

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXVII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**DISTRIBUCIONES DE PRECIPITACIÓN PARA EL DISEÑO HIDROLÓGICO EN
CHILE CONTINENTAL**

EDUARDO MUÑOZ-CASTRO¹²³⁴
TOMÁS I. GÓMEZ⁵
XIMENA VARGAS¹⁶

RESUMEN

El método del hidrograma unitario sintético, así como otros métodos indirectos precipitación-esorrentía, es ampliamente utilizado para estimar el hidrograma de crecida pluvial que será la base del dimensionamiento y verificación de una determinada obra hidráulica. Para ello, además de contar con descriptores de los eventos de precipitación (e.g., área pluvial, condiciones antecedentes de humedad, magnitud de precipitación, etc.), se requiere distribuir la precipitación en la duración deseada. En el contexto nacional, se recomiendan el uso de las distribuciones de precipitación (hietogramas de diseño) propuestas por Benítez o Varas, formuladas hace ya más de 40 años. Incluso, su aplicación ha sido extrapolada a duraciones y regiones fuera del alcance inicial y, por ende, su aplicabilidad resulta incierta. El presente trabajo realiza una actualización y extiende distribuciones de precipitación a nivel horario para el diseño hidrológico en Chile, por medio de las distribuciones horarias derivadas del reanálisis atmosférico ERA5, las cuales se contrastan con registros in-situ en el territorio nacional para evaluar su representatividad del clima local. Los resultados muestran un adecuado desempeño de las distribuciones propuestas y destacan que, si bien pueden ser transferidas espacialmente, no pueden ser extrapoladas a duraciones mayores que aquellas para las cuales fueron estimadas. En base a esto, se crea una base de datos abierta y de libre acceso orientada a guiar el diseño hidrológico en Chile, que extiende los trabajos anteriores a duraciones críticas no calculadas previamente y que son consideradas habitualmente en el diseño de obras, tales como 24h, 48h y 72h.

¹ Dpto. de Ingeniería Civil, Universidad de Chile, Santiago, Chile – email: edualbertofdo@gmail.com

² WSL Institute for Snow and Avalanche Research SLF, Davos Dorf, Switzerland

³ Climate Change, Extremes and Natural Hazards in Alpine Regions Research Center CERC, Davos Dorf, Switzerland

⁴ Institute for Atmospheric and Climate Science, ETH Zurich, Zurich, Switzerland

⁵ Meteodata Ltda, Santiago, Chile

⁶ IECOM Ltda., Santiago, Chile

1 INTRODUCCIÓN

La estimación de crecidas pluviales mediante métodos indirectos precipitación-escorrentía como el hidrograma unitario sintético requiere, además de la estimación de ciertos descriptores geomorfológicos de la red de drenaje (e.g., pendiente media, rango de elevación, largo del cauce principal, etc.), la caracterización de los eventos extremos de precipitación (e.g., magnitud de precipitación por periodo de retorno, capacidad de infiltración, posición de la línea de nieve, condiciones antecedentes de humedad, etc.). En particular, para métodos como el hidrograma unitario sintético, donde el objetivo es estimar el hidrograma de crecida, se debe definir la distribución temporal de ellos, según la cual se va a desagregar la precipitación en pulsos que servirán de insumo para la implementación del método.

Diferentes autores han propuesto ciertas distribuciones de precipitación orientadas al diseño hidrológico, también referidas en la literatura como hietogramas de diseño, basados en supuestos de distribuciones centradas (e.g., bloques alternados; Chow et al., 1994; distribución centrada de ENDESA; Benítez y Verni, 1985) o estimadas a partir registros in-situ de precipitación intradiaria. Por ejemplo, en el contexto nacional, Espíldora y Echavarría (1979) proponen hietogramas para distintas duraciones a partir de registros pluviográficos de Santiago. A partir de ellos, los autores derivan las condiciones de precipitación antecedente y proponen una caracterización probabilística de los eventos. Benítez y Verni (1985) definieron cinco distribuciones de tormenta a partir del análisis de 101 tormentas con duraciones, en su mayoría, entre 12 y 24 hrs. Por su parte, Varas (1985) analiza tormentas entre 4 y 12 hrs para determinar cuatro tipos de distribución de precipitación con tres subniveles cada una (i.e., en total 12). En ambos casos, las distribuciones propuestas buscan representar casos donde (i) la mayor parte de la precipitación ocurre al inicio del evento (i.e., donde se tiene un mayor efecto regulador de la cuenca), (ii) la precipitación se distribuye de manera más uniforme y centrada y (iii) la mayor parte de la precipitación ocurre al final del evento (i.e., donde la cuenca ya se encuentra en crecida y tiene una menor capacidad de regulación). Sin embargo, estas distribuciones fueron estimadas a partir de registros de estaciones ubicadas en la zona centro-sur del país, considerando tormentas, en su mayoría, menores a 24 hrs, y en un periodo climático diferente. En consecuencia, resulta necesario actualizar dichas distribuciones, así como mejorar nuestra comprensión sobre la transferibilidad espacial y temporal de ellas.

Estudios recientes han explorado diferentes metodologías para estimar distribuciones de precipitación para el diseño hidrológico. Por ejemplo, DOH (2020) utiliza ERA5 (Hersbach et al., 2020) para desagregar la precipitación diaria de CR2Met (Boisier et al., 2018) e identificar las distribuciones de precipitación asociadas a los eventos de máxima precipitación en 24, 48 y 72 h. De manera similar, MOP (2022) analiza las distribuciones horarias normalizadas para eventos de máximas precipitaciones en bloques efectivos de 3, 6, 12 y 24 horas en quebradas afluentes a la zona urbana de Antofagasta. Allí, todas las distribuciones normalizadas son combinadas, independiente de su duración, para identificar una envolvente superior e inferior, la distribución asociada al promedio y un caso intermedio entre cada envolvente y el promedio (i.e., 5 distribuciones en total). En DGOP (2023) y PNUD (2025) se utilizan las distribuciones horarias derivadas de los eventos de máxima precipitación en 24 h para, replicando la metodología propuesta por Huff (1967), para definir cuatro tipos de hietogramas de diseño con tres subniveles cada una. A pesar de los esfuerzos,

en general, no se realiza una evaluación en comparación a registros in-situ, por lo que se desconoce cuán representativas son de los patrones de distribución temporal de los eventos de precipitación extrema en las zonas y de las duraciones para las que fueron estimadas.

