

VALIDACIÓN DE LA CALCULADORA DE CURVAS SINTÉTICAS IDF EN EL CARIBE COLOMBIANO

Alexander Villamizar y Erasmo Rodríguez

Grupo de Investigación en Ingeniería de los Recursos Hídricos (GIREH), Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá, Colombia
avillamizarh@unal.edu.co y earodriguezs@unal.edu.co

RESUMEN:

El presente artículo describe los resultados de la validación de curvas IDF sintéticas en el Caribe colombiano, estimadas mediante los métodos de Chen, Vargas & Díaz-Granados, de escalamiento de la precipitación y la metodología propuesta por Díaz-Granados & Puente, incluidos en la calculadora desarrollada para estimar curvas IDF sintéticas o generalizadas en Colombia, en zonas sin información pluviográfica, pero con información pluviométrica (Villamizar et al., 2018). Para ello se han comparado los valores de intensidades máximas obtenidos a partir del uso de la calculadora y el empleo de los cuatro métodos, para duraciones de 15, 30, 60, 120 y 360 minutos, con los valores de intensidades de nueve curvas IDF construidas de forma tradicional (utilizando registros pluviográficos), reportadas por Torres et al., 2021. Con el fin de comparar los resultados obtenidos mediante el uso de la calculadora y las curvas IDF derivadas de forma tradicional, se utilizan dos métricas de desempeño (error cuadrático medio (RMSE) y BIAS). Dentro de los análisis realizados se estandariza la métrica de RMSE y se agrupan los resultados en dos categorías i) intensidades menores o iguales a una hora y ii) intensidades mayores a una hora. Adicionalmente, mediante el empleo de gráficas de violín, diagramas de cajas y patillas, gráficas de dispersión, figuras comparativas de curvas IDF con sus envolventes, y cálculos estadísticos como el coeficiente de variación, se puede concluir que para duraciones cortas ($d \leq 1$ h), la metodología con el mejor desempeño es Chen. Para duraciones mayores de una hora, la metodología con el mejor desempeño es Vargas y Díaz-Granados. En ambos casos los RMSE y BIAS corresponden respectivamente a 0.22, -1.14 y 0.17, 3.41, lo que indica el buen desempeño de la calculadora desarrollada y su utilidad como herramienta de apoyo al diseño hidrológico.

ABSTRACT:

This article presents the results of the validation of synthetic IDF curves in the Colombian Caribbean region, estimated using the methods of Chen, Vargas & Díaz-Granados, scaling of precipitation, and the methodology proposed by Díaz-Granados & Puente, included in the synthetic IDF Calculator (Villamizar et al., 2018). For doing this, a comparison of maximum intensities obtained from the four methods in the Calculator for durations of 15, 30, 60, 60, 120 and 360 minutes and the intensities from nine IDF curves constructed from pluviographic records, as reported by Torres et al., 2021, has been done. Two performance metrics (root mean square error (RMSE) and BIAS) are used to compare the results from the Calculator and the IDF curves derived from observations. The RMSE metric is standardized and the results are grouped into two categories: i) intensities for less than or equal to one hour, and ii) intensities greater than one hour. Additionally, through the use of violin plots, box plots, scatter plots, comparative plots of IDF curves with their envelopes, and statistical calculations such as the coefficient of variation, it can be concluded that for short durations ($d \leq 1$ h), the methodology with the best performance is Chen. For durations longer than one hour the methodology with the best performance is Vargas and Diaz-Granados. In both cases the RMSE and BIAS correspond respectively to 0.22, -1.14 and 0.17, 3.41, which indicates the good performance of the developed calculator and its usefulness as a support tool for hydrological design.

PALABRAS CLAVES: curvas IDF; calculadora; validación; Caribe colombiano.

