

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXV CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**CONSTRUCCIÓN DE CURVAS IDF EN ALTA RESOLUCIÓN ESPACIAL PARA
LA ZONA CENTRO-SUR DE CHILE**

CRISTÓBAL SOTO ESCOBAR^{1,2}
MAURICIO ZAMBRANO-BIGIARINI^{3,4}

RESUMEN

Las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) actualmente disponibles para Chile no permiten una adecuada representación de la variabilidad espacial de las intensidades máximas, duraciones y frecuencias de los eventos de precipitación. Por ello, este trabajo constituye el primer esfuerzo en Chile para entregar curvas IDF para toda la zona Centro-Sur del país a partir de un mismo conjunto de datos públicos de alta resolución espacial, en este caso los datos Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM (IMERG) V06B. En primer lugar, las intensidades máximas de precipitación registradas en 14 estaciones pluviométricas se ajustaron a 4 distribuciones de probabilidad (Gumbel, LogPearson-III, Weibull y GEV II). Este análisis se realizó tanto para determinar el impacto de usar series temporales de 15 años de extensión en la elaboración de las curvas IDF como para identificar la mejor distribución de probabilidad a ser utilizada en toda la zona de estudio. En segundo lugar, se validaron las estimaciones satelitales contra los valores de precipitación registrados en 344 estaciones pluviométricas utilizando una comparación punto-píxel con la eficiencia de Kling-Gupta modificada (KGE'). Finalmente, a cada píxel IMERG V06B en el período 2001-2020 se le ajustó una distribución Gumbel para determinar las intensidades máximas anuales de precipitación, para 12 duraciones y 6 periodos de retorno ($T=2, 5, 10, 25, 50$ y 100 años). Los resultados del test de Wilcoxon Mann-Whitney mostraron que las curvas IDF calculadas a partir de series temporales de 15 años no presentan diferencias estadísticamente significativas con respecto a los valores obtenidos a partir de 25 años o más de información. Además, los resultados obtenidos muestran que IMERG V06B logra reproducir adecuadamente los patrones diarios, mensuales y anuales de precipitación, de esta forma, puede ser utilizado de forma eficiente para el cálculo de curvas IDF en la zona de estudio. Los resultados se encuentran disponibles gratuitamente en <https://ingenieriacivil-ufro.shinyapps.io/CurvasIDFChile/>.

¹ Ingeniero Consultor en ICASS Spa, cristobal.soto@icass.cl

² Departamento de Ingeniería en Obras Civiles, Universidad de La Frontera, c.soto24@ufromail.cl

³ Departamento de Ingeniería en Obras Civiles, Universidad de La Frontera, mauricio.zambrano@ufrontera.cl

⁴ Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia, (CR)2, Universidad de Chile

1. INTRODUCCIÓN

Las diversas características geográficas de Chile dan origen a una gran variabilidad en la cantidad y distribución espacial de las precipitaciones, aumentando con la latitud y desde el mar hacia la Cordillera de Los Andes debido a la influencia que tiene la altura en las precipitaciones. Las precipitaciones se producen por acción de diversos procesos meteorológicos, con magnitudes (mm) e intensidades (mm/h) variables en el tiempo y en el espacio. En ingeniería, las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) se utilizan para relacionar la intensidad máxima de un evento de precipitación con su duración y con su frecuencia de ocurrencia. Estas curvas se usan típicamente para convertir precipitación en escorrentía en cuencas agrícolas y forestales pequeñas donde no se cuenta con datos de caudal, o bien para el diseño de obras de drenaje vial y urbano (Soto & Mier, 2013a). El impacto que pueden generar las curvas IDF en el diseño de distintas obras civiles adquiere gran relevancia ante la presencia de eventos extremos y desastres naturales asociados, tales como inundaciones, desborde de ríos, deslizamientos de laderas y colapso del drenaje urbano.

En Chile, la principal fuente de medición de precipitaciones son todavía los pluviómetros, los cuales frecuentemente presentan una ausencia de series de datos completas y una reducida cobertura espacial, especialmente en las zonas de mayor elevación (Zambrano-Bigiarini et al., 2017). En este contexto, las curvas IDF actualmente disponibles para Chile no permiten una adecuada representación de la variabilidad espacial de las intensidades máximas, duraciones y frecuencias de los eventos de precipitación. Sin embargo, en las últimas décadas, misiones como la Tropical Rainfall Measuring Mission y la Global Precipitation Measurement (Huffman, 2015) han permitido contar con una extensa red de satélites que proporciona observaciones globales de precipitaciones con una alta resolución espacial y temporal. Es por esto, que este trabajo buscará realizar una innovación sin precedentes para la zona Centro-Sur de Chile, calculando curvas IDF en alta resolución espacial, utilizando como datos de entrada estimaciones satelitales de última generación.

2. ZONA DE ESTUDIO Y DATOS CONSIDERADOS

Zona de estudio

La zona de estudio corresponde la zona Centro-Sur de Chile, con una extensión longitudinal de 3 400 km, de 26.0 a 56.0° S, delimitada por el Océano Pacífico al oeste y por la Cordillera de los Andes en el este (entre ~ 76,0° O y ~ 66,0° O). Abarca desde la Región de Atacama hasta la Región de Magallanes, cubriendo un área de aproximadamente 513 100 km², con elevaciones que van desde el nivel del mar hasta los 6 893 m s.n.m en el Volcán Ojos del Salado. Esta zona tiene una alta variabilidad climática, con 15 tipos diferentes de clima (desde climas áridos y semiáridos hasta templados y tundra) y una vegetación marcada por las llanuras costeras, la cordillera de la costa, la depresión intermedia y los Andes. La Figura 2-1 muestra el área de estudio, incluido un modelo de elevación digital (b), precipitaciones anuales (Fick & Hijmans, 2017) (c) y los 15 tipos de clima identificados de acuerdo a la clasificación de Köppen-Geiger (d).

Para este trabajo se seleccionaron 4 zonas macro climáticas, levemente adaptadas de Zambrano-Bigiarini et al. (2017): Norte Chico (26.0–32.2° S), Chile Central (32.2–36.4° S), Sur (36.4–43.7° S), y Austral o Extremo Sur (43.7–56.0° S).

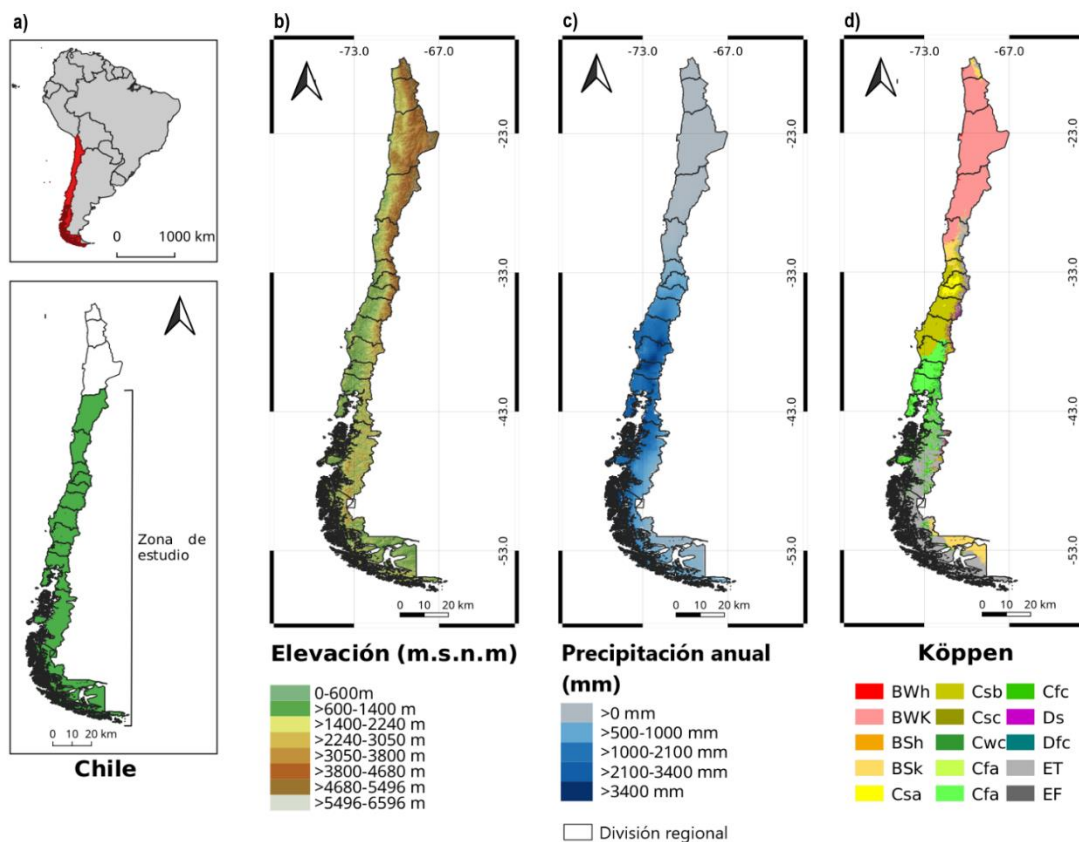


Figura 2-1 Zona de estudio. De izquierda a derecha: a) Delimitación zona de estudio b) Modelo de elevación digital, c) Precipitaciones anuales (mm) (Fick & Hijmans, 2017), d) Clasificación climática de Köppen-Geiger (Beck et al., 2018)

