de 4,000 km de extensión latitudinal (17.5-56.5°S), desde el Océano Pacífico en el oeste (~76°W) hasta las montañas de los Andes en el este (~66°W). Cubre un área de ~756,626 km², con elevaciones que van desde el nivel del mar hasta 6,893 m s.n.m., abarcando cuatro unidades geomorfológicas distintivas: llanuras costeras, cordillera de la costa, depresión intermedia, y la cordillera de los Andes.

En la Figura 1 se presenta que esta área exhibe una variabilidad climática que va desde desiertos cálidos y secos en el norte hasta climas polares y de tundra en el sur. Para describir mejor los patrones espaciales de precipitación extrema, dividimos nuestra área de estudio en cinco zonas macro-climáticas: Extremo Norte (17.5-26.0°S); Norte Cercano (26.0-32.2°S); Chile Central (32.2-36.2°S), Sur (36.4-43.7°S) y Sur Austral (43.7-56.5°S).

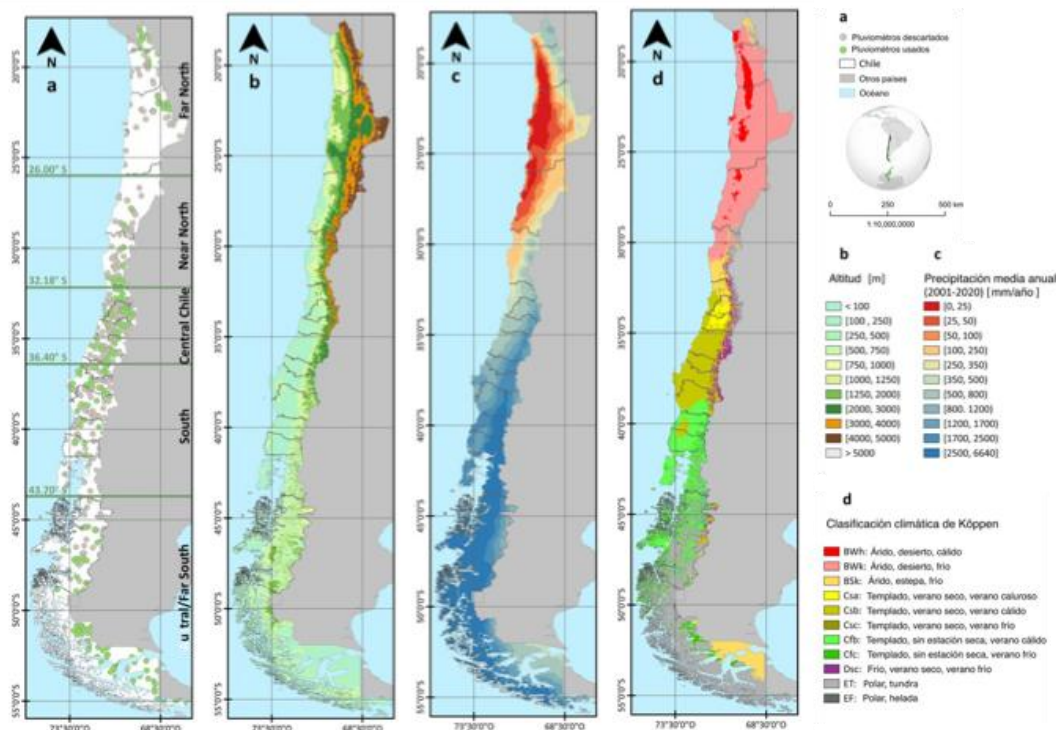


Figura 1 Zona de estudio. De izquierda a derecha: a) pluviómetros y zonas macro-climáticas b) Modelo de elevación digital, c) Precipitaciones anuales (mm) (ERA5-Land), d) Clasificación climática de Köppen-Geiger (Beck et al., 2023)

2.2 Estimaciones satelitales de precipitación

En este trabajo se utilizaron cinco conjuntos de datos de precipitación en grilla enlistados en la Tabla 1.

Tabla 1. Conjuntos de datos de precipitación en grilla utilizados en este estudio.

Productos de precipitación	Período temporal	Extensión espacial	Resolución espacial y temporal	Tipo de producto	Referencias
IMERGv06B	2000/Jun–2021/Sep	60°N-60°S	0.10°; semi-horario	Satélite	Huffman et al. (2015, 2017)
IMERGv07B	1998/Ene–presente	global	0.10°; semi-horario	Satélite	Huffman et al. (2023, 2024)
ERA5	1940/Ene–presente	global	~0.28°; horario	Reanálisis	Hersbach et al. (2018, 2020)
ERA5-Land	1950/Ene–presente	global	0.10°; horario	Reanálisis	Muñoz-Sabater (2019); Muñoz-Sabater et al. (2021)
CMORPH-CDR	1998/Ene–presente	60°N-60°S	0.08°; semi-horario	Satélite	Xie et al. (2017, 2018)

2.3 Registro de precipitaciones en pluviómetros

La Dirección General de Aguas (DGA), la Dirección Meteorológica de Chile (DMC), la Red Agrometeorológica del Instituto de Investigaciones Agropecuarias (Agromet) y el Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas (CEAZA) tienen más de 600 pluviómetros con series temporales horarias de precipitación observada en Chile. Todos estos registros horarios sin procesar (GMT-4) de 2000 a 2021 están disponibles públicamente en la plataforma web Vismet (<https://vismet.cr2.cl/>) del Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2).

Después de un análisis exploratorio y control de calidad básico, descartamos 406 estaciones Agromet debido a la existencia de algunos valores de precipitación anómalamente grandes. Para las 194 estaciones restantes, analizamos la cantidad de datos horarios efectivamente disponibles para varios períodos temporales de 5 años, lo que llevó a la selección de 161 pluviómetros con más del 80% de datos horarios entre el 01-Ene-2013 y el 31-Dic-2017. La Figura 1 muestra la ubicación de los 161 pluviómetros seleccionados.

3. METODOLOGÍA

Después de descargar los conjuntos de productos de precipitación semi-horarios (IMERGv06B, IMERGv07B y CMORPH-CDR) se agregaron en intervalos horarios para asegurar consistencia en la resolución temporal utilizada para los análisis posteriores. El procedimiento utilizado para en este trabajos se puede resumir en los siguientes pasos: i) estimación de intensidades máximas anuales para diferentes duraciones; ii) cálculo de factores de corrección de sesgo para cada conjunto de datos grillado; iii) análisis tendencia de las intensidades máximas anuales corregidas por sesgo; iv) estimación de intensidades máximas anuales para diferentes duraciones y períodos de retorno usando distribuciones de probabilidad Gumbel estacionarias y no estacionarias.