INTRODUCCIÓN

Las curvas de intensidad-duración-frecuencia (IDF) sintetizan la información de tormentas extremas de corta duración en una estación pluviográfica y son fundamentales en el diseño hidrológico. La obtención de estas curvas se basa en el análisis de pluviogramas, y ante la carencia de estos, se recurre a métodos de estimación de curvas IDF sintéticas o generalizadas. A este respecto, Villamizar et al. (2018) desarrollaron la calculadora de curvas IDF sintéticas para Colombia, con base en información pluviográfica de 106 estaciones en el país. Teniendo en cuenta que nuevas curvas IDF han sido producidas/actualizadas en recientes estudios en el Caribe colombiano (Torres et al., 2021), esta nueva información brinda la oportunidad de validar el uso de la calculadora y de cada una de las cuatro metodologías de estimación de las IDF generalizadas (Chen (1983), Vargas & Díaz-Granados (V&DG) (1998), escalamiento de la precipitación (Pulgarín et al., 2009) y Díaz-Granados & Puente (DG-P) (2008)), disponibles en la herramienta, mediante el uso de un conjunto de datos totalmente independiente. Cabe destacar que el Caribe colombiano representa aproximadamente el 22% de la población de Colombia y genera alrededor del 15% del producto interno bruto (Aguilera et al., 2017). Por consiguiente, es una de las regiones con gran importancia socioeconómica en el territorio nacional, en donde el agua juega un papel muy importante, y en donde solo se cuenta actualmente con 14 estaciones con curvas IDF actualizadas al año 2010.

ÁREA DE ESTUDIO Y MÉTODOS

En la Figura 1 se presenta la localización de las nueve estaciones con nuevas curvas IDF (círculos con número interno), y de 14 estaciones con curvas IDF utilizadas para desarrollar la calculadora (cuadrados verdes con punto central). Adicionalmente, la Figura 1 muestra en colores el mapa de precipitación promedio anual, con claros contrastes, de baja precipitación en la zona norte (Departamento de La Guajira < 500 mm/año) e incrementos de la precipitación hacia el interior del país, con valores que pueden alcanzar más de 4000 mm anuales, al sur de la zona de estudio. En cuanto a las características de las tormentas extremas en el área seleccionada, en general presentan duraciones cortas, entre 2 y 4 h, con precipitaciones totales entre 15 y 50 mm, ocurriendo después de medio día (ver Rodríguez y Ávila en este Congreso).

Las curvas IDF de las estaciones utilizadas en la validación de la calculadora fueron obtenidas a partir del procesamiento de información descrito en detalle por Torres et al. (2021), y brevemente resumido a continuación: i) identificación de las quince mayores tormentas de cada año en cada estación y sus correspondientes pluviogramas, previamente escaneados; ii) digitalización de los mismos mediante el uso de la herramienta semiautomática HIDFUN (Fuentes et al. 2018); y iii) aplicación de la herramienta “IDFtool” (<https://github.com/dazamora/IDFtool>), para el análisis de frecuencias de intensidades máximas para duraciones de 15, 30, 60, 120 y 360 minutos, y periodos de retorno de 2, 3, 5, 10, 25, 50 y 100 años, a través del ajuste de la distribución de Gumbel.

La calculadora de curvas IDF sintéticas para Colombia (Figura 2), desarrollada con los propósitos de estimar curvas IDF en sitios no instrumentados, o con información escasa, útil para apoyar el diseño hidrológico, incluye estimaciones de las curvas IDF sintéticas o generalizadas a través de los métodos de Chen (1983), Vargas & Díaz-Granados (V&DG) (1998), escalamiento de la precipitación (Pulgarín et al., 2009), y la técnica del proceso máximo estable (solo disponible para la región Andina), los cuales, aparte de las coordenadas y altitud del sitio de interés, utilizan información pluviométrica para estimar las IDF. El lector interesado en consultar el detalle de cada uno de estos métodos es remitido a Villamizar et al. (2018). Como parte del trabajo aquí reportado se incluyó en la calculadora un nuevo método de estimación de las IDF, propuesto por Díaz-Granados & Puente (DG-P) (2008), cuyo procedimiento se describe brevemente a continuación. El método DG-P es un procedimiento que se basa en el ajuste de la distribución con el método de Gumbel, estimando los