2.1 Estimaciones satelitales de precipitación

La información base que se utilizará para el cálculo de curvas IDF en alta resolución espacial corresponde a los datos IMERG V06B (*Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM*), producto grillado global de estimación satelital de precipitación en base a las misiones GPM y TRMM. Los datos IMERG V06B entregan valores de intensidad de precipitación (mm/hr/10) medidos entre las 00:00 y 23:59 UTC+00, con resolución temporal de 30 minutos y resolución espacial de 0.1°x0.1°. En particular, para este trabajo se utilizó el reprocesamiento retrospectivo de IMERG, el cual extiende los datos IMERG originales hasta Junio de 2000 (comienzo de la era TRMM). Considerando que para este trabajo solo se utilizaron años completos de datos, se utilizaron todos los archivos IMERG V06B disponibles entre el periodo 01-Ene-2001 hasta el 31-Dic-2020 (i.e., 20 años y 350592 archivos), en formato GeoTiff y utilizando el sistema geodésico de coordenadas geográficas WGS84. Estos datos se pueden descargar gratuitamente en <http://pmm.nasa.gov/data-access/>.

2.1 Registro de precipitaciones en pluviómetros

Dado que los datos de IMERG tienen una extensión temporal menor a 30 años (generalmente recomendado para el cálculo de curvas IDF), se compararon las curvas IDF obtenidas a partir de series temporales largas (≥ 25 años) contra las curvas IDF obtenidas a partir de series temporales cortas (~ 15 años). En una primera instancia se buscó acceder a registros horarios de precipitación de estaciones de la Dirección General de Aguas (DGA). Sin embargo, luego de agotar todos los canales formales de acceso a información, sin éxito, se optó por usar de valores de precipitaciones máximas anuales medidas en pluviómetros disponibles en trabajos previos. De esta forma, se seleccionaron 14 estaciones pluviométricas con series temporales largas de intensidades de precipitaciones máximas anuales (ver Tabla 2-1).

Tabla 2-1 Información de estaciones utilizadas en los trabajos de Labra (2005), Carrasco (2010), Cornejo (2004) y Pavéz (2004).

Nombre estación	Código	Latitud	Longitud	Periodo	Elevación (m s.n.m.)	Referencia
Cerro el Padre	8317003	-37.7797	-71.8664	1976-2003	346	Labra (2005)
El Chillán Viejo	8117002	-36.6319	-72.1267	1974-2003	115	Labra (2005)
Embalse Diguillin	8130006	-36.8686	-71.6425	1965-2003	670	Labra (2005)
Quilaco	8318002	-37.6850	-72.0058	1965-2003	223	Labra (2005)
Llancahue	10123004	-39.8561	-73.1786	1977-2007	70	Carrasco (2010)
Punta Arenas	12586004	-53.1233	-70.8772	1983-2008	5	Carrasco (2010)
Rivadavia	4308003	-29.9772	-70.5617	1976-2001	820	Cornejo (2004)
Quelon	4900003	-32.1444	-71.1628	1973-2002	890	Cornejo (2004)
Illapel	4726003	-31.6450	-71.1908	1976-2002	290	Cornejo (2004)
Tranquilla	4710001	-31.9000	-70.6706	1966-2002	1000	Cornejo (2004)
La Paloma	4540006	-30.6958	-71.0361	1962-2002	320	Cornejo (2004)
Embalse Cogoti	4535001	-31.0078	-71.0856	1966-2002	740	Cornejo (2004)
Los Queñes	7103003	-35.0008	-70.8119	1988-2002	663	Pávez (2004)
Ancoa	7355007	-35.9106	-71.2958	1988-2002	421	Pávez (2004)

Además, para validar los datos de precipitación de IMERG en distintas escalas temporales, se utilizaron los valores de precipitación observada en 344 estaciones pluviométricas, obtenidas desde el Centro de Investigación del Clima y Resiliencia (CR)2 (<http://www.cr2.cl/datos-de-precipitacion/>), cuyos datos brutos originales provienen de la DGA y de la Dirección Meteorológica de Chile. Estas estaciones fueron seleccionadas porque cumplen con un 90 % (o más) de datos diarios disponibles entre el 01 de enero de 2001 y el 31 de enero de 2017 (en 2018 y 2019 muy pocas estaciones cuentan con registros completos). Estos registros miden el período comprendido entre las 08:00 y 07:59 GMT -4.

3. CONSTRUCCIÓN DE CURVAS IDF

Para obtener los valores IDF, se siguió el enfoque tradicional de estimar intensidades máximas anuales para distintas duraciones (P_{\max}^d) y distintos períodos de retorno (e.g. Chow et al., 1994; Langousis & Veneziano, 2007; Minh et al., 2006; Pizarro et al., 2001; Elsebaie, 2012; UNESCO, 2013).

3.1 Curvas IDF en pluviómetros

Antes de utilizar los datos IMERG V06B para la construcción de curvas IDF, se analizó el impacto de la cantidad de años utilizados para derivar estas curvas. Para esto, se utilizaron las series de intensidades máximas anuales obtenidas para las 14 estaciones indicadas en la Tabla 2-1. Se consideraron como series temporales largas el registro completo de datos disponible en cada estación (≥ 25 años) y como serie temporal corta los primeros 15 años de datos en cada estación.

Las series temporales (registros cortos y largos) de intensidades máximas anuales para cada duración, fueron ajustadas a las distribuciones de probabilidad Gumbel, Weibull, Log Pearson III y Generalizada de Valores Extremos tipo II (GEV II). Para la estimación de los parámetros de las distribuciones de probabilidad Gumbel, Weibull, y Log Pearson III se utilizó la función *fitdist* del paquete *fitdistrplus* (Delignette-Muller & Dutang, 2015), utilizando el método de máxima verosimilitud para las dos primeras (Aucoin, 2015; Venables & Ripley, 2002) y el método de máxima bondad de ajuste para la distribución Log Pearson III (Luceño, 2006). Por otra parte, los parámetros de la distribución GEV II fueron estimados utilizando las fórmulas sugeridas por Koutsoyiannis (2004), quien fija el parámetro de forma en 0.15 y estima los parámetros de escala y ubicación mediante el método de los momentos. Luego, se utilizó el test de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov (Stephens, 1986) para evaluar el posible rechazo de una o más de las distribuciones analizadas, utilizando un nivel de significancia de 0.05 y la función *gofstat* del paquete *fitdistrplus* (Delignette-Muller & Dutang, 2015). En caso de rechazarse una función de densidad de probabilidad (FDP) el ajuste se considera como no válido para la construcción de curvas IDF.

Una vez estimados los parámetros, se obtuvieron las intensidades máximas de precipitación correspondiente a periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años, utilizando la función *quantile* del paquete *stats* (R Core Team, 2019). Para esto, se consideró una probabilidad de excedencia $p_{ex} = 1/T$, donde T corresponde al periodo de retorno.