3.1 Intensidades máximas anuales (I_{max})

Para los 161 pluviómetros seleccionados y para los cinco conjuntos de datos de precipitación en grilla calculamos I_{max} para duraciones (d) de 1, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 18, 24, 48, y 72 horas. Para esto, utilizamos ventanas de tiempo móviles (Soto y Mier, 2013a, b; Moraga et al., 2015), donde estimar la I_{max} de cada duración, se convierte esta duración en la longitud de una ventana de tiempo móvil utilizada para sumar los datos de precipitación horaria a lo largo de la duración seleccionada. Por ejemplo, cuando se calcula la intensidad máxima de precipitación para una duración de 2 horas, los datos de precipitación horaria se agregan desde 00:00 hasta 02:00 UTC, desde 01:00 hasta 03:00 UTC, desde 02:00 hasta 04:00 UTC, ..., y entonces el máximo anual correspondiente se calcula para cada ventana móvil de 2 horas en cualquier año. Esto en contraste con las ventanas de tiempo fijas ampliamente utilizadas (ej., para una duración de 2 horas, las intensidades se calculan desde 00:00 hasta 02:00 UTC, 02:00 hasta 04:00 UTC, ...). La adopción de una ventana móvil en lugar de una ventana fija se espera que evite la omisión de las intensidades más altas en cada duración (Haruna et al., 2023).

3.2 Bias-correction o corrección de sesgo

Siguiendo a Ombadi et al. (2018), computamos factores de corrección de sesgo para cada conjunto de datos de precipitación grillado para lograr una buena concordancia entre la I_{max} observada en los pluviómetros y obtenida en la celda de grilla correspondiente. El procedimiento incluye: 1) Computación de I_{max} para pluviómetros y productos grillados; 2) Para cada duración y celda de la malla, se calculó un factor de corrección de sesgo anual, dividiendo la I_{max} en el pluviómetro por la I_{max} del producto de precipitación; 3) Luego, estos factores se promediaron a lo largo de los años de análisis para corregir el error sistemático ($S_{d,GR}$); 4) Interpolación espacial usando *thin plate spline interpolation*. Implementado a través del paquete `fields` de R (Nychka et al., 2021); 5) Se multiplicaron las I_{max} por los factores de corrección y se obtuvieron I_{max} corregidas.

3.3 Tendencias en I_{max}

Analizamos si el uso de curvas IDF no estacionarias está justificado para nuestra área de estudio. Para ello usamos la prueba no paramétrica de Mann-Kendall modificada (Hamed y Rao, 1998) para identificar tendencias monótonas ascendentes o descendentes a lo largo del tiempo en las I_{max} corregidas. Los resultados se evalúan usando el Tau de Kendall (τ), el cual varía entre -1 y +1, con valores positivos (negativos) que indican una tendencia creciente (decreciente). Cuanto más cercano esté τ a -1 o +1, más fuerte es la tendencia, y $\tau = 0$ indica ausencia de tendencia (es decir, los datos son independientes o aleatorios). Evaluamos la significancia estadística de las tendencias calculadas usando un nivel de significancia $\alpha = 0.05$. Para ello se utilizó el paquete `modifiedmk` en R (Patakamuri y O'Brien, 2021).

3.4 Modelo estacionario

Las curvas IDF estacionarias han sido históricamente utilizadas en ingeniería civil para diseñar sistemas de drenaje y gestión de aguas pluviales basada en períodos de retorno. En

este trabajo, consideramos una distribución Gumbel ($\xi = 0$) porque ha sido la distribución más común utilizada en el modelado de extremos de precipitación. La función de distribución acumulativa de la distribución Gumbel está dada por $F(x;\mu,\sigma) = \exp(-\exp(-(x-\mu)/\sigma))$, donde μ es el parámetro de ubicación y σ es el parámetro de escala. Para este ajuste se utilizó con el paquete `fitdistrplus` en R (Delignette-Muller y Dutang, 2015).

3.5 Modelo no estacionario

Los valores de I_{max} del modelo no estacionario se computaron siguiendo el enfoque de Cheng et al. (2014), donde el modelado estadístico se integra con consideraciones de cambio climático. Asumimos que el parámetro de ubicación μ de la distribución Gumbel es solo una función del tiempo: $\mu(t) = \mu_1(t) + \mu_0$, mientras mantenemos constante el parámetro de escala σ . Los parámetros se estimaron utilizando el método de máxima verosimilitud. Para el modelo no estacionario de I_{max} , los parámetros se estimaron utilizando el paquete `extRemes` en R (Gilleland y Katz, 2016).

3.6 Impacto en la longitud de datos

Para analizar el impacto de la longitud de datos utilizada en la estimación de I_{max} corregidas para diferentes duraciones y períodos de retorno, en este trabajo comparamos las intensidades máximas anuales estimadas con 40 y 20 años de datos para ERA5 y ERA5-Land, los únicos dos conjuntos de datos con 40 o más años de datos de precipitación horaria.

4. RESULTADOS

4.1 Sesgo en I_{max} en pluviómetros

La Figura 2 muestra diagramas de caja con la distribución y valores medianos de los factores de corrección de sesgo anuales promedio ($S_{d,GR}$); para cada conjunto de datos grillado, agregados por zona macro-climática (valor >1 indican sub-estimación y <1 sobre-estimación). En general, todos los conjuntos de datos grillados –excepto CMORPH-CDR– mostraron sesgos menores para duraciones más largas ($> 6h$), con ambos productos IMERG sobreestimando I_{max} en duraciones cortas ($<4h$), mientras que ERA5 y ERA5-Land las subestimaron.

En el Extremo Norte, donde todos los pluviómetros están en elevaciones altas (sobre 3,000 m s.n.m.), ambos productos IMERG notoriamente subestiman I_{max} para todas las duraciones. Esta subestimación está en acuerdo con estudios previos, especialmente en regiones montañosas. Cabe destacar que no se encontró una correlación clara entre el sesgo de I_{max} y la elevación. El estudio decidió no proporcionar mapas de I_{max} para el Extremo Norte de Chile debido a la escasez de datos de pluviómetros y a valores poco realistas de la interpolación en esa región, lo que resalta la necesidad de aumentar la densidad de pluviómetros.

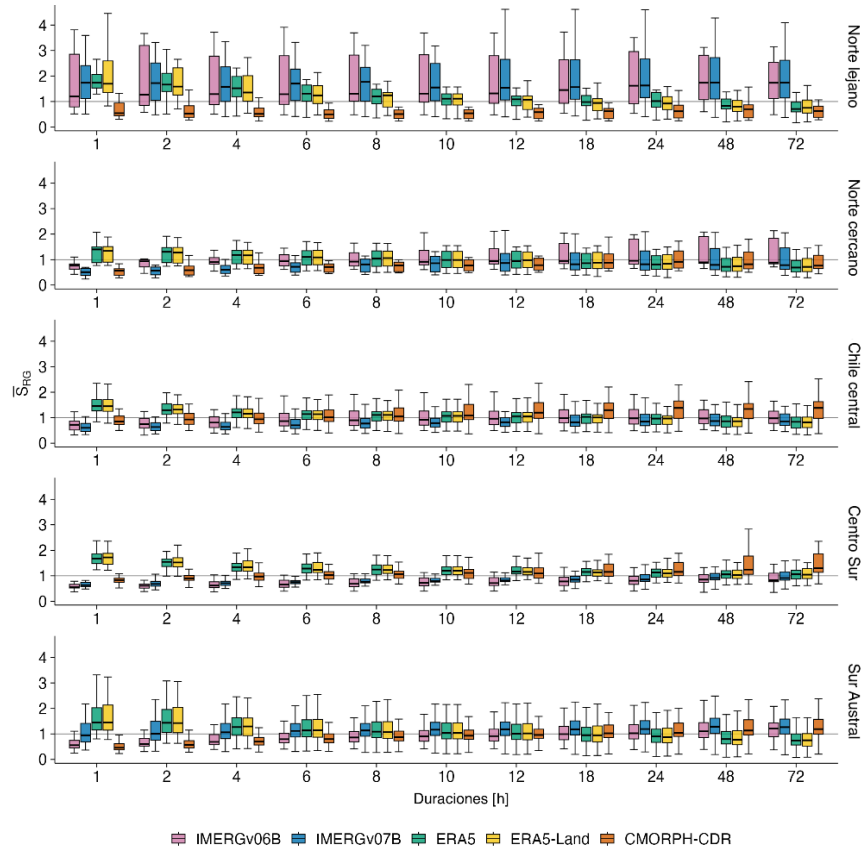


Figura 2 Boxplots de factores de corrección de sesgo por zona macro-climática. Valores menores a 1 indican sobreestimación I_{max} y mayores a 1 subestimación de I_{max} .