Entendiendo la necesidad de contar con hietogramas de diseño que sean representativos para el territorio nacional, el presente trabajo tiene por objetivo: (i) generar distribuciones de precipitación extrema en 6, 12, 24, 48, y 72 hrs orientadas al diseño hidrológico en Chile continental, (ii) evaluar diferencias entre distribuciones asociadas a diferentes duraciones, y (iii) evaluar su representatividad respecto a observaciones in-situ. Para ello, se utilizan las distribuciones de precipitación horarias derivadas del reanálisis atmosférico ERA5 (Hersbach et al., 2020), los registros horarios obtenidos de estaciones meteorológicas a lo largo de todo Chile, y la metodología de agrupación de tormentas propuesta por Huff (1967). Para facilitar su transferencia y promover su uso, la base de datos generada en el contexto de la presente investigación puede ser descargada de manera libre y gratuita a través de la plataforma Zenodo (Muñoz-Castro et al., 2025; <https://doi.org/10.5281/zenodo.14888350>).

2 ZONA DE ESTUDIO Y METODOLOGÍA

La metodología para la estimación de la distribución temporal de precipitaciones extremas (precipitaciones de diseño) se aplica en Chile Continental, entre los paralelos 17°S y 57°S. En sus cerca de 4.200 km de longitud, se desarrollan diferentes condiciones hidroclimáticas (e.g., Vásquez et al., 2020; Álvarez-Garretón et al., 2018), las cuales traen consigo diversos desafíos, entre los cuales se encuentra el diseño hidrológico.

En el territorio nacional existen distintos mecanismos de precipitación. En el sector norte, ocurren tormentas convectivas concentradas en pocas horas durante el periodo estival (Houston et al, 2006), mientras que hacia la zona centro-sur, se tienen eventos de corta duración, pero intensas precipitaciones asociados a bajas segregadas (Muñoz & Schultz, 2021) y, más frecuentemente, tormentas asociadas a sistemas frontales de baja presión (Falvey & Garreud, 2007). Estos frentes pueden generar tormentas de varios días la zona centro-sur y austral, en especial cuando se complementan con la ocurrencia de eventos de Ríos Atmosféricos (RA; Viale et al, 2017), largas plumas de vapor de agua provenientes de la zona ecuatorial. Estos eventos, al proveer una mayor cantidad de agua precipitable, generan eventos de precipitación más intensos, generando precipitaciones diarias y horarias medianas entre 2 y 3 veces mayores que otras tormentas sin RA, y donde aproximadamente la mitad de los eventos con tasas de precipitación más altas ocurren bajo condiciones de RA.

Las condiciones mencionadas dan cuenta del desafío que conlleva la diversidad hidroclimática de Chile, así como también la necesidad de caracterizar la singularidad de los eventos de precipitaciones extremas a lo largo del país. A continuación, se presenta la metodología propuesta para realizar dicha caracterización orientada al diseño hidrológico.

2.1 Estimación de distribuciones de precipitación

Las distribuciones de precipitación se estiman a partir de la propuesta metodológica de Huff (1967), similar a lo realizado por Varas (1985). En dicha metodología, se agrupan tormentas

según el cuarto de duración donde concentran la mayor precipitación acumulada y luego se analizan estadísticamente para obtener distribuciones escaladas según la precipitación total acumulada (i.e., valores entre 0 y 1). Así, se realiza una clasificación según cuatro tipos de distribuciones de acuerdo a donde se concentra la mayor fracción de precipitación: Tipo I, en el primer cuarto (temprana); Tipo II, en el segundo cuarto (centrada-temprana); Tipo III en el tercer cuarto (centrada-tardía); y Tipo IV en el último cuarto de duración (tardía).

Para caracterizar las distribuciones de precipitación de diseño representativas de la zona de interés, se utilizan las series horarias derivadas del reanálisis atmosférico ERA5 (Hersbach et al., 2020). En el periodo 1959-2024, se analizan las precipitaciones en bloques de 6, 12, 24, 48 y 72 hrs, para extraer la serie de excedencias anuales por duración y, con ello, las distribuciones de precipitación asociada a los eventos más extremos. Notar que, si bien en el presente trabajo se utiliza ERA5 como base, en caso de contar con un producto de precipitaciones espacialmente distribuido con una mejor resolución espaciotemporal y desempeño en comparación a registros locales, la metodología puede ser replicada.

2.2 Agrupación de precipitaciones de diseño

Considerando la orientación hacia el diseño hidrológico, resulta poco práctico definir distribuciones de precipitación a la escala espacial del reanálisis que se usa como base - aproximadamente $25 \times 25 \text{ km}^2$ - pues esto dificulta su aplicabilidad de forma directa. En consecuencia, se agrupan (o clusterizan) las distribuciones para diferentes duraciones según dos enfoques: 1) división administrativa (i.e., por región); 2) identificación de zonas homogéneas en términos de características promedio de los eventos de precipitación extrema. Para este último caso, se utiliza el algoritmo K-means (Hartigan y Wong, 1979) para agrupar píxeles considerando su ubicación geográfica, la máxima precipitación en bloques de 6, 12, 24, 48 y 72 hrs promedio en el periodo 1959-2024, y la recurrencia de los tipos de distribución de precipitación para dichas duraciones. La determinación del número óptimo de clases o clústeres se realiza a partir del método “Gap statistic” (Tibshirani et al., 2001).

2.3 Evaluación de las distribuciones de precipitación

2.3.1 Evaluación de transferibilidad entre duraciones y grupos

Considerando que se busca determinar si las distribuciones de precipitación son diferentes para diferentes duraciones y grupos (i.e., regiones y clusters), utilizamos la prueba estadística de Kolmogorov-Smirnov (K-S; Marsaglia et al., 2003; Reschenhofer, 1997), la cual permite analizar si dos muestras provienen de la misma distribución y, manera complementaria, estimamos la distancia de Wasserstein (Vaserstein, 1969; Villiarini, 2003) de primer orden para cuantificar la diferencia. Para facilitar la interpretación de la distancia de Wasserstein, se escala su valor respecto a la desviación estándar promedio de las series comparadas.