Finalmente, para cuantificar si existen diferencias significativas entre curvas IDF obtenidas con registros largos y cortos de precipitación, se realizó la prueba estadística de Wilcoxon Mann-Whitney (Holland & Wolfe, 1973). Para esto, se utilizó la función *wilcox.test* del paquete *stat*, con la hipótesis nula que la distribución de frecuencias relativas de las curvas IDF obtenidas a partir de registros cortos provienen de la misma población que las curvas IDF derivadas a partir de los registros largos.

3.2 Curvas IDF en base a estimaciones satelitales de precipitación

Para validar las estimaciones satelitales de precipitación IMERG V06B fue necesario comparar dichos valores contra los datos registrados en las 344 estaciones pluviométricas en distintas escalas temporales. Para ello, los datos satelitales fueron primero transformados a milímetros de agua caída, y luego agregados a distintas escalas temporales (diaria, mensual y anual) aplicando una corrección horaria que permita pasar desde la hora universal coordinada (UTC) utilizada por los datos IMERG V06B hasta el período de acumulación comprendido entre las 08:00 y 07:59 GMT-4.

Para validar los valores de precipitación obtenidos a partir de IMERG V06B contra los valores correspondientes observados en pluviómetros, se hizo una comparación punto-píxel (Thiemig et al., 2012) aplicando la eficiencia de Kling-Gupta modificada (KGE') (Kling et al., 2012; Gupta et al., 2009), la cual garantiza que el sesgo y la variabilidad no estén correlacionadas. donde los valores de KGE fueron clasificados utilizando los siguientes rangos: menor a -0.41 insatisfactorio; entre 0.41 y 0.5 pobre; 0.5-0.75 aceptable y sobre 0.75 buen desempeño, rangos definidos tomando como referencia Thiemig et al. (2013) y Knoben et al. (2019).

Los valores de IDF en base a estimaciones satelitales de precipitación se obtuvieron utilizando el lenguaje de programación estadístico R, elaborando rutinas que permitían generar cálculos por cada píxel de los raster con frecuencia temporal de 30 minutos de IMERG V06B. Los procedimientos que fueron llevados a cabo por cada pixel se describen a continuación.

Se calcularon las intensidades máximas anuales de precipitación para distintas duraciones, considerando ventanas continuas de tiempo (Soto & Meier, 2013a; Moraga et al., 2015). Por ejemplo, al determinar la intensidad máxima de precipitación para duración de una hora, las estimaciones satelitales se agregaron desde las 00:00 a 01:00, 00:30 a 01:30, así y sucesivamente, y no solo en hora-reloj (e.g., 00:00-01:00, 01:00-02:00) cómo lo han hecho la mayoría de los trabajos previos (e.g. Ponce, 1989; Chow et al., 1994; Soto, 2014; Cornejo, 2004; Pavéz, 2004; Labra, 2005; Carrasco, 2010). Se consideraron duraciones de 30 min, 1, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 18, 24, 48 y 72 horas, para cada año desde 2001 hasta 2020, totalizando 240 archivos GeoTiff (20 años x 12 duraciones) en los que cada pixel almacena un valor de intensidad de precipitación máxima para una duración de interés.

A continuación, siguiendo un procedimiento análogo al llevado a cabo con los pluviómetros, se ajustaron las series de datos de intensidades máximas de precipitación para una misma duración a la función de probabilidad, escogiendo aquella que tuviera el mejor comportamiento a partir de los del análisis de las curvas IDF derivadas de los 14 pluviómetros. Luego para rechazar o no el ajuste llevado a cabo, se aplicó el test de bondad de Kolmogorov- Smirnov, para cada celda, considerando un nivel de significancia de 0.05. Finalmente se obtuvieron las intensidades máximas de precipitación para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años, para cada una de las 12 duraciones ya mencionadas anteriormente.

Además, se calcularon los coeficientes de frecuencia, considerándose como la razón entre la precipitación caída en “t” horas para un periodo de retorno “T” y la precipitación caída en “t” horas para un periodo de retorno de 10 años. Así como también como los coeficientes de duración, considerados como el cociente entre la precipitación caída en “t” hr y la correspondiente a 24 horas para un periodo de retorno “T”.

3.3 Comparación de curvas IDF con el Manual de Carreteras

Dado que según Soto & Mier (2013a) y Moraga et al. (2015), la serie de curvas incluidas en el Manual de Carreteras (Dirección de Vialidad, 2019), se encuentran fuertemente subestimadas, se seleccionaron las estaciones de la Tabla 3-1 con las que fueron diseñadas

las curvas IDF en el Manual de Carreteras, se extrajeron los valores IDF de los mapas obtenidos en la Sección 3.2 y se hizo una comparación punto-píxel de los valores IDF para los periodos de retorno de 10, 25, 50 y 100 años, para las duraciones de 1, 2, 4, 8, 12, 18 y 24 horas.

Tabla 3-1 Estaciones seleccionadas para comparar las curvas IDF del presente trabajo con el Manual de Carreteras

Estación	Código	Lat	Lon	Estación	Código	Lat	Lon
Rivadavia	4308003	-29.98	-70.56	Rapel	6056003	-33.95	-71.73
La Paloma	4540006	-30.70	-71.04	San Fernando	6016004	-34.60	-70.97
Illapel	4726003	-31.64	-71.19	Curicó	7118003	-34.98	-71.24
La Tranquilla	4710001	-31.90	-70.67	Armerillo	350068	-35.70	-71.08
Rungue	5733008	-33.02	-70.91	Chillán	8117002	-36.63	-72.13
Lago Peñuelas	330129	-33.15	-71.56	Concepción	360019	-36.78	-73.06
Los Panguiles	330138	-33.44	-71.03	Quilaco	8318002	-37.69	-72.01
Santiago-Q.Normal	330020	-33.45	-70.68	Valdivia	390006	-39.65	-73.08
Santiago-San Joaquín	5730015	-33.50	-70.61	Ensenada	1041000	-41.23	-72.57
Pirque	330151	-33.68	-70.09	Punta Arena	12586004	-53.12	-70.88
Melipilla	330061	-33.69	-71.22				

4. RESULTADOS

4.1 CURVAS IDF EN BASE PLUVIÓMETROS

De los ajustes realizados a las 14 estaciones pluviométricas (Tabla 2-1) para las cuatro FDP definidos en la sección 3.1 el test de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov, sólo rechazó las distribuciones Gumbel y Weibull para la duración 48 horas en la estación Tranquilla. Al revisar los valores de intensidad para la duración de 48 horas se observan intensidades bajas, cercanas a cero, lo cual explicaría el rechazo las dos distribuciones de Valores Extremos.

La Figura 4-1 muestra las comparaciones de curvas IDF estimadas a partir de series temporales cortas y series temporales largas para la estación Rivadavia, si bien se obtuvieron las curvas IDF para las 14 estaciones de la Tabla 2-1, por motivos de extensión se incluyó sólo esta figura como representativa de los demás resultados (se pueden explorar en detalle cada resultado en el Anexo D de Soto, 2019). Esta figura muestra que, para una misma duración y distribución de probabilidad, las intensidades de precipitación calculadas a partir de 15 años de datos no presentan diferencias importantes con respecto a los valores obtenidos a partir de 25 (o más) años de información. Por otro lado, los resultados del test de Wilcoxon Mann-Whitney aplicado a las curvas IDF generadas con distinta cantidad de datos, pero derivadas a partir de la misma distribución de probabilidad, no rechazaron en ningún caso la hipótesis nula, confirmando que, para una misma distribución de probabilidad, no existen diferencias significativas entre las curvas IDF obtenidas con 15 y 25 (o más) años de información.

Por último, se analizó el impacto de la elección de la distribución de probabilidad escogida para realizar el cálculo de las curvas IDF, revisando los resultados obtenidos en las 14

estaciones utilizadas. Estos resultados muestran que la distribución de probabilidad GEV II tiende a entregar los valores más bajos de intensidad para los periodos de retorno de 2, 5, y 10 años, mientras que la distribución Weibull entrega los valores bajos de intensidad para los periodos de retorno de 25, 50, 100 años, por lo que no sería recomendable el uso de estas dos distribuciones para evitar una posible subestimación de los valores de las curvas IDF.