4.2 Tendencias en I_{max}

La Figura 3 muestra Tau de Kendall (τ) para todos los conjuntos de datos grillados para 2001-2021. IMERGv07B presenta tendencias crecientes aisladas en el Norte Cercano y tendencias decrecientes en las regiones de Valparaíso y Metropolitana en Chile Central. ERA5-Land muestra tendencias decrecientes desde Valparaíso hasta las regiones del Biobío (32–38°S). CMORPH-CDR muestra tendencias decrecientes para todas las duraciones y a través de toda el área continental de Chile.

Estos resultados contrastan con estudios globales que sugieren un aumento en las intensidades de precipitación extrema debido al incremento de las temperaturas (e.g. Pall et al., 2007; Fowler et al., 2021^{a, b}; Neelin et al., 2022). Sin embargo, la disminución de I_{max} en Chile es consistente con un patrón observado en otras regiones del mundo (e.g., Liu et al., 2005; Utsumi et al., 2011; Serrano-Notivol et al., 2018). Una posible explicación para esta disminución en Chile es la reducción del número de tormentas invernales (frentes fríos) que han afectado la zona central en las últimas décadas (Garreaud et al., 2019). Este patrón coincide con la reducción documentada de precipitaciones diarias en todas las estaciones, excepto verano, entre 1979 y 2017 (Lagos-Zúñiga et al., 2024) y con la marcada tendencia a la sequía registrada en Chile central y sur durante 2010–2022, en parte debido al cambio climático (Boisier et al., 2018) y acentuada por la megasequía chilena (Garreaud et al., 2017). Aunque años húmedos como 2023 y 2024, que quedaron fuera de nuestro periodo de estudio,

podrían modificar estas tendencias. Las proyecciones de modelos climáticos también respaldan nuestros hallazgos: las simulaciones globales sugieren una ligera disminución en los extremos de precipitación para el Norte Cercano y Chile Central hacia 2075–2099 respecto a 1990–2014, a pesar del aumento global (Martinez-Villalobos y Neelin, 2023).

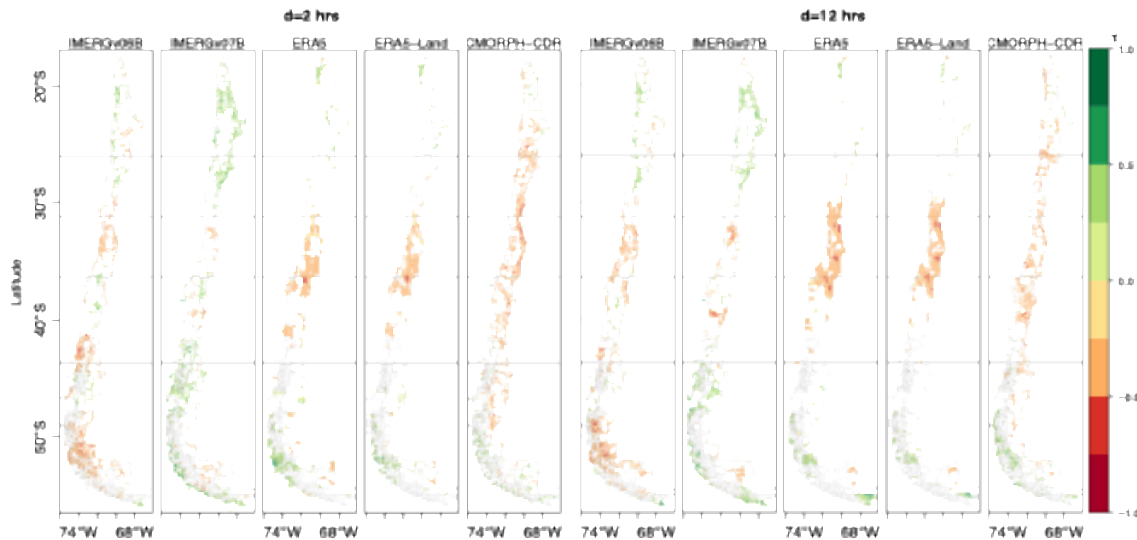


Figura 3 Mapas de Tau de Kendall para productos grillados. Valores negativos indican tendencias decrecientes y valores positivos tendencias crecientes.

4.3 I_{max} derivadas del modelo estacionario

La Figura 4 muestran mapas de valores I_{max} derivados del modelo estacionario para un período de retorno de 50 años y duraciones de 2 y 12 h. En general se observa que las I_{max} más elevadas se concentran en el Centro y Sur de Chile (lo cual es igual para otras duraciones y periodos de retorno), un hallazgo que contrasta con el patrón de precipitación media anual, la cual aumenta de manera constante hacia el sur. Para duraciones cortas (e.g., 1 y 2 horas), las I_{max} más altas se distribuyen desde el Centro de Chile hasta la Patagonia Austral. Sin embargo, para duraciones más largas (e.g., 24 horas o más), las intensidades más elevadas se encuentran principalmente en la Cordillera de los Andes.

En la comparación entre los productos grillados, IMERGv07B, ERA5 y ERA5-Land mostraron una fuerte concordancia en la distribución espacial y los valores numéricos de I_{max} para todas las duraciones. Esta convergencia aumenta la confianza en las I_{max} proporcionadas por estos tres conjuntos de datos. Por otro lado, IMERGv06B y CMORPH-CDR exhibían I_{max} más elevadas y mayor recurrencia de outlier, respecto al resto todos los conjuntos de datos, especialmente en la cordillera de los Andes.

4.4 Comparación de I_{max} de modelos no estacionarios vs estacionarios

Los paneles b) y d) de la Figura 4 muestran mapas de diferencias I_{max} entre modelos no estacionarios y estacionarios. La predominancia del color amarillo indica que, en general, las intensidades del modelo no estacionario son ligeramente menores que sus equivalentes estacionarios (diferencias en [0, 5] mm/h).

La Figura 5 muestra que las diferencias medianas entre I_{max} estimadas usando modelos no estacionarios y estacionarios están consistentemente desplazadas hacia valores negativos, confirmando que los valores I_{max} no estacionarios son ligeramente menores que sus contrapartes estacionarias (diferencias medias en $[0, 1]$ mm/h).