2.3.2 Desempeño respecto a registros locales de precipitaciones extremas

Para evaluar el desempeño de las distribuciones de precipitación propuestas, se comparan, a través del test de Kolmogorov-Smirnov y distancia de Wasserstein, con distribuciones estimadas utilizando registros in-situ. Para ello, se utiliza la base de datos del Visualizador

Meteorológico (VisMet, <https://vismet.cr2.cl/>), que cuenta con registros de precipitación horarios en más de 1000 estaciones operadas por distintas instituciones (DGA, DMC, entre otras), desde aproximadamente el año 2002 hasta la actualidad. La Figura 1 muestra las estaciones seleccionadas para el análisis según la completitud de sus registros (mín. 10 años).

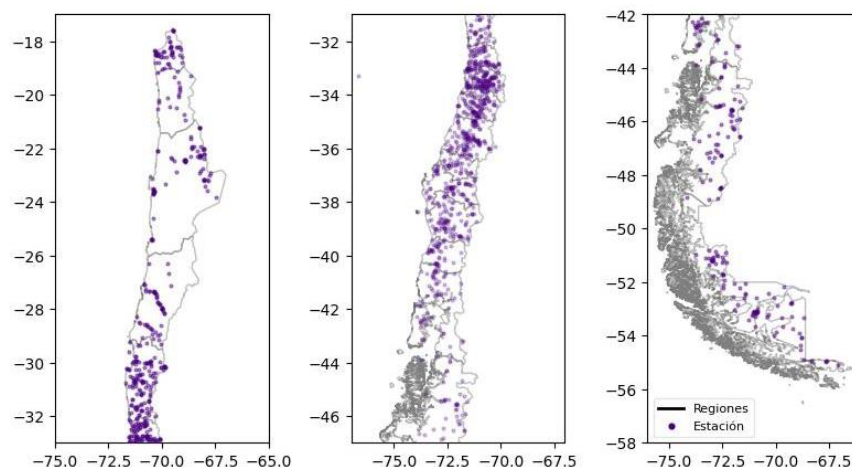


Figura 1: Estaciones con registros horarios consideradas para la evaluación (N = 1254).

A modo de ejemplo, la Figura 2 muestra la comparación de las distribuciones de precipitación propuestas para una duración de 24h (líneas más gruesas) respecto a los registros de las estaciones (líneas más delgadas) que se encuentran ubicadas dentro de la zona geográfica en revisión durante los eventos de precipitación extrema. A dichas distribuciones por evento se les aplica la metodología descrita en el acápite 2.2 para luego realizar la evaluación.

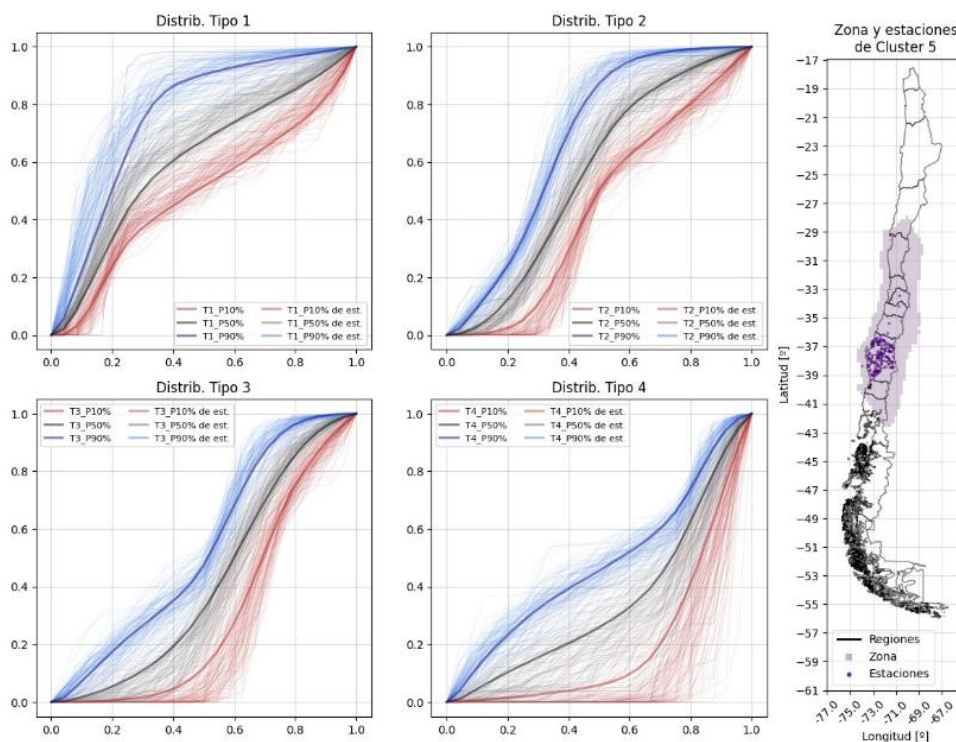


Figura 2: Ejemplo de la verificación de distribuciones de tormenta para el clúster 5.

3 RESULTADOS

3.1 Precipitaciones de diseño agrupadas según divisiones administrativas

Para estudiar si existe algún tipo de distribución de precipitación predominante y su dependencia con la duración de interés, la Figura 3a muestra la recurrencia de los tipos de distribución en cuatro regiones y cinco duraciones diferentes. Se observa que, de manera similar para las cuatro regiones consideradas, a medida que aumenta la duración (e.g., 48 y 72h), aumenta de manera progresiva la recurrencia de distribuciones Tipo I y IV (i.e., temprana y tardía). Para distribuciones iguales o menores a 24h, las distribuciones centradas son, en conjunto, las más recurrentes. Esto se extiende a todas las regiones del territorio nacional, según se muestra en la Figura 3b, donde se describe de manera agregada la recurrencia de las diferentes distribuciones y duraciones.