Por otra parte, la distribución LogPearson III si bien no entrega los valores más bajos de las curvas IDF comparadas, si presenta comportamientos anómalos en algunas estaciones tales como Diguillín, Illapel, Llancahue, Tranquilla y Rivadavia en donde aumenta la intensidad en lugar de disminuir a medida que aumenta la duración de la precipitación. Finalmente, el ajuste de la distribución Gumbel se comportó de manera estable en todas las estaciones y periodos de retorno analizadas, no acotando por abajo las demás curvas IDF ni presentando comportamientos anómalos como los de la distribución LogPearson III, por lo cual es la distribución recomendada para trabajar en la zona de estudio, lo cual concuerda con los resultados de trabajos anteriores (e.g. UNESCO, 2013; Soto, 2014; Cornejo, 2004; Labra, 2005; Pizarro et al., 2001).

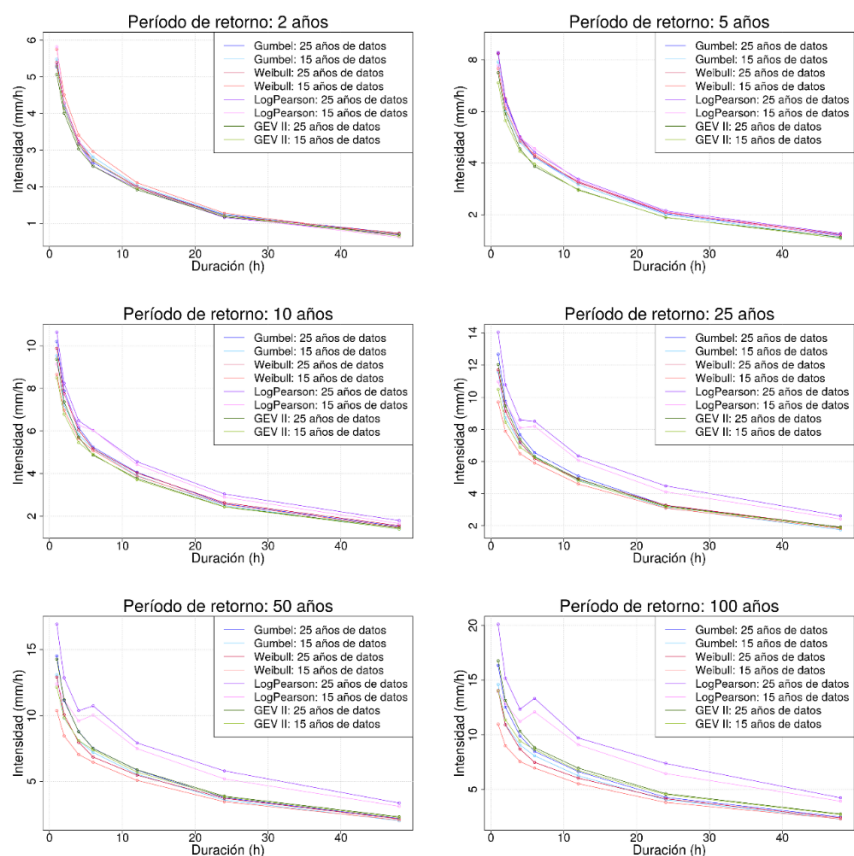


Figura 4-1 Comparación curvas IDF con registros cortos y largos de datos, para las distribuciones de probabilidad Gumbel, LogPearson III, GEV II y Weibull, y para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años, en la estación Rivadavia 1976-2001

4.2 VALIDACIÓN DE IMERG V06B

En la Figura 4-2a se ilustran los valores KGE' diarios distribuidos espacialmente para cada una de las 344 estaciones con valores observados, cuyos valores van entre -0.88 (estación Caldera) a 0.82 (estación Los Guindos), con una mediana de 0.58, lo cual es considerable como aceptable. Además, en las Figura 4-2 b y c, se incluyen gráficos de caja, donde se representan las series de KGE' a escala diaria, mensual y anual, desagregados por elevaciones (b) y zonas climáticas (c), aquí es posible observar que el mejor rendimiento de IMERG es a escalas mensuales, en la zona central y en elevaciones entre 200 y 500 m s.n.m.

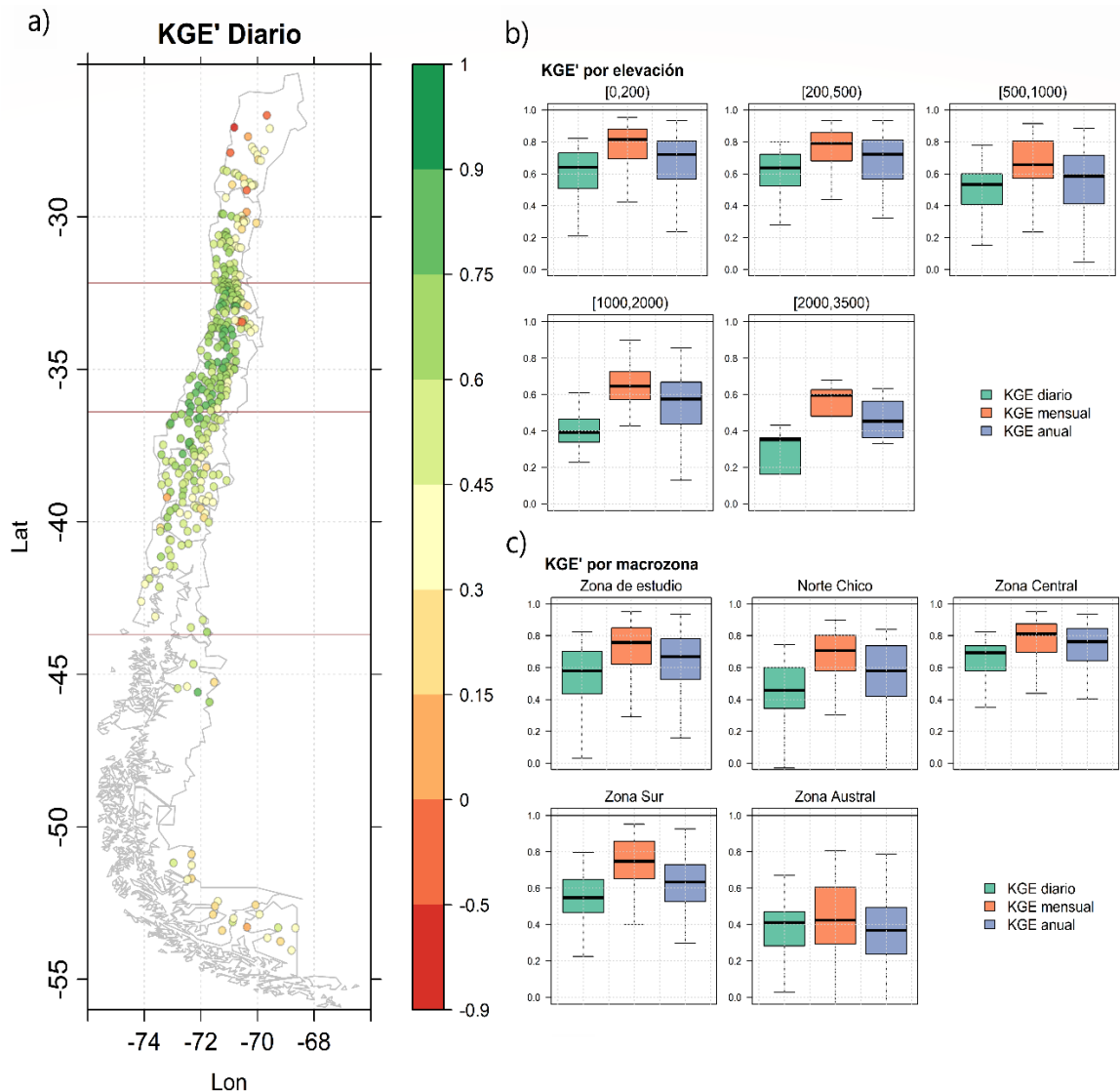


Figura 4-2 KGE' de precipitación IMERG vs 344 estaciones. **a)** Mapa con la distribución espacial de KGE' para escala de datos diaria. **b)** Gráficos de caja para valores de KGE' para 5 elevaciones en escala diaria, mensual y anual **c)** Gráficos de caja para valores de KGE' para las distintas macrozonas climáticas s en escala diaria, mensual y anual

4.3 VALORES IDF EN BASE A IMERG V06B

Las intensidades máximas anuales de precipitación para duraciones de 30 min, 1, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 18, 24, 48 y 72 horas obtenidas en base al producto satelital IMERG V06B, se ajustaron a la distribución de probabilidad seleccionada anteriormente (Gumbel). A estos ajustes se les aplicó luego el test de bondad de Kolmogórov-Smirnov, no rechazando prácticamente la totalidad de los ajustes (solo 3-10 píxeles fueron rechazados por cada ajuste, de un total de 7713 píxeles). Los píxeles rechazados se ubican en el Norte Chico, con intensidades de precipitación bajas, lo cual podría explicar el rechazo de la distribución de “valores extremos” Gumbel. El resultado obtenido mantiene las características del producto de origen IMERG V06B, es decir, corresponde a un producto grillado, su resolución espacial es de $0.1 \times 0.1^\circ$, con un archivo GeoTiff con valores de intensidad en mm/hr para cada duración y periodo de retorno previamente definido.