Nuestros resultados muestran que, en Chile, la existencia de una tendencia estadísticamente significativa en I_{max} no implica necesariamente que existan diferencias relevantes entre los valores de I_{max} obtenidos a partir de modelos estacionarios y no estacionarios. Por ende, aunque es fundamental considerar la no estacionariedad en el análisis de precipitaciones extremas, las tendencias observadas pueden reproducirse adecuadamente utilizando modelos estacionarios que incorporen la dependencia temporal de los parámetros o empleando distribuciones de probabilidad flexibles (Dimitriadis et al., 2021), coherente con lo reportado por Ganguli y Coulibaly (2017); Yilmaz et al. (2014); y Yilmaz y Perera (2014). Además, Dimitriadis et al. (2021) y Dong et al. (2021) destacan que algunos modelos estacionarios, especialmente aquellos que utilizan distribuciones más flexibles o consideran la correlación temporal, son capaces de representar tanto las tendencias observadas como la persistencia a largo plazo de las precipitaciones extremas.

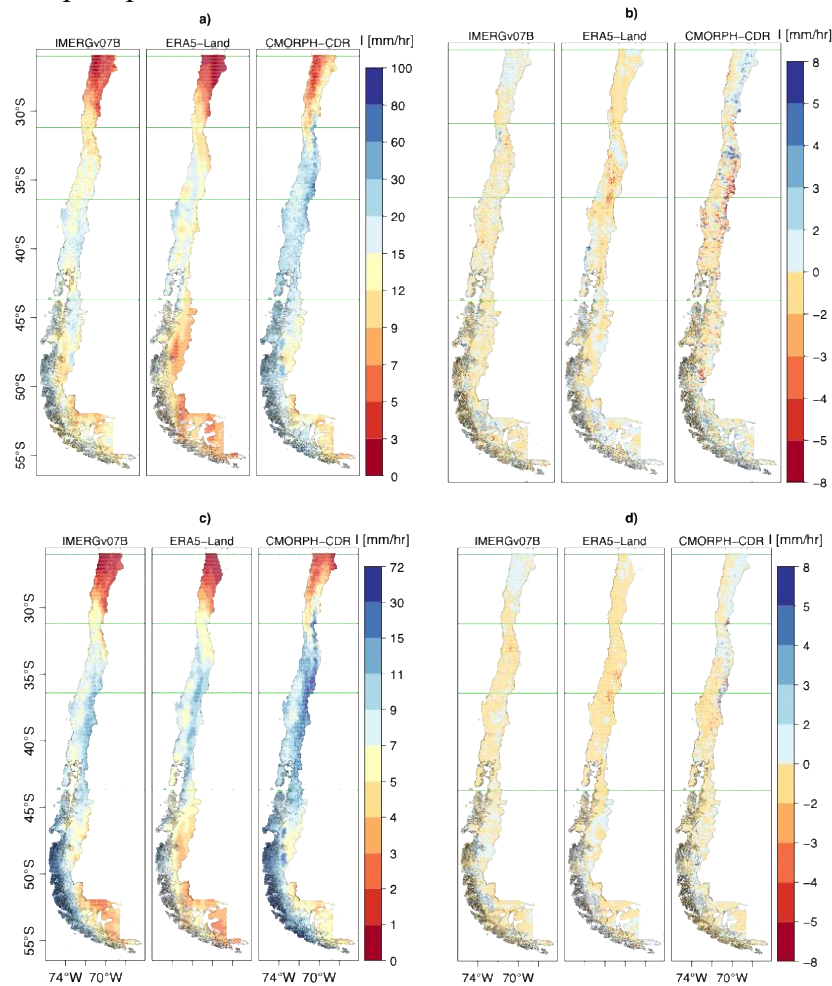


Figura 4 Los paneles a) y c) muestran I_{max} para duraciones de 2 y 12 horas, derivados del modelo estacionario, para T=50. Los paneles b) y d) presentan las diferencias en I_{max} entre los modelos no estacionario y estacionario para las mismas duraciones.

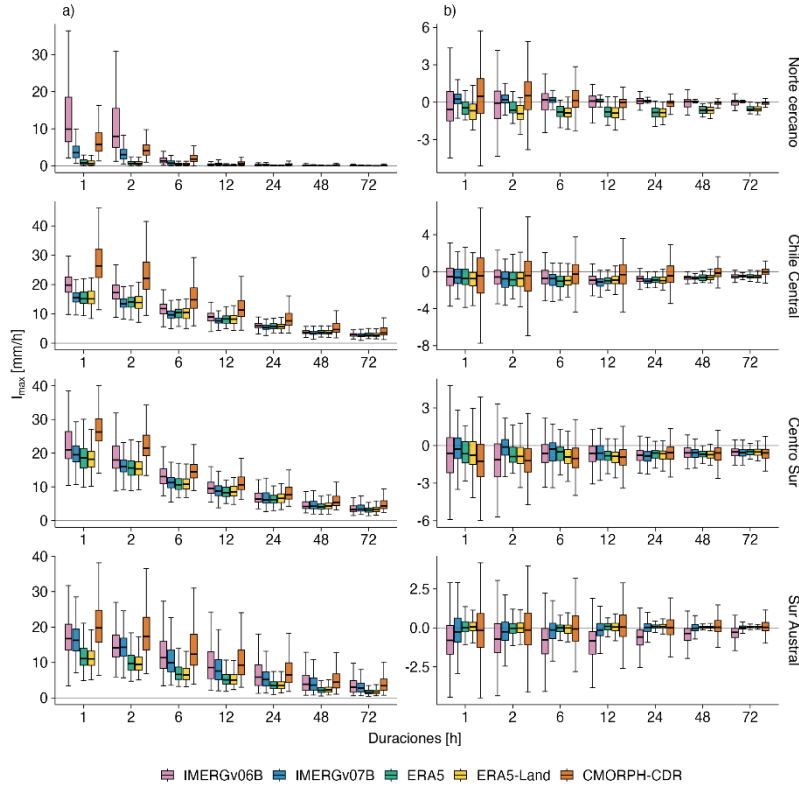


Figura 5 Boxplots de I_{max} para $T=50$ años. El panel (a) muestra los valores derivados de modelos estacionarios, mientras que el panel (b) presenta las diferencias en I_{max} entre modelos no estacionarios y estacionarios

4.5 Impacto de la longitud de datos en I_{max}

Para cada celda de grilla de ERA5 y ERA5-Land calculamos las diferencias entre la I_{max} obtenida con 40 y 20 años de datos usando los enfoques estacionario y no estacionario para períodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años. Para $T = 50$ años, la Figura 6 resume las diferencias en I_{max} obtenidas usando 40 y 20 años de datos (es decir, $I_{max,40años} - I_{max,20años}$). En general, esto muestra diferencias medianas cercanas a 0 mm/h, valores intercuartiles en [-1, 1] mm/h y las diferencias más grandes en [-4, 4] mm/h para todas las duraciones y todas las zonas macro-climáticas.