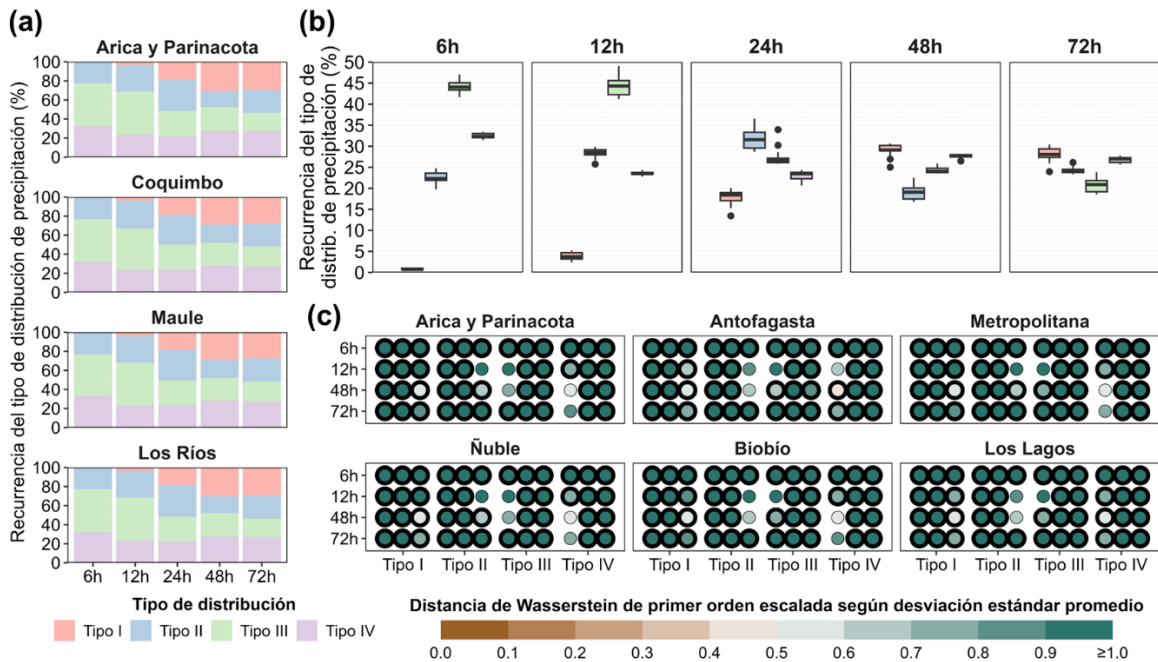


Figura 3: Comparación entre distribuciones de precipitación. (a) Ejemplo de recurrencia de tipos de distribución de precipitación en cuatro regiones representativas de los distintos climas en Chile, (b) recurrencia de distribuciones de precipitación agregada para Chile continental, (c) ejemplo de transferibilidad de distribución de precipitación de 24h a otras duraciones. En (c), cada distribución cuenta con tres círculos que representan los percentiles 10, 50 y 90, y el espesor de línea indica diferencias estadísticamente significativas.

La baja dispersión entre regiones, identificada por el tamaño de las cajas, permite entrever que existe una coherencia espacial en la recurrencia del tipo de distribuciones. Adicionalmente, se observa que la distribución Tipo IV muestra una recurrencia similar entre duraciones (~25-30%), la cuál puede definir una condición más desfavorable en el contexto del diseño hidrológico. Lo anterior, considerando la influencia que puede tener dicha distribución en la capacidad de regulación de la cuenca (e.g., menor capacidad de infiltración producto de una mayor saturación). En consecuencia, resulta recomendable sensibilizar, e.g., los caudales de crecida a distribuciones desfavorables como la Tipo IV.

Para analizar la transferibilidad de las distribuciones a duraciones diferentes para las cuales fueron desarrolladas, práctica frecuentemente adoptada en el contexto nacional, la Figura 3c muestra cuán representativa es una distribución estimada para una duración de 24 horas cuando se utiliza para distribuir la precipitación en 6h, 12h, 48h y 72h. Los resultados muestran que existen diferencias estadísticamente significativas y sustanciales en términos de magnitud, con valores de distancia de Wasserstein superiores a 0,5. Esto resulta coherente para todas las regiones. Notar que, para cada región, la comparación se realiza para configuraciones similares entre la duración de referencia y la alternativa (i.e., distribución Tipo I, percentil 10%, para 24 hrs comparado con el análogo de duración, e.g., 48 hrs).

Se evalúa la transferibilidad espacial de las distribuciones entre regiones comparando, para cada duración, las distribuciones calculadas para cada una. Para la duración 24 horas, no se encuentran diferencias estadísticamente significativas (no presentado), pero para duraciones menores y mayores, se pueden observar algunas diferencias entre las distribuciones de precipitación estimadas por región. La Figura 4 muestra la comparación de distribuciones para tormentas de 72h. Allí, si bien existen algunos casos en que las distribuciones son similares entre regiones (e.g., Tipo I – P10%), existen otros casos donde se tienen diferencias estadísticamente significativas (e.g., Tipo IV – P50%). En general, los casos más extremos de los tipos de distribuciones (i.e., Tipo I – P90% y Tipo IV – P10%) son los que reportan las diferencias más evidentes, donde regiones como Arica y Parinacota, Antofagasta, y Magallanes, se diferencian del resto del conjunto, mostrando que los eventos se concentran principalmente en menos del 20% de la duración total del evento (i.e., ~14 hrs). Esto resulta coherente con las características de dicho dominio, donde, dadas las condiciones sinópticas que generan las tormentas, en general las precipitaciones no se extienden por varios días.