La Figura 4-3 muestra las intensidades máximas de precipitación para periodos de retorno de 50 años, donde cada uno de los paneles representan las intensidades máximas para duraciones de 30 min, 1, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 18, 24, 48 y 72 horas. Esta figura muestra el comportamiento esperado, i.e. para un mismo período de retorno la intensidad de la precipitación disminuye al aumentar la duración, lo cual se observa al pasar de intensidades altas (colores azulados) para duraciones de 30 minutos a intensidades bajas (tonalidades rojas) para las duraciones de 72 horas.

Dada la extensión que implica presentar todos los mapas en el presente trabajo se generó una plataforma web a la cual se puede acceder y revisar los resultados para distintas duraciones y periodos de retornos en la página <https://ingenieriacivil-ufro.shinyapps.io/CurvasIDFChile/> (Ver Figura 4-4).

Otro aspecto importante que se puede visualizar en las Figuras 4-4 es la importante variación de la intensidad de precipitación entre las diferentes latitudes de la zona de estudio, pasando desde intensidades bajas en el Norte Chico (1-8 mm/h para una duración de 30 min) hasta intensidades extremadamente altas en la zona Sur (70-148 mm/h para una duración de 30 min), ver Figura 4-3. Además, se observa que las altas intensidades se concentran, en general, en la región de Los Lagos ($40.2-44.1^\circ$ S), para todas las duraciones y periodos de retorno analizados.

Al revisar por macrozona climática, se observa que en el Norte Chico se presenta una importante variación espacial de las intensidades de precipitación. Por ejemplo, la Figura 4-4 muestra que para la duración de 1 h se pasa de una intensidad de 0-8 mm/h en la región de Atacama ($26.0-29.2^\circ$ S) hasta una intensidad de 24-29 mm/h en la costa de la región de Coquimbo ($29.2-32.2^\circ$ S). Por otra parte, en general se observa que entre las regiones de Valparaíso y la región Metropolitana ($32.0-34.2^\circ$ S) las intensidades de precipitación aumentan hacia la zona costera, mientras que desde la región de O'Higgins hasta la región del Maule ($34.4-36.3^\circ$ S) las intensidades aumentan hacia la Cordillera de los Andes (eg., duración de 4 h en Figura 4-3).

En la zona Sur se observa un aumento considerable de las intensidades en el archipiélago de Chiloé (41.1–43.4° S), donde se alcanzan las mayores intensidades de precipitación, llegando hasta valores de 95-187 mm/h para una duración de 30 min y periodo de retorno de 100 años. Por último, en la zona Austral se observa una variabilidad longitudinal en todas las duraciones y periodos de retorno, siendo las intensidades mayores en las cercanías del océano Pacífico y disminuyendo a medida que acerca a la frontera con Argentina (~ 75.4° S).

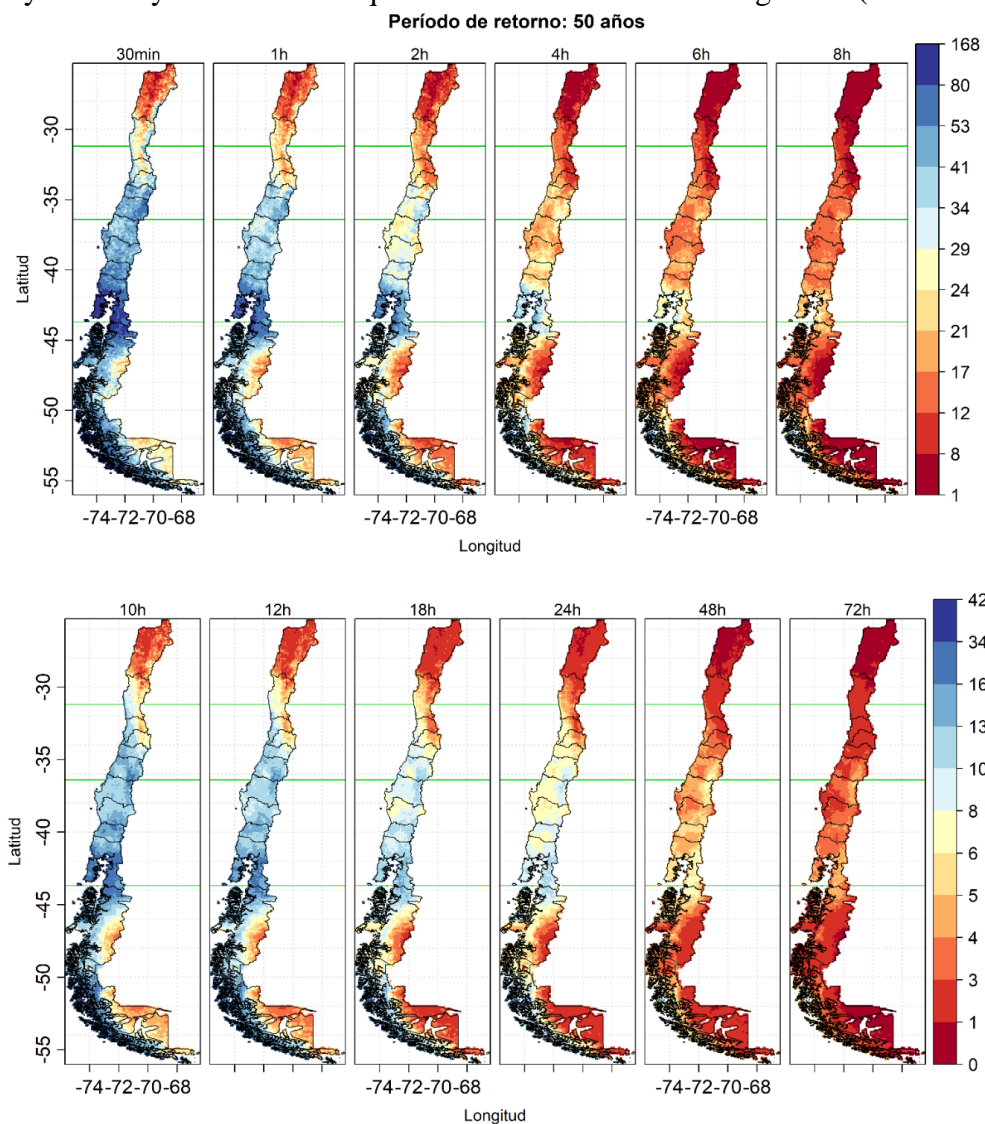


Figura 4-3: Mapas intensidades máximas de precipitación (mm/h) para un periodo de retorno de 50 años y duraciones de 30 min a 72 horas, ordenadas de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo. El panel inferior y superior tienen diferentes rangos de colores.

Por otra parte, para analizar la variación espacial de las intensidades de precipitación en mm/h a lo largo de toda la zona de estudio se calculó el promedio de las intensidades máximas para cada región. De lo anterior se observa que a medida que aumenta el período

de retorno también aumenta la diferencia de intensidad, en mm/h, entre los altos valores observados en las zonas Centro, Sur y Austral en comparación a los bajos valores registrados en el Norte Chico. Por ejemplo, para una duración de 30 min al pasar de un periodo de retorno de 2 a 100 años se obtiene un aumento de 15.4 mm/h en la región Atacama (26.0-29.2° S) y de 27.0 mm/h en la región de Magallanes (48.4-56.0° S), pero dichos incrementos corresponden a un 261 % de variación en la región de Atacama y un 110 % en la región de Magallanes.