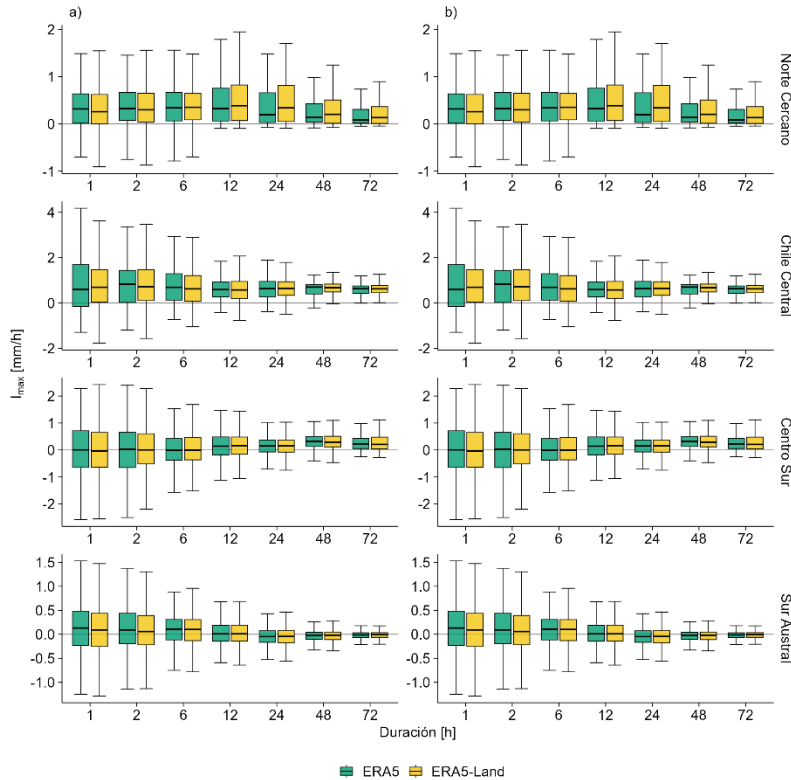


Figura 6 Boxplots de I_{max} para $T=50$ años. El panel (a) muestra las diferencias en I_{max} obtenidas usando 40 y 20 años de datos para un modelo estacionario, mientras que el panel (b) presenta dichas diferencias para un modelo no estacionario.

5. PLATAFORMA CURVAS IDF

Desarrollamos una plataforma web amigable: www.curvasIDF.cl/, en donde los usuarios interesados pueden definir una duración y período de retorno de interés y luego hacer clic en cualquier punto del área de estudio para obtener las curvas IDF correspondientes para todos los conjuntos de datos en grilla utilizados en este trabajo.

5.1 Estructura de plataforma

En la Figura 7 se presenta la plataforma de curvas IDF, la cual está compuesta por:

1. *Panel lateral* de selección de opciones:
 - 1.1 Botón para seleccionar el producto a visualizar en el mapa.
 - 1.2 Botón para definir el enfoque estacionario o no estacionario.
 - 1.3 Selección del periodo de retorno.
 - 1.4 Selección de la duración de las intensidades.
 - 1.5 Selección de productos para visualizarlos en los gráficos 3 y 4.
 - 1.6 Descarga de valores de curvas IDF (considera archivo CSV y figura).
 - 1.7 Descarga de valores de series de intensidades máximas (considera archivo CSV y figura)
2. *Mapa de visualización*: Visualiza las intensidades del producto según la duración, periodo de retorno y enfoque seleccionados. Incluye la leyenda correspondiente del mapa (2.1).

3. *Gráfico de intensidades máximas:* Muestra las intensidades máximas para los productos de precipitación seleccionados.
4. *Gráfico de curvas IDF:* Presenta las curvas IDF para los productos seleccionados, mostrando simultáneamente las condiciones estacionarias y no estacionarias.

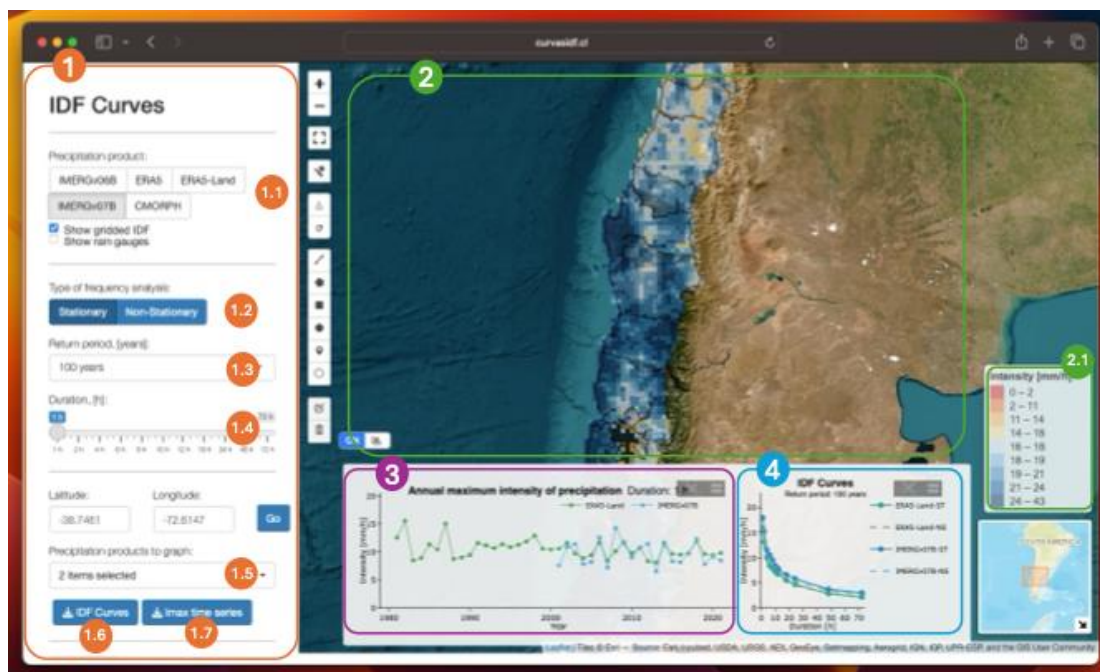


Figura 7 Plataforma www.curvasIDF.cl

5.2 Ejemplo de resultados

En la Figura 8 se muestra un ejemplo de los elementos que se generan al descargar curvas IDF, en primer lugar, se muestra una figura de las curvas IDF, y en segundo lugar se muestra la tabla de curvas IDF, en la primera columna se muestran las duraciones, en siguientes columnas se muestran intensidades máximas para cada producto seleccionado considerando el enfoque estacionario y no estacionario.

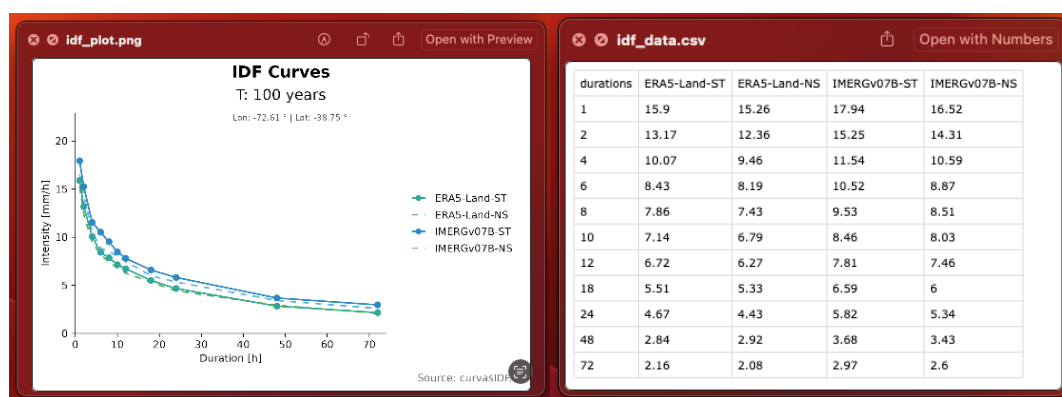


Figura 8 Ejemplo de resultados de la plataforma www.curvasIDF.cl. En la figura la abreviación ST y NS, hacen referencia al enfoque estacionario y no estacionario, respectivamente.