parámetros con momentos ponderados con probabilidad (MPP) y aplicado para dos casos: 1) curvas IDF o profundidad-duración-frecuencia (PDF) multihorarias de 1 a 60 horas de duración t , para las cuales se utilizaron 35 estaciones pluviográficas ubicadas en las zonas hidrográficas del Alto Magdalena, Atrato, Catatumbo, Cauca, Saldaña, Magdalena Medio y Sogamoso, con 3 estaciones diferentes usadas para la validación; y 2) curvas IDF o PDF para duraciones entre 10 minutos y 2 horas, utilizando 157 curvas IDF de diversas fuentes y con distintos formatos de presentación, ubicadas en las mismas zonas hidrográficas del caso 1, así como también en la parte Baja del Magdalena, Patía, San Juan, Tomo, Cesar, Ciénaga Grande, Guajira, Guaviare, León, Putumayo, Sinú, Meta, Micay, Mira y Nechí, utilizando dos estaciones diferentes para su validación. Para este último caso, se requiere información extra, como precipitación diaria, precipitación media anual y número promedio de días al año con lluvias. En síntesis, para el caso 1 la metodología se basa en la estimación de las curvas PDF, determinando la profundidad máxima de precipitación de las series anuales, aplicando la distribución de Gumbel con MPP para las estaciones; posteriormente se estima, para cada duración (1 a 24, 36, 48 y 60 horas), el momento convencional de orden 0 (M_0), orden 1 (M_1) y la relación M_1/M_0 , descritas en las ecuaciones 1 a 3 y propuestas por Greenwood et al (1979), que permiten calcular la profundidad de la precipitación máxima para una duración t y un periodo de retorno T (X_T):

$$M_{0diario} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad [1]$$

$$M_{1diario} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \frac{n-i}{n-1} \quad [2]$$

$$X_T = M_0 - \left[0.5772 * \frac{(M_0 - 2M_1)}{\ln 2} \right] - \frac{(M_0 - 2M_1)}{\ln 2} \ln \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right] \quad [3]$$

donde n el número de datos históricos y la variable x_i el valor de la precipitación máxima diaria i ordenada de menor a mayor.

Es importante señalar que para duraciones mayores o iguales a 1 hora se debe calcular M_{0t} en función del momento de orden cero diario ($M_{0diario}$), la precipitación media anual (P_A), el número promedio anual de días con lluvia (N), la altitud del lugar (E), acompañados de los coeficientes k_1 , k_2 , k_3 y k_4 . Por tanto, $M_{1t} = (M_{1diario}/M_{0diario})M_{0t}$. Finalmente, se realiza una prueba de bondad para cada estación considerada en el caso 1. La metodología del caso 2, tiene procedimientos similares a los anteriormente descritos, con las siguientes salvedades: 1) se determina M_0 , M_1 y M_1/M_0 para cada duración (10, 20, 30, 40, 50, 60, 120, 240 y 360 minutos) y estación a partir de las curvas IDF disponibles, transformándolas en curvas PDF. Para esto, Díaz-Granados & Puente (2008), proponen unas tablas que contienen diferentes valores de los parámetros para calcular M_0 con una duración igual a 60 minutos y reemplazarla en la ecuación 4.

$$M_{0,60min} = \alpha_1 M_{0diario} + \alpha_2 M_{1diario} + \alpha_3 (M_{0diario} - M_{1diario}) + \alpha_4 P_A + \alpha_5 N + \alpha_6 \frac{P_A}{N} + \alpha_7 E + \alpha_8 \quad [4]$$

Para las demás duraciones se proponen coeficientes establecidos para estimar $M_{0t} = (M_{0diario}/M_{1diario})M_{0,60min}$. Para luego estimar M_{1t} .

Por otra parte, para realizar la validación y análisis de los resultados de las estimaciones de las IDF mediante la aplicación de las cuatro metodologías disponibles en la calculadora de IDF sintéticas, y con base en los datos de las IDF reales, se han utilizado dos métricas de desempeño, que incluyen el error cuadrático medio (RMSE) y el BIAS, cuyas formulaciones se presentan en las ecuaciones 5 y 6, respectivamente.

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(I_i - I_{i\text{calc}})^2}{N}} \quad [5]$$

$$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^N (I_i - I_{i\text{calc}})}{N} \quad [6]$$

En donde I_i es la intensidad de precipitación estimada para la duración i de cada estación, aplicando las diferentes metodologías de la calculadora, en mm/h, $I_{i\text{calc}}$ es la intensidad de precipitación real en mm/h y N es el número de los periodos de retorno analizados para cada duración, que para este estudio son siete.