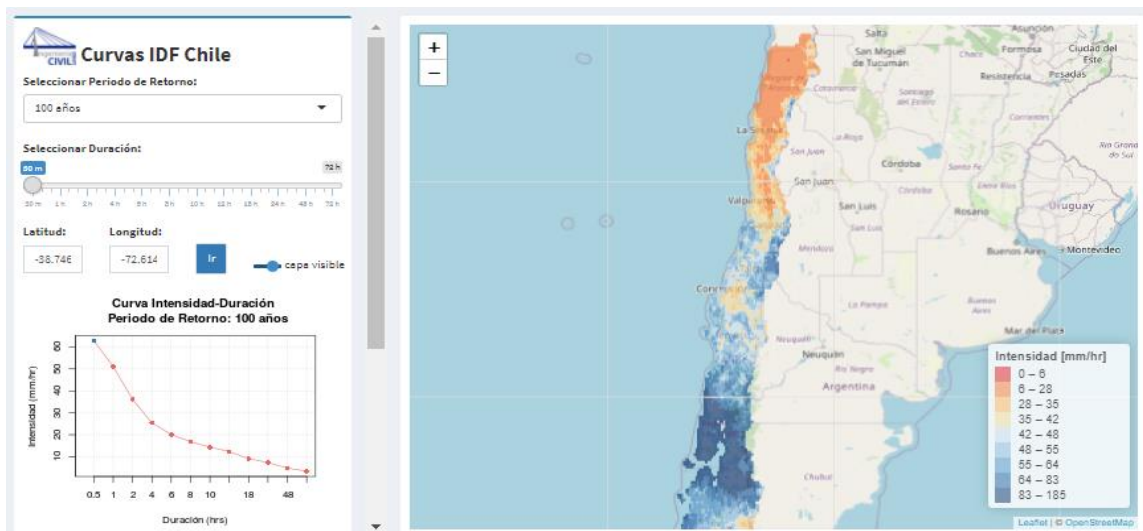


Figura 4-4 Plataforma web para la visualización de resultados, <https://ingenieriacivil-ufro.shinyapps.io/CurvasIDFChile/>.

4.4 COEFICIENTES DE FRECUENCIA Y DURACIÓN

En la Figura 4-5 se presentan los coeficientes de frecuencias calculados para periodos de retorno de 2, 5, 25, 50 y 100 años ocupando como base un periodo de retorno de 10 años. En la Figura 4-6 se muestran los coeficientes de duración calculados para duraciones de 1, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 18, 48 y 72 horas, considerando como base una duración de 24 horas.

Adicionalmente promediando los valores de coeficientes de frecuencia para toda la zona de estudio, se hizo una comparación con los valores obtenidos por el Espíldora en el año 1971, (ver Tabla 3-1), donde se observa una consistencia de estos coeficientes en el tiempo, dado que los valores fueron calculados hace más de 50 años atrás y la diferencia de valores es prácticamente nula.

Tabla 3-1 Coeficientes de frecuencia para la zona de estudio para periodos de 2, 5, 25, 50, 100 años, utilizando como base precipitaciones de 10 años de periodo de retorno.

	CF2	CF5	CF25	CF50	CF100
Espíldora (1971)	0.65	0.86	1.17	1.30	1.43
Presente Trabajo	0.64	0.86	1.19	1.30	1.40

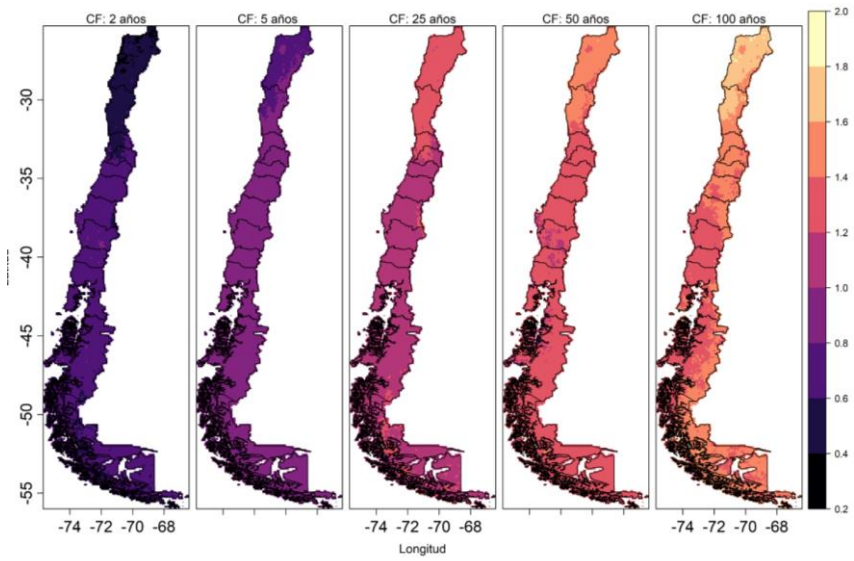


Figura 4-5 Coeficientes de frecuencia para periodos de retorno de 2, 4, 25, 50 y 100 años, utilizando como base precipitaciones de 10 años de periodo de retorno.

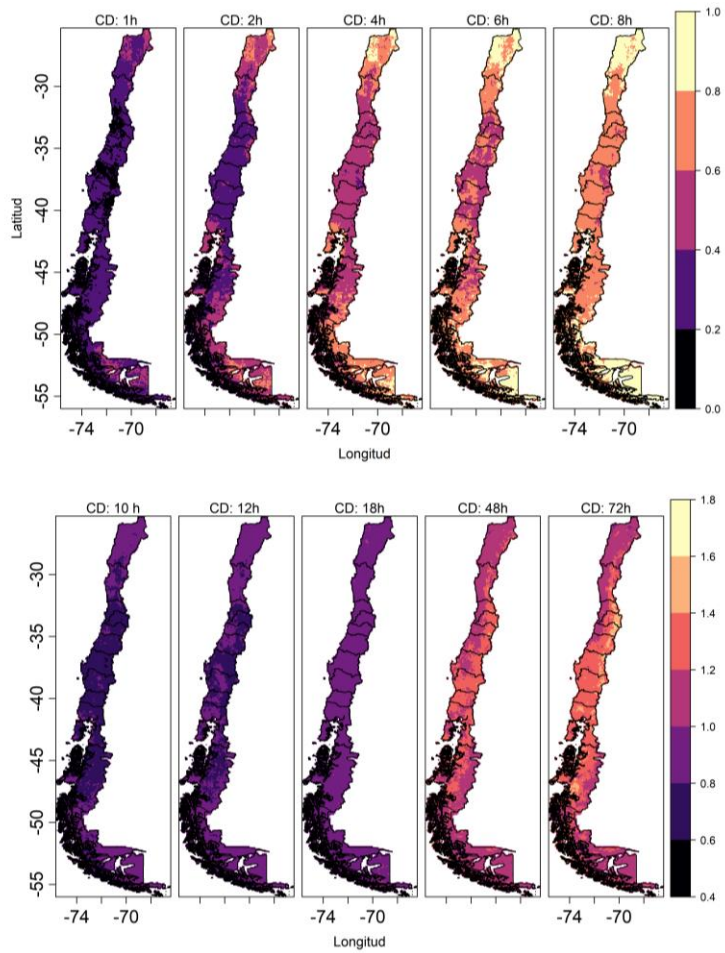


Figura 4-6 Coeficientes de duración para para duraciones de 1, 2, 4, 6, 8, 12, 18, 48 y 72 horas, utilizando como base precipitaciones de 24 horas.