5. CONCLUSIONES

Hasta nuestro conocimiento, este es el primer trabajo comparando intensidades máximas anuales derivadas de modelos estadísticos estacionarios y no estacionarios y de dos familias diferentes de conjuntos de datos de precipitación en grilla de última generación: IMERGv06B/IMERGv07B y ERA5/ERA5-Land. En particular, este es el primer estudio proporcionando curvas de intensidad-duración-frecuencia de alta resolución espacial y temporal usando conjuntos de datos de precipitación en grilla de última generación para Chile continental. Nuestros hallazgos clave se resumen en las siguientes líneas:

- Los sesgos en I_{max} variaron dependiendo del producto de precipitación en grilla, la zona macro-climática y la duración considerada en el análisis. Todos los conjuntos de datos en grilla –excepto CMORPH-CDR– muestran sesgos menores para duraciones más largas. Ambos productos IMERG sobreestiman I_{max} en duraciones más cortas, mientras que ERA5 y ERA5-Land la subestiman.
- Este es el primer estudio mostrando cómo la distribución espacial de I_{max} difiere de la distribución de precipitación media anual en Chile. Mientras que la precipitación media anual aumenta constantemente hacia el sur, I_{max} alcanza sus valores máximos en Chile Centro-Sur.
- Existe un alto gradiente longitudinal en I_{max} , desde los valores bajos en la depresión intermedia hasta los valores altos en los Andes, que aumentan con duraciones mayores. Esto es particularmente relevante para el diseño de infraestructura civil, gestión de aguas pluviales y para evaluación de riesgo de inundaciones en Chile.
- A pesar de diferencias importantes en sus fundamentos técnicos, para todas las duraciones, IMERGv07B coincide estrechamente con ERA5 y ERA5-Land en distribución espacial y valores I_{max} .
- En Chile Central, todos los productos de precipitación mostraron tendencias decrecientes significativas o ausencia de tendencias en I_{max} . Para ERA5 y ERA5-Land, estas tendencias se observaron tanto para 1981–2021 como 2001–2021.
- En general, para todas las duraciones y la mayoría de los conjuntos de datos de precipitación en grilla, los valores I_{max} no estacionarios son ligeramente menores que sus equivalentes estacionarios.
- En futuras investigaciones, si se dispone de registros de mayor resolución temporal (<30 min), se recomienda utilizarlos para evitar la posible subestimación de las I_{max} que puede ocurrir al emplear datos totalizados a escala horaria.

Por último, la plataforma representa es un esfuerzo significativo orientado a facilitar el acceso a herramientas técnicas clave para el diseño de infraestructura resiliente al clima. Al proporcionar curvas IDF actualizadas y de fácil acceso, esta iniciativa apoya tanto a profesionales como a tomadores de decisiones en la gestión efectiva de los impactos del cambio climático sobre los recursos hídricos, promoviendo una planificación más informada y sostenible

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo de los siguientes proyectos: ANID Fondecyt Regular 1212071, ANID-PCI NSFC190018, ANID-Fondecyt Iniciación 11190864, UFRO Beca Postdoctoral VRIP20P001, y ANID-FONDAP 1523A0002. Así como también a la empresa Ingeniería y Consultoría en Aguas (ICASS).

REFERENCIAS

Abarca, R., Olivares, M., y Venegas, T.: Determinación de umbrales críticos de precipitación asociados a impactos para la zona central de Chile, *Revista Stratus*, 2024.

Agilan, V. y Umamahesh, N. V.: Covariate and parameter uncertainty in non-stationary rainfall IDF curve, *International Journal of Climatology*, 38, 365–383, 2018.

Beck, H. E., McVicar, T. R., Vergopolan, N., Berg, A., Lutsko, N. J., Dufour, A., Zeng, Z., Jiang, X., van Dijk, A. I. J. M., y Miralles, D. G.: High-resolution (1 km) Köppen-Geiger maps for 1901-2099 based on constrained CMIP6 projections, *Sci Data*, 10, 724, 2023.

Bernard, M. M.: Formulas for Rainfall Intensities of Long Duration, *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 96, 592–606, 1932.

Boisier, J. P., Alvarez-Garretón, C., Cordero, R. R., Damiani, A., Gallardo, L., Garreaud, R. D., Lambert, F., Ramallo, C., Rojas, M., & Rondanelli, R. (2018). Anthropogenic drying in central-southern Chile evidenced by long-term observations and climate model simulations. *Elementa Science of the Anthropocene*, 6(74).

Beven, K.: Facets of uncertainty: epistemic uncertainty, non-stationarity, likelihood, hypothesis testing, and communication, *Hydrological Sciences Journal*, 61, 1652–1665, 2016.

Chen, F., Wang, R., Liu, P., Yu, L., Feng, Y., Zheng, X., y Gao, J.: Evaluation of GPM IMERG and error sources for tropical cyclone precipitation over eastern China, *Journal of Hydrology*, 627, 130384, 2023.

Chen, S., Hong, Y., Gourley, J. J., Huffman, G. J., Tian, Y., Cao, Q., Yong, B., Kirstetter, P.-E., Hu, J., Hardy, J., Li, Z., Khan, S. I., y Xue, X.: Evaluation of the successive V6 and V7 TRMM multisatellite precipitation analysis over the Continental United States, *Water Resources Research*, 49, 8174, 2013.

Cheng, L., AghaKouchak, A., Gilleland, E., y Katz, R. W.: Non-stationary extreme value analysis in a changing climate, *Climatic Change*, 127, 353–369, 2014.

Chow, V. T., Maidment, D. R., y Mays, L. W.: *Applied Hydrology*, McGraw-Hill, 1988.

Coles, S., Bawa, J., Trenner, L., y Dorazio, P.: *An introduction to statistical modeling of extreme values*, Vol. 208, Springer, 2001.

Dimitriadis, P., Koutsoyiannis, D., y Efstratiadis, A.: Examination of observed and simulated rainfall extremes using stationary models with long-term persistence, *Hydrology*, 8, 59, 2021.

Dong, S., Li, D., y Chen, X.: Assessment of stationary and nonstationary frequency analysis of extreme precipitation, *Journal of Hydrology*, 594, 125005, 2021.

Fadhel, S. y Saleh, M. S.: Exploration of Rain Gauge Quality Issues in Northern England, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 849, 012003, 2021.

Faridzad, M., Yang, T., Hsu, K., Sorooshian, S., y Xiao, C.: Rainfall frequency analysis for ungauged regions using remotely sensed precipitation information, *Journal of Hydrology*, 563, 123–142, 2018.

Fernandez-Palomino, C. A., Hattermann, F. F., Krysanova, V., Lobanova, A., Vega-Jácome, F., Lavado, W., Santini, W., Aybar, C., y Bronstert, A.: A Novel High-Resolution Gridded Precipitation Dataset for Peruvian and Ecuadorian Watersheds: Development and Hydrological Evaluation, *Journal of Hydrometeorology*, 23, 309–336, 2022.