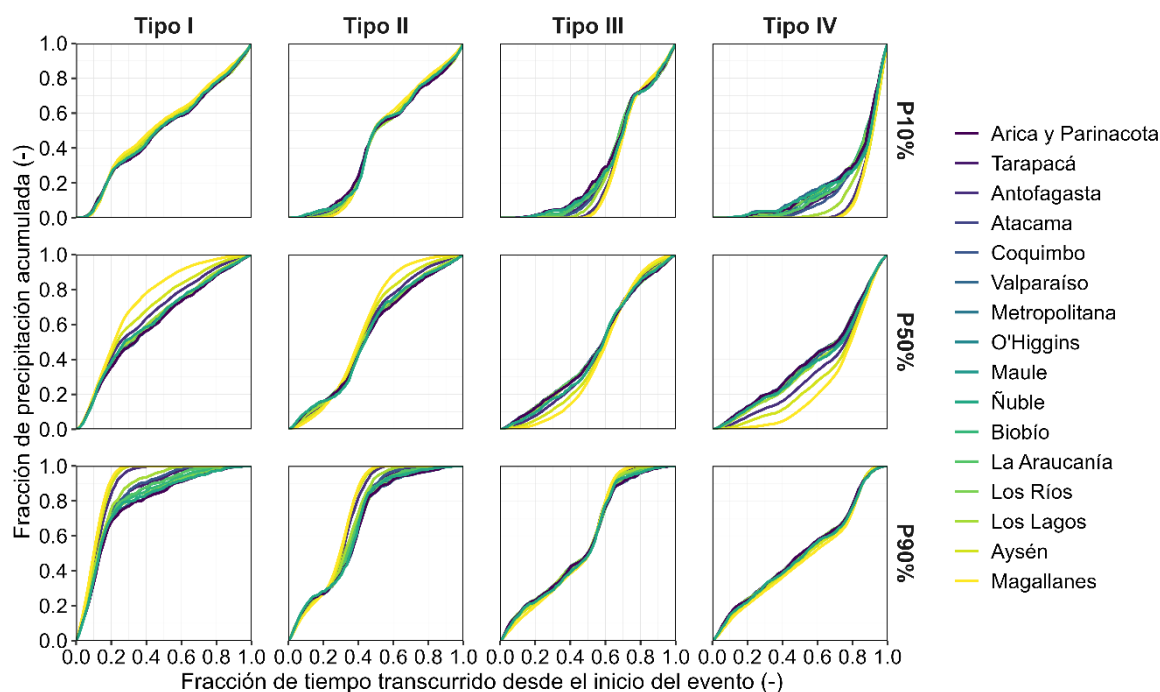


Figura 4: Transferibilidad espacial de distribuciones de precipitación. Ejemplo del análisis realizado a las distribuciones de precipitación de 72 horas de duración.

3.2 Precipitaciones de diseño agrupadas según atributos promedio de tormentas

A partir de la implementación del algoritmo de K-means y el procesamiento de sus resultados (mayor detalle en sección 2.2), se identifican 8 clúster (Figura 5a). A diferencia de la agrupación por regiones, el dominio de estudio se extiende más allá de los límites político-administrativos de Chile con el objetivo de mejorar la clasificación. Los resultados obtenidos a partir del análisis de los clústeres son coherentes a los anteriores. Se verifica que: (i) las distribuciones centradas son más recurrentes en comparación a las distribuciones temprana y tardía (i.e., Tipo I y Tipo IV respectivamente, Figura 5b), (ii) a medida que aumenta la duración las distribuciones tienden a uniformizar su recurrencia (Figura 5b-c), (iii) existe una baja dispersión entre clústeres (Figura 5c), y (iv) las distribuciones de 6h, 12h, 48h y 72h son estadísticamente diferentes a la de 24h (i.e., no transferible; Figura 5d).

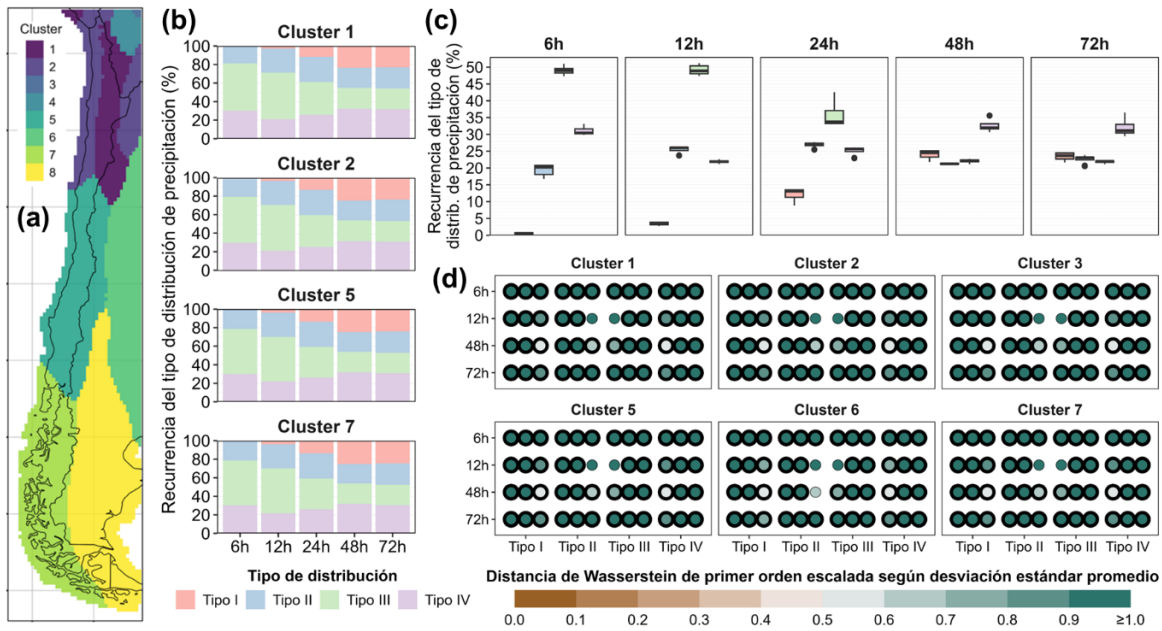


Figura 5: Comparación entre distribuciones de precipitación según clúster obtenidos con K-means. (a) Distribución espacial de clusters, (b) recurrencia de tipos de distribución de precipitación en cuatro clusters, (c) recurrencia de distribuciones de precipitación agregada, (d) transferibilidad de la distribución de precipitación de 24h a otras duraciones. En (c), cada tipo de distribución cuenta con tres círculos asociados a los percentiles 10, 50 y 90, mientras que el espesor de línea indica diferencias estadísticamente significativas entre las series.

Para identificar las diferencias y similitudes entre los clústeres y la agrupación por regiones político-administrativa, se analiza la máxima precipitación en 24h anual promedio en el periodo 1959-2024 (Figura 6) por píxel, los cuales son agrupados por región y clúster. Allí se observa que la agrupación por regiones puede contener píxeles con diferentes propiedades estadísticas, lo cual queda en evidencia con las diferencias en promedios para clústeres contenidos por algunas de (e.g., Antofagasta, Magallanes). Asimismo, de la figura se desprende que, si bien los clústeres comparten, por construcción, ciertas características, también presentan diferencias entre ellos. Específicamente, para el clúster 5, este se asocia a píxeles presentes en 11 regiones del país (Atacama-Los Lagos), a pesar de que los valores de máxima precipitación en 24h anual promedio son evidentemente diferentes (e.g., medianas

varían entre ~50-100 mm). En consecuencia, la clusterización puede mejorar la representación de zonas que comparten ciertas características. Sin embargo, se debe encontrar un buen compromiso entre el número de clústeres y su capacidad de capturar las características de interés. Este estudio apunta a caracterizar distribuciones de precipitaciones extremas y, en la Figura 5a, se puede verificar que se logran identificar zonas que comparten características propias de los eventos de precipitación que allí ocurren (e.g., clúster 1, precipitaciones altiplánicas; clúster 5, precipitaciones asociadas a sistemas frontales).