4.5 COMPARACIÓN DE CURVAS IDF CON MANUAL DE CARRETERAS

Al comparar los valores IDF obtenidos en el presente trabajo con las curvas IDF del Manual de Carreteras, se observó para duraciones menores a 4 horas los valores obtenidos en base a IMERG resultaron siempre mayores, para todos los periodos de retorno considerados (ver Figura 4-7). A modo de ejemplo, para eventos de 1 hora de duración en este trabajo se obtienen en promedio intensidades 50 % mayores que las del Manual de Carreteras, y en otros casos hasta 100 % mayores (e.g Estación Melipilla). Estos resultados concuerdan parcialmente con las conclusiones de Soto & Mier (2013b) y Moraga et al. (2015), quienes indicaron que las subestimaciones de intensidades obtenidas al aplicar el método hora- reloj podrían ser del orden de 20 % y 25 %. Sin embargo, esta diferencia metodológica no explica del todo las importantes diferencias entre las intensidades máximas de precipitación, siendo otro motivo a considerar el periodo de tiempo utilizado para generación de las curvas IDF en ambos estudios. Las curvas IDF del Manual de Carreteras fueron obtenidas en base a series temporales comprendidas en el periodo 1960-1999 (dependiendo de la estación), mientras que las del presente trabajo fueron construidas con datos registrados entre 2001-2020. Por lo tanto, consideramos posible que, para duraciones cortas, las intensidades de precipitación hayan aumentado en las últimas décadas.

Por otro lado, para duraciones mayores a 4 horas las diferencias varían según la zona geográfica. Desde el Norte Chico hasta parte de la zona Central las intensidades del Manual de Carreteras son mayores a las del presente trabajo, lo que indicaría una disminución en el tiempo de la intensidad de precipitación en esta zona. Por otra parte, desde Melipilla al sur (33.4-56.0 S), las intensidades máximas obtenidas en este trabajo son en general mayores que las del Manual de Carreteras, lo cual podría indicar un aumento de la intensidad en las últimas décadas. Estos dos comportamientos diferenciales según zona geográfica se observan al revisar la estación de Santiago-San Joaquín (Norte Chico - Zona Central) y la estación de Concepción (Zona Sur), ver Figura 4 -7 (para la revisar la comparación de las 21 estaciones ver Soto, 2019).

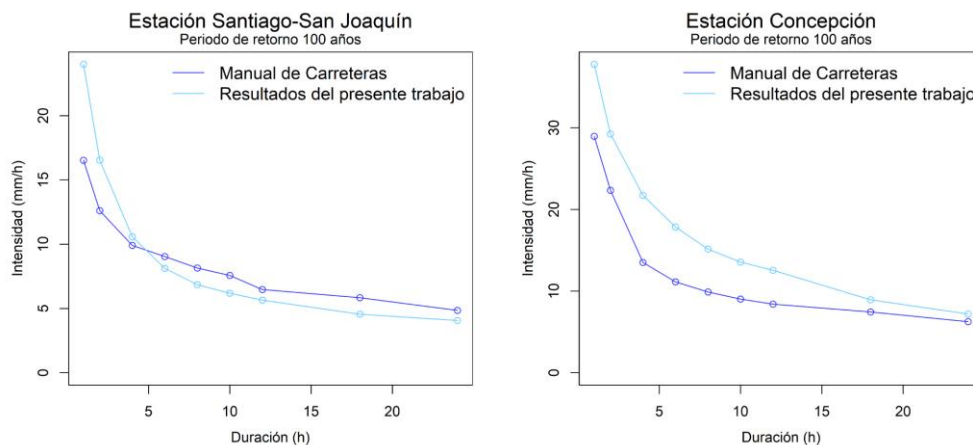


Figura 4-7 Comparación curvas IDF con el Manual de Carreteras, para la estación San Joaquín y Concepción.

5. CONCLUSIONES

Los resultados del test de Wilcoxon Mann-Whitney mostraron que las curvas IDF generadas a partir de series temporales cortas (15 años) no presentaron diferencias estadísticamente significativas con respecto a las curvas IDF derivadas de series temporales largas (≥ 25 años). Las pequeñas diferencias encontradas aumentan a medida que crece el periodo de retorno considerado y disminuye a medida que aumenta la duración. Por lo tanto, un incremento en el número de años utilizados en la construcción de curvas IDF solo contribuiría a mejorar la estabilidad de la estimación de los parámetros de las distribuciones de probabilidad consideradas, sin modificar significativamente el valor de las curvas IDF.

Las estimaciones satelitales de precipitación IMERG V06B, con resolución temporal de 30 minutos y resolución espacial de $0.1 \times 0.1^\circ$, logran capturar adecuadamente tanto la cantidad como la estacionalidad de precipitaciones observadas en 344 pluviómetros ubicados en la zona Centro-Sur de Chile (26.0 - 56.0° S). En particular, la comparación punto-píxel entre los datos IMERG V06B y los datos observados en pluviómetros entregó valores medios de la eficiencia de Kling-Gupta modificada de 0.58, 0.76 y 0.67 para las escalas temporales diarias, mensuales y anuales, respectivamente.

Las estimaciones satelitales IMERG V06B pudieron ser utilizadas de forma eficiente para el cálculo de curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) para 12 duraciones (30 min, 1, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 18, 24 y 72 h) y 6 periodos de retorno ($T=2, 5, 10, 25, 50$ y 100 años). Este trabajo constituye un importante esfuerzo para entregar valores de las curvas IDF espacialmente distribuidos para Chile Centro-Sur, con una metodología uniforme y a partir de un mismo conjunto de datos públicos, brindando una oportunidad sin precedentes en Chile para realizar el diseño de obras hidráulicas con valores de intensidad obtenidos para el punto en estudio y no para una estación “vecina” (la cual puede estar a más de 100-200 km de distancia).

Las curvas IDF obtenidas presentan una gran variabilidad espacial dentro de la zona de estudio, encontrándose las intensidades más bajas en el Norte Chico y las más altas en la zona Sur, más específicamente en la Región de Los Lagos (40.2 - 44.1° S). A nivel de macrozonas climáticas, la variabilidad espacial más alta se presentó en el Norte Chico y Zona Austral, con valores medios del coeficiente de variación de 32 % y 46 %, respectivamente. En la zona Central y Sur esta variabilidad disminuye hasta valores medios de 20 % y 11 %, respectivamente. Sin embargo, en la zona Central es posible observar un aumento de las intensidades de precipitación máxima en las cercanías de la Cordillera de los Andes, mientras que en la zona sur se aprecia un aumento importante de las intensidades en la región de Los Lagos (40.2 - 44.1° S).

Al comparar los coeficientes de frecuencia obtenidos en este trabajo con aquellos obtenidos en 1971 por Espíldora, generados a partir de 9 estaciones pluviográficas, se observa una consistencia temporal. Esto constituye un resultado inesperado, que permite revalorar el trabajo realizado por los grandes hidrólogos de Chile muchas décadas atrás y con menos cantidad de información.

Las curvas IDF obtenidas en este trabajo presentan diferencias importantes respecto a las obtenidas en las 21 estaciones seleccionadas del Manual de Carreteras. En general, para duraciones menores a 4 horas la intensidad de precipitación obtenidas a partir de IMERG son siempre mayores que los valores presentados en el Manual de Carreteras (en promedio 50% mayores). Estas diferencias concuerdan parcialmente con estudios previos que mencionan subestimaciones de las curvas IDF del Manual de Carreteras (Soto & Mier, 2013a; Moraga et al., 2015), debido a la agregación en horas-reloj para el cálculo de intensidades máximas anuales versus el uso de ventanas de tiempo continuas utilizado en el presente trabajo (este efecto es menos importante mientras mayor es la duración considerada). Otra posible explicación para esta diferencia puede ser que las intensidades máximas de precipitación para duraciones cortas hayan aumentado en las últimas décadas, considerando que las curvas IDF del Manual de Carreteras fueron obtenidas en base a series temporales medidas entre 1960-1999 (dependiendo de la estación), mientras que las de este trabajo fueron construidas con datos del período 2001-2020.

Un aspecto adicional a los ya mencionados que puede explicar las diferencias de las intensidades de precipitación de las curvas IDF respecto al Manual de Carreteras, es que si bien IMERG V06B demostró una buena capacidad de representación de las precipitaciones a escala diaria, mensual y anual, no se realizó un análisis a escalas horarias o infrahorarias, debido a la dificultad de contar con datos a esta escala temporal, por lo que pueden existir errores en la estimación de precipitaciones a escalas infrahorarias no detectadas, razón por la cual se recomienda en futuros trabajos hacer un análisis de rendimiento a esta escala temporal. Sin embargo, la evaluación de productos satelitales de precipitación a escalas infrahorarias, presenta una problemática adicional a simplemente no contar con los registros pluviógrafos, y es que además es necesario que la densidad espacial de pluviógrafos sea alta (Maggioni, 2018; Massari, 2017; Kidd, 2017), principalmente por que el supuesto clave de comparación supone que un punto (estación) es representativo un área (píxel), lo cual es difícil de cumplir a escalas de tiempo bajas y pluviógrafos con grandes distancias entre sí, como es el caso de la zona de estudio, por lo que este aspecto corresponde a una limitante actual de la evaluación de productos satelitales a escalas temporales bajas.