Fowler, H. J., Ali, H., Allan, R. P., Ban, N., Barbero, R., Berg, P., Blenkinsop, S., Cabi, N. S., Chan, S., Dale, M., Dunn, R. J. H., Ekström, M., Evans, J. P., Fosser, G., Golding, B., Guerreiro, S. B., Hegerl, G. C., Kahraman, A., Kendon, E. J., Lenderink, G., Lewis, E., Li, X., O’Gorman, P. A., Orr, H. G., Peat, K. L., Prein, A. F., Pritchard, D., Schär, C., Sharma, A., Stott, P. A., Villalobos-Herrera, R., Villarini, G., Wasko, C., Wehner, M. F., Westra, S., y Whitford, A.: Towards advancing scientific knowledge of climate change impacts on short-duration rainfall extremes, *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 379, 20190542, 2021a.

Garreaud, R. D., Boisier, J. P., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepúlveda, H. H., y Veloso-Aguila, D.: The Central Chile Mega Drought (2010-2018): A climate dynamics perspective, *International Journal of Climatology*, 40, 421–439, 2019.

Gilleland, E. y Katz, R. W.: extRemes 2.0: An Extreme Value Analysis Package in R, *Journal of Statistical Software*, 72, 1–39, 2016.

Garreaud, R. D., Alvarez-Garretón, C., Barichivich, J., Boisier, J. P., Christie, D., Galleguillos, M., LeQuesne, C., McPhee, J., & Zambrano-Bigiarini, M. (2017). The 2010-2015 megadrought in central Chile: impacts on regional hydroclimate and vegetation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21, 6307–6327. <https://doi.org/10.5194/hess-21-6307-2017>.

Hamed, K. H. y Rao, A. R.: A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data, *Journal of Hydrology*, 204, 182–196, 1998.

Haruna, A., Blanchet, J., y Favre, A.: Modeling Intensity-Duration-Frequency Curves for the Whole Range of Non-Zero Precipitation: A Comparison of Models, *Water Resources Research*, 59, 2023.

Hauser, A.: Los aluviones del 18 de Junio de 1991 en Antofagasta: un análisis crítico, a 5 años del desastre, *Boletín N°049*, Sernageomin, 1997.

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Dee, D., y Thépaut, J.: ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present, Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), <https://doi.org/10.24381/cds.adbb2d47>, 2018.

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., Chiara, G., Dahlgren, P., Dee, D., Diamantakis, M., Dragani, R., Flemming, J., Forbes, R., Fuentes, M., Geer, A., Haimberger, L., Healy, S., Hogan, R. J., Holm, E., Janisková, M., Keeley, S., Laloyaux, P., Lopez, P., Lupu, C., Radnoti, G., Rosnay, P., Rozum, I., Vamborg, F., Villaume, S., y Thépaut, J.: The ERA5 global reanalysis, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146, 1999–2049, 2020.

Huffman, G. J., Bolvin, D. T., Braithwaite, D., Hsu, K., Joyce, R., Xie, P., y Yoo, S.-H.: NASA global precipitation measurement (GPM) integrated multi-satellite retrievals for GPM (IMERG), 2015.

Huffman, G. J., Bolvin, D. T., y Nelkin, E. J.: Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM (IMERG). Technical Documentation, 2017.

Huffman, G. J., Bolvin, D. T., Joyce, R., Kelley, O. A., Nelkin, E. J., Tan, J., Watters, D. C., y West, B. J.: Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM (IMERG) Technical Documentation, 2023.

Huffman, G. J., Bolvin, D. T., Joyce, R., Kelley, O. A., Nelkin, E. J., Portier, A., Stocker, E. F., Tan, J., Watters, D. C., y West, B. J.: IMERG V07 Release Notes, 2024.

Koutsoyiannis, D. y Montanari, A.: Negligent killing of scientific concepts: the stationarity case, *Hydrological*

Sciences Journal, 60, 1174–1183, 2015.

Koutsoyiannis, D., Kozonis, D., y Manetas, A.: A mathematical framework for studying rainfall intensity-duration-frequency relationships, *Journal of Hydrology*, 206, 118–135, 1998.

Liu, B., Xu, M., Henderson, M., y Qi, Y.: Observed trends of precipitation amount, frequency, and intensity in China, 1960–2000, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 110, 2005.

Lagos-Zúñiga, M., Mendoza, P. A., Campos, D., & Rondanelli, R. (2024). Trends in seasonal precipitation extremes and associated temperatures along continental Chile. *Climate Dynamics*, 62, 4205–4222.

Martinez-Villalobos, C., & Neelin, J. D. (2023). Regionally high risk increase for precipitation extreme events under global warming. *Scientific Reports*, 13(5579). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-32372-3>.

Milly, P. C. D., Betancourt, J., Falkenmark, M., Hirsch, R. M., Kundzewicz, Z. W., Lettenmaier, D. P., Stouffer, R. J., Dettinger, M. D., y Krysanova, V.: On Critiques of “Stationarity is Dead: Whither Water Management?”, *Water Resources Research*, 51, 7785–7789, 2015.

Montanari, A. y Koutsoyiannis, D.: Modeling and mitigating natural hazards: Stationarity is immortal!, *Water Resources Research*, 50, 9748–9756, 2014.

Moraga, J., Riquelme, C., Cárdenas, D., y Meier, C.: Subestimación de los valores IDF en Chile, XXII Congreso Chileno de Hidráulica, Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica, 2015.

Morbiddelli, R., García-Marín, A. P., Mamun, A. A., Atiqur, R. M., Ayuso-Muñoz, J. L., Taouti, M. B., Baranowski, P., Bellocchi, G., Sangüesa-Pool, C., Bennett, B., Oyunmunkh, B., Bonaccorso, B., Brocca, L., Caloiero, T., Caporali, E., Caracciolo, D., Casas-Castillo, M. C., Catalini, C., Chettih, M., Chowdhury, A. F. M. K., Chowdhury, R., Corradini, C., Custò, J., Dari, J., Diodato, N., Doesken, N., Dumitrescu, A., Estévez, J., Flammini, A., Fowler, H. J., Freni, G., Fusto, F., García-Barrón, L., Manea, A., Goenster-Jordan, S., Hinson, S., Kanecka-Geszke, E., Kar, K. K., Kasperska-Wołowicz, W., Krabbi, M., Krzyszczak, J., Llabrés-Brustenga, A., Ledesma, J. L. J., Liu, T., Lompi, M., Marsico, L., Mascaro, G., Moramarco, T., Newman, N., Orzan, A., Pampaloni, M., Pizarro-Tapia, R., Puentes Torres, A., Rashid, M. M., Rodríguez-Solà, R., Manzor, M. S., Siwek, K., Sousa, A., Timbadiya, P. V., Filippou, T., Vilcea, M. G., Viterbo, F., Yoo, C., Zeri, M., Zittis, G., y Saltalippi, C.: The history of rainfall data time-resolution in a wide variety of geographical areas, *Journal of Hydrology*, 590, 125258, 2020.

Muñoz-Sabater, J.: ERA5-Land hourly data from 1950 to present, Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), 2019.

Muñoz-Sabater, J., Dutra, E., Agustí-Panareda, A., Albergel, C., Arduini, G., Balsamo, G., Boussetta, S., Choulga, M., Harrigan, S., Hersbach, H., Martens, B., Miralles, D. G., Piles, M., Rodríguez-Fernández, N. J., Zsoter, E., Buontempo, C., y Thépaut, J.-N.: ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications, *Earth System Science Data*, 13, 4349–4383, 2021.