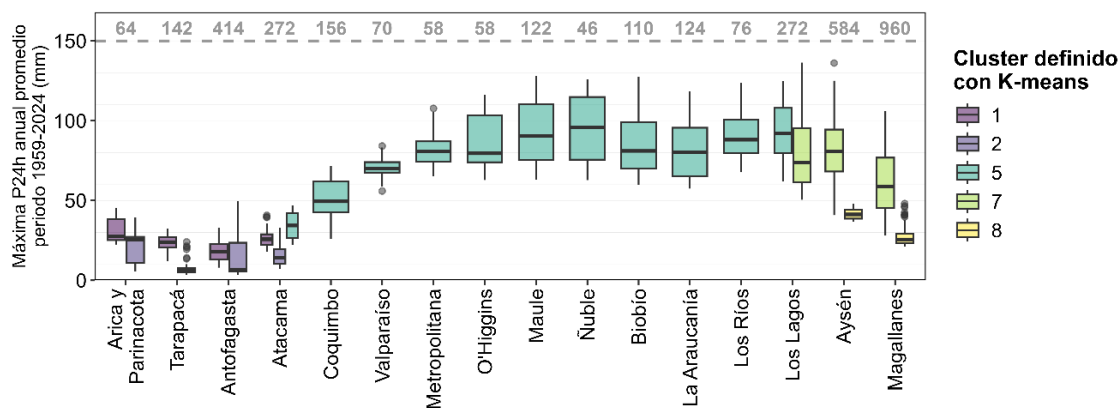


Figura 6: Máxima P24h anual promedio en el periodo 1959-2024 en píxeles ERA5 agrupados por región y clústeres. En color gris se indica el número de píxeles contenido en la región.

3.3 Evaluación de la representatividad de las precipitaciones de diseño

A partir de la agrupación por regiones, se evalúa la representatividad de las distribuciones de precipitación propuestas para el diseño hidrológico respecto a las distribuciones determinadas a partir de registros in-situ (Figura 7).

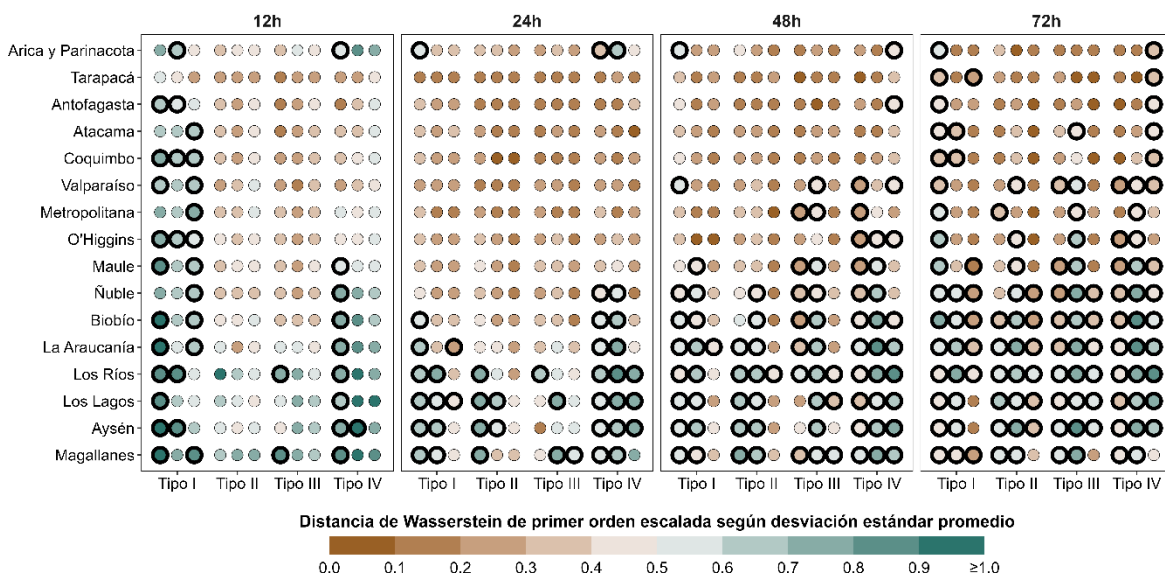


Figura 7: Evaluación de distribuciones de tormenta. Cada distribución tiene tres círculos asociados a los percentiles 10, 50 y 90, mientras que el espesor de línea indica diferencias estadísticamente significativas entre las series.

Los resultados presentados en la Figura 7 muestran que, en general, las distribuciones propuestas logran replicar las distribuciones observadas, sobre toda para precipitaciones de 24h. Para duraciones de 48 y 72h se observan diferencias más significativas, las cuales se acentúan hacia la zona sur-austral. Algunas de estas diferencias pueden ser explicadas, más allá de la naturaleza de las series empleadas para la construcción de las distribuciones (i.e., reanálisis vs observaciones), por las diferencias en los periodos con registros disponibles y la heterogeneidad en la ubicación de las estaciones. Adicionalmente, diferencias en la precipitación traza (definida en 0,1 mm) puede suavizar las distribuciones obtenidas mediante el análisis de las distribuciones intradiarias de ERA5.

A modo de ejemplo, la Figura 8 compara las distribuciones derivadas de las observaciones y las estimadas a partir de ERA5 para el percentil 50 por región. Allí se puede ver que, en varios casos, el nivel de acuerdo entre las series comparadas es alto (e.g., Ñuble, BíoBío) y las diferencias son sutiles. Sin embargo, algunas distribuciones muestran diferencias evidentes respecto a las derivadas de las observaciones. Esto se evidencia principalmente en las distribuciones tempranas y tardías (i.e., Tipo I y IV; e.g., Antofagasta, Magallanes).