Por otro lado, para duraciones mayores a 4 horas las diferencias varían según la zona macro climática. Para el Norte Chico y hasta la región Metropolitana, las intensidades del Manual de Carreteras son mayores a las obtenidas en este trabajo, lo que puede estar relacionado con una disminución en el tiempo de las intensidades de precipitación en esta zona, mientras que para el resto de la zona Central, Sur y Austral las intensidades máximas obtenidas en este trabajo son mayores que las del Manual de Carreteras, por lo que el uso de las intensidades obtenidas en el presente trabajo se traduciría en diseños más conservadores en las obras de Ingeniería.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo agradece a los proyectos ANID PCI NSFC 190018 (Management of global change impacts on hydrological extremes by coupling remote sensing data and an interdisciplinary modelling approach) y ANID Fondecyt 1212071 (The catchment's

memory: understanding how hydrological extremes are modulated by antecedent soil moisture conditions in a warmer climate).

REFERENCIAS

Aucoin, F. (2015). FAdist: Distributions that are Sometimes Used in Hydrology. R package version 2.2.

Beck, H. E., Zimmermann, N. E., McVicar, T. R., Vergopolan, N., Berg, A., and Wood, E. F. (2018). Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Scientific data*, 5:180214.

Carrasco, J. (2010). Determinación gráfica y matemática de las curvas intensidad - duración - frecuencia, en cuatro estaciones pluviográficas del sur de Chile. Tesis, Universidad de Talca, Talca, Chile.

Chow, V. T., Maidment, D. R., and Mays, L. W. (1994). *Hidrología Aplicada*. Mac Graw Hill.

Cornejo, M. (2004). Determinación gráfica y matemática de las curvas intensidad - duración - frecuencia en siete estaciones pluviográficas de la región de Coquimbo. Tesis, Universidad de Talca.

Delignette-Muller, M. L. and Dutang, C. (2015). fitdistrplus: An R package for fitting distributions. *Journal of Statistical Software*, 64(4):1–34.

Dirección de Vialidad (2019). *Manual de Carreteras*. Ministerio de Obras Públicas, Santiago.

Elsebaie, I. (2012). Rainfall intensity-duration-frequency relationship for some regions in Saudi Arabia.

Espíldora, B. (1971). Estimación de curvas intensidad - duración - frecuencia mediante coeficientes generalizados. In XXI Congreso Chileno de Hidráulica. Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica.

Fick, S. E. and Hijmans, R. J. (2017). WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International journal of climatology*, 37(12):4302–4315.

Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., and 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.

Hijmans, R. J. (2019). raster: Geographic Data Analysis and Modeling. R package version 3.0-7.

Holland, M. and Wolfe, D. (1973). *Nonparametric statistical methods*.

Huffman, G. J., Bolvin, D. T., & Nelkin, E. J. (2015). Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM (IMERG) technical documentation. NASA/GSFC Code, 612(47), 2019.

Kidd, C., Becker, A., Huffman, G. J., Muller, C. L., Joe, P., Skofronick-Jackson, G., & Kirschbaum, D. B. (2017). So, how much of the Earth's surface is covered by rain gauges?. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(1), 69-78.

Kling, H., Fuchs, M., and Paulin, M. (2012). Runoff conditions in the upper Danube basin under an ensemble of climate change scenarios. *Journal of Hydrology*, 424:264–277.

Knoben, W. J., Freer, J. E., and Woods, R. A. (2019). Inherent benchmark or not? comparing nash–sutcliffe and kling–gupta efficiency scores. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(10):4323–4331.

Koutsoyiannis, D. (2004). Statistics of extremes and estimation of extreme rainfall: Ii. empirical investigation of long rainfall records/statistiques de valeurs extrêmes et estimation de précipitations extrêmes: Ii. recherche empirique sur de longues séries de précipitations. *Hydrological Sciences Journal*, 49(4).

Labra, M. (2005). Construcción gráfica y matemática de las curvas intensidad-duración- frecuencia (curvas IDF) en cinco estaciones pluviográficas de la región del biobío y cuatro estaciones pluviográficas de la región de la araucanía. Tesis, Universidad de Talca, Talca, Chile.

Luceño, A. (2006). Fitting the generalized pareto distribution to data using maximum goodness-of-fit estimators. *Computational Statistics & Data Analysis*, 51(2):904–917.

Maggioni, V., & Massari, C. (2018). On the performance of satellite precipitation products in riverine flood modeling: A review. *Journal of hydrology*, 558, 214-224.

Massari, C., Crow, W., & Brocca, L. (2017). An assessment of the performance of global rainfall estimates without ground-based observations. *Hydrology and earth system sciences*, 21(9), 4347-4361.

Minh, L., Tachikawa, Y., and Takara, K. (2006). Establishment of intensity-duraton frequency curves for precipitaton in the monsoon area of vietnam.

Moraga, J., Riquelme, C., Cárdenas, D., and Meier, C. (2015). Subestimación de los valores IDF en chile. In XXII Congreso Chileno de Hidráulica. Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica.

Pavéz, M. (2004). Determinación gráfica y matemática de las curvas intensidad - duración- frecuencia (IDF), en seis estaciones pluviográficas de la región del maule. Tesis, Universidad de Talca, Talca, Chile.

Pizarro, R., Barza, A., and Flores, J. P. (2001). Determinación de las Curvas Intensidad – Duración – Frecuencia, para 6 estaciones pluviográficas de la VII Región. Editorial Universidad de Talca MCMXCI, Talca, Chile.

Ponce, V. (1989). Engineering hydrology principles and practices. USA.

R Core Team (2019). R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.

Soto, X. (2014). Comparación de metodologías para estimar las curvas IDF en concepción. Tesis, Universidad de Concepción, Concepción, Chile.

Soto, X. and Meier, C. (2013a). Subestimación de los valores IDF en concepción. 1: Derivación completa y comparación con otras metodologías. In XXI Congreso Chileno de Hidráulica Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica.

Soto, C. (2019). Construcción de Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia en alta resolución espacial para la zona Centro-Sur de Chile (Tesis para optar al Título de Ingeniero Civil). Universidad de la Frontera, Temuco, Chile.

Stephens, M. A. (1986). Tests based on edf statistics. In *Goodness-of-fit-techniques*, pages 97–194. Routledge.

Thiemig, V., Rojas, R., Zambrano-Bigiarini, M., and De Roo, A. (2013). Hydrological evaluation of satellite-based rainfall estimates over the volta and baro-akobo basin. *Journal of Hydrology*, 499:324–338.

Thiemig, V., Rojas, R., Zambrano-Bigiarini, M., Levizzani, V., and De Roo, A. (2012). Validation of satellite-based precipitation products over sparsely gauged african river basins. *Journal of Hydrometeorology*, 13(6):1760–1783.

UNESCO (2013). Curvas intensidad - duración - frecuencia para la para las regiones metropolitanas, maule y biobío. intensidades desde 15 minutos a 24 horas. Informe técnico, PHI-LAC.

Valdés-Pineda, R., Pizarro, R., García-Chevesich, P., Valdés, J. B., Olivares, C., Vera, M., Balocchi, F., Pérez, F., Vallejos, C., Fuentes, R., et al. (2014). Water governance in chile: Availability, management and climate change. *Journal of Hydrology*, 519:2538–2567.

Venables, W. N. and Ripley, B. D. (2002). *Modern applied statistics with S-PLUS*. New York.

Wang, J., Zamar, R., Marazzi, A., Yohai, V., Salibian-Barrera, M., Maronna, R., Zivot, E., Rocke, D., Martin, D., Maechler, M., and Konis., K. (2019). *robust: Port of the S+ Robust Library*. R package version 0.4-18.2.

Zambrano-Bigiarini, M., Nauditt, A., Birkel, C., Verbist, K., and Ribbe, L. (2017). Temporal and spatial evaluation of satellite-based rainfall estimates across the complex topographical and climatic gradients of chile. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(2):1295-1320.