Neelin, J. D., Martinez-Villalobos, C., Stechmann, S. N., Ahmed, F., Chen, G., Norris, J. M., Kuo, Y.-H., y Lenderink, G.: Precipitation extremes and water vapor: relationships in current climate and implications for climate change, *Current Climate Change Reports*, 8, 17–33, 2022.

Nychka, D., Furrer, R., Paige, J., y Sain, S.: fields: Tools for spatial data, *r* package version 14.1, 2021.

Ombadi, M., Nguyen, P., Sorooshian, S., y Hsu, K.-I.: Developing Intensity-Duration-Frequency (IDF) Curves From Satellite-Based Precipitation: Methodology and Evaluation, *Water Resources Research*, 54, 7752–7766, 2018.

Ouarda, T. B. M. J., Yousef, L. A., y Charron, C.: Non-stationary intensity-duration-frequency curves

integrating information concerning teleconnections and climate change, *International Journal of Climatology*, 39, 2306–2323, 2019.

Pall, P., Allen, M., y Stone, D. A.: Testing the Clausius–Clapeyron constraint on changes in extreme precipitation under CO₂ warming, *Climate Dynamics*, 28, 351–363, 2007.

Patakamuri, S. K. y O’Brien, N.: *modifiedmk: Modified versions of Mann Kendall and Spearman’s Rho trend tests*, R package version 1.6, 2021.

Pollock, M. D., O’Donnell, G., Quinn, P., Dutton, M., Black, A., Wilkinson, M. E., Colli, M., Stagnaro, M., Lanza, L. G., Lewis, E., Kilsby, C. G., y O’Connell, P. E.: Quantifying and Mitigating Wind-Induced Undercatch in Rainfall Measurements, *Water Resources Research*, 54, 3863–3875, 2018.

Salas, J. D., Obeysekera, J., y Vogel, R. M.: Techniques for assessing water infrastructure for nonstationary extreme events: a review, *Hydrological Sciences Journal*, 63, 325–352, 2018.

Schlef, K. E., Kunkel, K. E., Brown, C., Demissie, Y., Lettenmaier, D. P., Wagner, A., Wigmosta, M. S., Karl, T. R., Easterling, D. R., Wang, K. J., François, B., y Yan, E.: Incorporating non-stationarity from climate change into rainfall frequency and intensity-duration-frequency (IDF) curves, *Journal of Hydrology*, 616, 128757, 2023.

Serinaldi, F.: Dismissing return periods!, *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 29, 1179–1189, 2015.

Serinaldi, F. y Kilsby, C. G.: Stationarity is undead: Uncertainty dominates the distribution of extremes, *Advances in Water Resources*, 77, 17–36, 2015.

Serrano-Notivol, R., Beguería, S., Saz, M. A., y de Luis, M.: Recent trends reveal decreasing intensity of daily precipitation in Spain, *International Journal of Climatology*, 38, 4211–4224, 2018.

Sherman, C. W.: Frequency and Intensity of Excessive Rainfalls at Boston, Massachusetts, *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 95, 951–960, 1931.

Silva, D. F., Simonovic, S. P., Schardong, A., y Goldenfum, J. A.: Assessment of non-stationary IDF curves under a changing climate: Case study of different climatic zones in Canada, *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 36, 100870, 2021.

Soto, X. y Mier, C.: Subestimación de los valores IDF en Concepción. 1: Derivación completa y comparación con otras metodologías, *XXI Congreso Chileno de Hidráulica*, 2013a.

Soto, X. y Mier, C.: Subestimación de los valores IDF en Concepción. 2: Posibles causas del sesgo, *XXI Congreso Chileno de Hidráulica*, 2013b.

Sun, Y., Wendi, D., Kim, D. E., y Liong, S.-Y.: Deriving intensity-duration-frequency (IDF) curves using downscaled in situ rainfall assimilated with remote sensing data, *Geoscience Letters*, 6, 17, 2019.

Tan, J., Huffman, G. J., Bolvin, D. T., Nelkin, E., y Joyce, R.: Major Changes to the IMERG Algorithm from V06 to V07, *AGU Fall Meeting Abstracts*, vol. 2022, 2022.

Utsumi, N., Seto, S., Kanae, S., Maeda, E. E., y Oki, T.: Does higher surface temperature intensify extreme precipitation?, *Geophysical Research Letters*, 38, L16708, 2011.

Vargas, G., Ortlieb, L., y Rutllant, J.: Historic mudflows in Antofagasta, Chile, and their relationship to the El Niño/Southern Oscillation events, *Revista geológica de Chile*, 27, 157–176, 2000.

Venkatesh, K., Maheswaran, R., y Devacharan, J.: Framework for developing IDF curves using satellite precipitation: a case study using GPM-IMERG V6 data, *Earth Science Informatics*, 15, 671–687, 2022.

Vinnarasi, R. y Dhanya, C. T.: Time-varying Intensity-Duration-Frequency relationship through climate-informed covariates, *Journal of Hydrology*, 604, 127178, 2022.

Ward, E., Buytaert, W., Peaver, L., y Wheeler, H.: Evaluation of precipitation products over complex mountainous terrain: A water resources perspective, *Advances in Water Resources*, 34, 1222–1231, 2011.

Wood, S. J., Jones, D. A., y Moore, R. J.: Accuracy of rainfall measurement for scales of hydrological interest, *Hydrology and Earth System Sciences*, 4, 531–543, 2000.

Xie, P., Joyce, R., Wu, S., Yoo, S.-H., Yarosh, Y., Sun, F., y Lin, R.: Reprocessed, Bias-Corrected CMORPH Global High-Resolution Precipitation Estimates from 1998, *Journal of Hydrometeorology*, 18, 1617–1641, 2017.

Xie, P., Joyce, R., Wu, S., Yoo, S., Yarosh, Y., Sun, F., Lin, R., y NOAA CDR Program: NOAA Climate Data Record (CDR) of CPC Morphing Technique (CMORPH) High Resolution Global Precipitation Estimates, Version 1, 2018.

Yan, L., Xiong, L., Jiang, C., Zhang, M., Wang, D., y Xu, C.: Updating intensity-duration-frequency curves for urban infrastructure design under a changing environment, *WIREs Water*, 8, 2021.

Yilmaz, A. G., Hossain, I., y Perera, B. J. C.: Effect of climate change and variability on extreme rainfall intensity–frequency–duration relationships: a case study of Melbourne, *Hydrology and Earth System Sciences*, 18, 4065–4076, 2014.

Yilmaz, A. G. y Perera, B. J. C.: Extreme Rainfall Nonstationarity Investigation and Intensity–Frequency–Duration Relationship, *Journal of Hydrologic Engineering*, 19, 1160–1172, 2014.

Zambrano-Bigiarini, M. y Bernal Vallejos, S.: A new software for spatio-temporal analysis of gridded data sources, EGU General Assembly 2023, Vienna, Austria, 24–28 Apr 2023, EGU23-16978, 2023.

Zambrano-Bigiarini, M., Nauditt, A., Birkel, C., Verbist, K., y Ribbe, L.: Temporal and spatial evaluation of satellite-based rainfall estimates across the complex topographical and climatic gradients of Chile, *Hydrology and Earth System Sciences*, 21, 1295–1320, 2017.