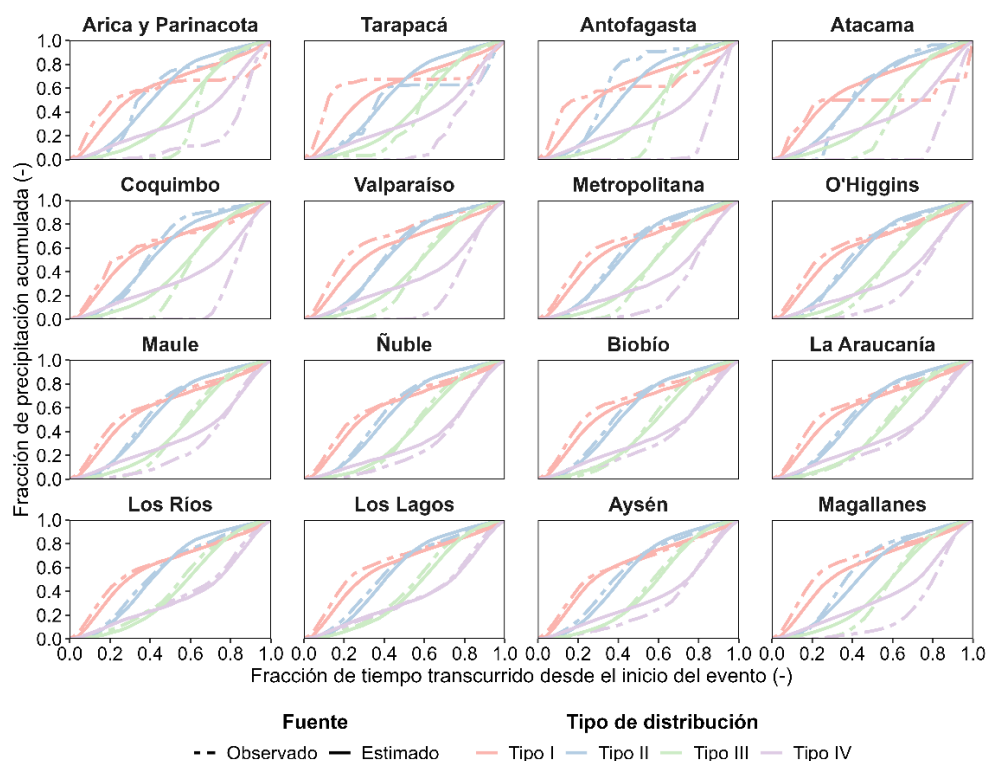


Figura 8: Comparación de distribuciones de precipitación estimadas a partir de observaciones y datos del reanálisis ERA5 para el percentil 50.

4 DISCUSIÓN

Los análisis realizados demuestran que existen diferencias estadísticamente significativas cuando se comparan, por ejemplo, distribuciones de precipitación de 24h y 48h, independiente de la zona de estudio (Figura 3c y Figura 5d). Sin embargo, la mayor parte de

los estudios previos analiza las distribuciones de precipitación de manera agregada (i.e., sin diferenciar entre diferentes duraciones) y con tamaños de muestra diferentes para cada una de las duraciones. Benítez y Verni (1985) consideran en su mayoría eventos de precipitación de 12h y 24h (22 y 32% respectivamente), con tan solo un ~15% asociado a duraciones mayores. Varas analiza eventos de precipitación con duraciones menores a 12 horas y continuos. Tanto Benítez y Verni (1985) como Varas (1985) consideran información representativa sólo de la zona centro-sur y los eventos utilizados para sus análisis no corresponden directamente a eventos extremos de precipitación. En consecuencia, el presente estudio permite definir hietogramas de diseño actualizados orientados a caracterizar eventos extremos de precipitación considerando una muestra estadística más representativa que la empleada por estudios previos y una verificación del desempeño respecto a registros in-situ.

Nuestros resultados muestran que, en general, para eventos de duración de 24h, existe una asociación entre regiones del territorio nacional asociados principalmente a los mecanismos sinópticos que generan precipitación y su magnitud: eventos convectivos/invierno altiplánico en el sector norte, con distintas magnitudes (clústeres 1 y 2); sistemas frontales de baja presión en el centro-sur y la Patagonia norte, con distintas intensidades de precipitación debido a la disponibilidad de agua precipitable y la frecuencia de eventos de RA principalmente (clústeres 5 y 7 respectivamente). Esto resulta coherente con los resultados obtenidos por Varas (1985), quien implementó una metodología similar a la utilizada en el presente estudio (i.e., método de Huff, 1967) utilizando estaciones ubicadas en la zona centro-sur del país. Sin embargo, esto puede variar para duraciones mayores a 24h, donde los resultados muestran que pueden existir ciertas diferencias geográficas (e.g., 72h, Figura 4). Esto resulta coherente con la naturaleza de los eventos de precipitación en Chile pues, en general y salvo las zonas más australes, no se tienen eventos tormentas continuas que sobrepasen los 3 días.

La limitación de transferencia de distribuciones de precipitación entre duraciones tiene implicancias directas sobre el diseño hidrológico. Esto pues, hasta ahora, muchos estudios utilizan distribuciones recomendadas en la literatura (e.g., Varas, Benítez) para el estudio de crecidas pluviales asociadas a eventos de 24h, 48h, 72h, e incluso 96h, sin reconocer los alcances y limitaciones asociadas a ellas, inherentes a la forma en que fueron desarrolladas. En este sentido, el uso de una distribución de precipitación determinada para, e.g., eventos de 24h, para el estudio de crecidas generadas por tormentas de 48h tenderá a disminuir los caudales máximos producto de una distribución más uniforme de la precipitación. Esto pues, al escalar, e.g., la distribución de precipitación de 24h en 48h (o duraciones mayores) a través de una interpolación lineal, los pulsos de precipitación disminuyen a la mitad su intensidad. En consecuencia, la utilización de distribuciones de precipitación de duraciones no representativas de la duración de interés puede traer consigo problemas en el dimensionamiento de infraestructura hidráulica y en el análisis de la amenaza hidrológica.

5 CONCLUSIONES

En este estudio se generaron distribuciones de precipitación extrema para duraciones de 6h, 12h, 24h, 48h, y 72h para Chile continental. Para ello, se utilizaron las distribuciones horarias de precipitaciones obtenidas del reanálisis atmosférico ERA5. Se evaluó la transferibilidad

de las distribuciones entre diferentes duraciones, zonas geográficas y su representatividad en comparación a registros in-situ. A partir de los resultados obtenidos, se concluye lo siguiente:

- 1) Las distribuciones de precipitación no son transferibles a duraciones para las cuales no fueron estimadas. En general, se obtienen diferencias estadísticamente significativas entre las distribuciones de precipitación para diferentes duraciones en comparación a la distribución de 24h, lo cual coincide con valores de distancia de Wasserstein elevados ($> 0,5$ en prácticamente todos los casos).
- 2) Para ciertas duraciones (e.g., 24h), las distribuciones de precipitación pueden ser espacialmente transferidas sin comprometer su representatividad (i.e., no existe una dependencia geográfica y distribuciones obtenidas con información de una zona pueden ser utilizadas en otra). No obstante, esto no es generalizable a todas las duraciones (e.g., 72h, Figura 4).
- 3) Las distribuciones de precipitación centradas (i.e., Tipo II y III) son, en conjunto, más recurrentes en comparación a la temprana (Tipo I) y tardía (Tipo IV) en eventos de 12 y 24h. En duraciones mayores, la proporción de las distribuciones Tipo I y IV tienden a superar levemente la proporción de las distribuciones centradas (ver Figura 5b). Sin embargo, la distribución Tipo IV muestra una recurrencia similar independiente de la duración estudiada (~25-30%), razón por la cual se debe considerar su impacto en el diseño hidrológico.

Nuestros resultados, así como la base de datos generada, apuntan a ser un insumo de utilidad que permita guiar el diseño hidrológico en Chile. Sin embargo, se debe reconocer la necesidad de continuar estudiando los mecanismos que condicionan la ocurrencia y las características de los eventos de precipitación extrema en el territorio nacional y su sensibilidad a cambios en el sistema climático. Esto, a modo de identificar zonas más propensas a eventos extremos y, con ello, aumentar la resiliencia en el diseño hidráulico.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos el co-financiamiento otorgado por IECOM Ltda. para el desarrollo de la investigación y la retroalimentación entregada por el revisor anónimo. EMC agradece el apoyo de la *Swiss National Science Foundation* (SNSF) proyecto 200021_214907.

REFERENCIAS

- Álvarez-Garretón, C., Mendoza, P.A., Pablo Boisier, J., Addor, N., Galleguillos, M., Zambrano-Bigiarini, M., ... Ayala, A. (2018). The CAMELS-CL dataset: Catchment attributes and meteorology for large sample studies-Chile dataset. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 22, 5817–5846. <https://doi.org/10.5194/hess-22-5817-2018>
- Benítez, A., Verni, F. (1985). Distribución porcentual de las precipitaciones de una duración «t», para $12\text{ h} < t < 72\text{ h}$, VII Congreso Nacional de Ingeniería Hidráulica, SOCHID. Universidad de Concepción, Chile.
- Boisier, J. P., Álvarez-Garretón, C., Cepeda, J., Osses, A., Vásquez, N., & Rondanelli, R. (2018). CR2MET: A high resolution precipitation and temperature dataset for hydroclimatic research in Chile. In EGU general assembly conference abstracts (p. 19739).

Chow, V.T., Maidment, D.R. y Mays, L.W. (1994). Hidrología Aplicada. McGRAW W-HILL.

DGOP. (2023). Estudio para la incorporación de la variable Cambio Climático en el plan de reconstrucción. Dirección General de Obras Públicas (DGOP), Ministerio de Obras Públicas. Elaborado por Ximena Vargas Mesa, Franco Ricchetti Campos, Eduardo Muñoz Castro y Catalina Jerez Toledo.

Espíldora y Echavarría. (1979). Criterios para la caracterización y selección de lluvias de diseño. IV Coloquio Nacional de Ingeniería Hidráulica, SOCHID. Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile.

Falvey, M., & Garreaud, R. (2007). Wintertime precipitation episodes in central Chile: Associated meteorological conditions and orographic influences. *Journal of Hydrometeorology*, 8(2), 171-193.

Hartigan, J. A. and Wong, M. A. (1979). Algorithm AS 136: A K-means clustering algorithm. *Applied Statistics*, 28, 100--108. 10.2307/2346830.

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., ..., Thépaut, J.N. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 146, 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>.

Houston, J. (2006). Variability of precipitation in the Atacama Desert: Its causes and hydrological impact. *International Journal of Climatology*, 26(15), 2181–2198.

Huff, F. A. (1967). Time distribution of rainfall in heavy storms, *Water Resour. Res.*, vol. 3, no. 4, pp. 1007–1019, 1967.

Marsaglia, G., Tsang, W. W., & Wang, J. (2003). Evaluating Kolmogorov's distribution. *Journal of statistical software*, 8, 1-4.

Muñoz, C., & Schultz, D. M. (2021). Cutoff lows, moisture plumes, and their influence on extreme-precipitation days in central Chile. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 60(4), 437-454.

Muñoz-Castro, E., Gómez, T. I., Vargas X. (2025) Dataset for hydrological design in Chile - Insights for practitioners. v1.0. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14888350>

MOP. (2022) Actualización plan maestro de evacuación y drenaje de aguas lluvia Antofagasta. APRISA, PNUD, MOP.

MOP. (2020). Actualización Hidrológica Embalse Aromos. Región de Valparaíso. Santiago, Chile. Elaborado por: Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.

PNUD (2025). Recomendaciones metodológicas para la incorporación del cambio climático en el diseño de obras hidráulicas en la zona norte de Chile.

Reschenhofer, E. (1997). Generalization of the Kolmogorov-Smirnov test. *Computational statistics & data analysis*, 24(4), 433-441.

Tibshirani, R., Walther, G. and Hastie, T. (2001). Estimating the number of data clusters via the Gap statistic. *Journal of the Royal Statistical Society B*, 63, 411–423. <https://doi.org/10.1111/1467-9868.00293>

Vaserstein, L. N. (1969). Markov processes over denumerable products of spaces, describing large systems of automata. *Problems Inform. Transmission* (Vol. 5) (No. 3). Retrieved from <http://mi.mathnet.ru/ppi1811>

Vásquez, N., Cepeda, J., Gómez, T., Mendoza, P. A., Lagos, ... & Vargas, X. (2020). Catchment-scale natural water balance in Chile. In *Water resources of Chile* (pp. 189-208). Cham: Springer International Publishing.

Villani, C. (2003). Topics in optimal transportation. American Mathematical Society. doi: 10.1090/gsm/058