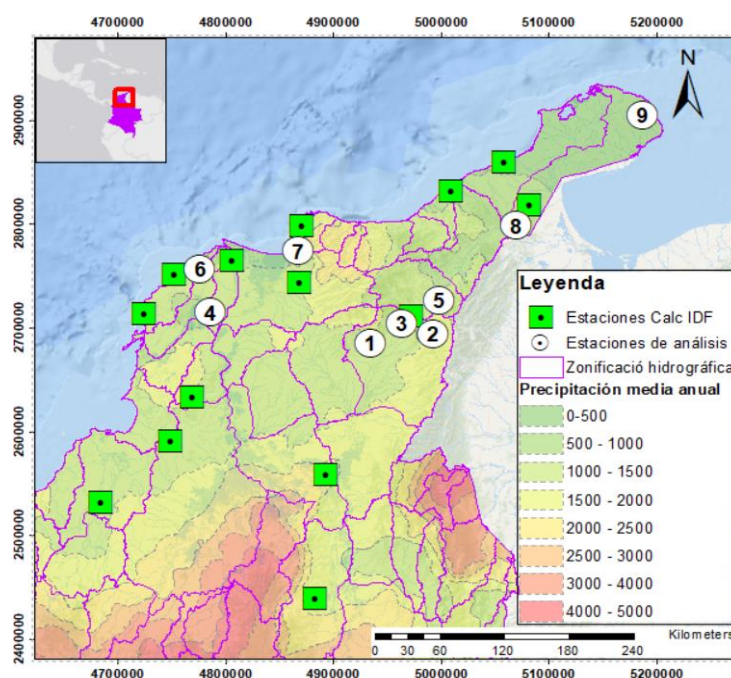


Figura 1.- Zona de estudio en el Caribe colombiano mostrando el mapa de precipitación promedio anual y la localización de las estaciones pluviográficas para validación y las estaciones utilizadas para la construcción de la calculadora de curvas IDF sintéticas.

Figura 2.- Página inicial de la Calculadora de Curvas IDF Generalizadas.

Con el fin de apoyar los análisis, y para facilitar la interpretación de los resultados, se han agrupado las duraciones en dos categorías: i) menores o iguales a una hora (15, 30 y 60 min) y ii)

mayores a una hora (120 y 360 min). Adicionalmente, la métrica de RMSE, se ha estandarizado para facilitar la comparación de los resultados entre estaciones y entre metodologías.

De otra parte, y para cuantificar la dispersión de los resultados se ha calculado el coeficiente de variación (Cv) de los errores en las nueve estaciones investigadas para cada metodología analizada, calculando el promedio del Cv para las dos categorías de duración investigadas. Igualmente, los resultados se han agrupado en cinco categorías de RMSE, considerando previamente un análisis de frecuencia de los errores para todas las duraciones y metodologías analizadas, así: muy buenos, entre 0 y 0.12, buenos entre 0.12 y 0.23, regular entre 0.23 y 0.34, malo entre 0.34 y 0.45 y muy malo, valores por encima de 0.45.

Se han elaborado gráficas de intensidades estimadas y las reales (las cuales se pueden consultar en: <https://drive.google.com/drive/folders/1UrKINXr3bDf6QexMOBPY7iV0k2MAuWRj?usp=sharing>), comparando las intensidades estimadas mediante las cuatro diferentes metodologías y las calculadas de las 9 estaciones, para cada duración y periodo de retorno, en donde los puntos planteados deberían corresponder a una línea a 45 grados. Se evidencia una muestra de dichas gráficas en la Figura 3. Adicionalmente, y para propósitos de comparación se han elaborado las curvas IDF sintéticas para cada estación, periodo de retorno y metodología, que se comparan de forma visual con la envolvente de todos los métodos propuesta por la calculadora y las curvas IDF reales, tal como se ilustra en la Figura 4. Las demás gráficas pueden consultarse en: <https://drive.google.com/drive/folders/1dsHUud-OhZCjpP6odogZPXyCoMED50Lk?usp=sharing>. Finalmente, se han producido gráficos de violín y diagramas de cajas, para identificar de forma visual el comportamiento de la concentración de los datos para la métrica de RMSE.

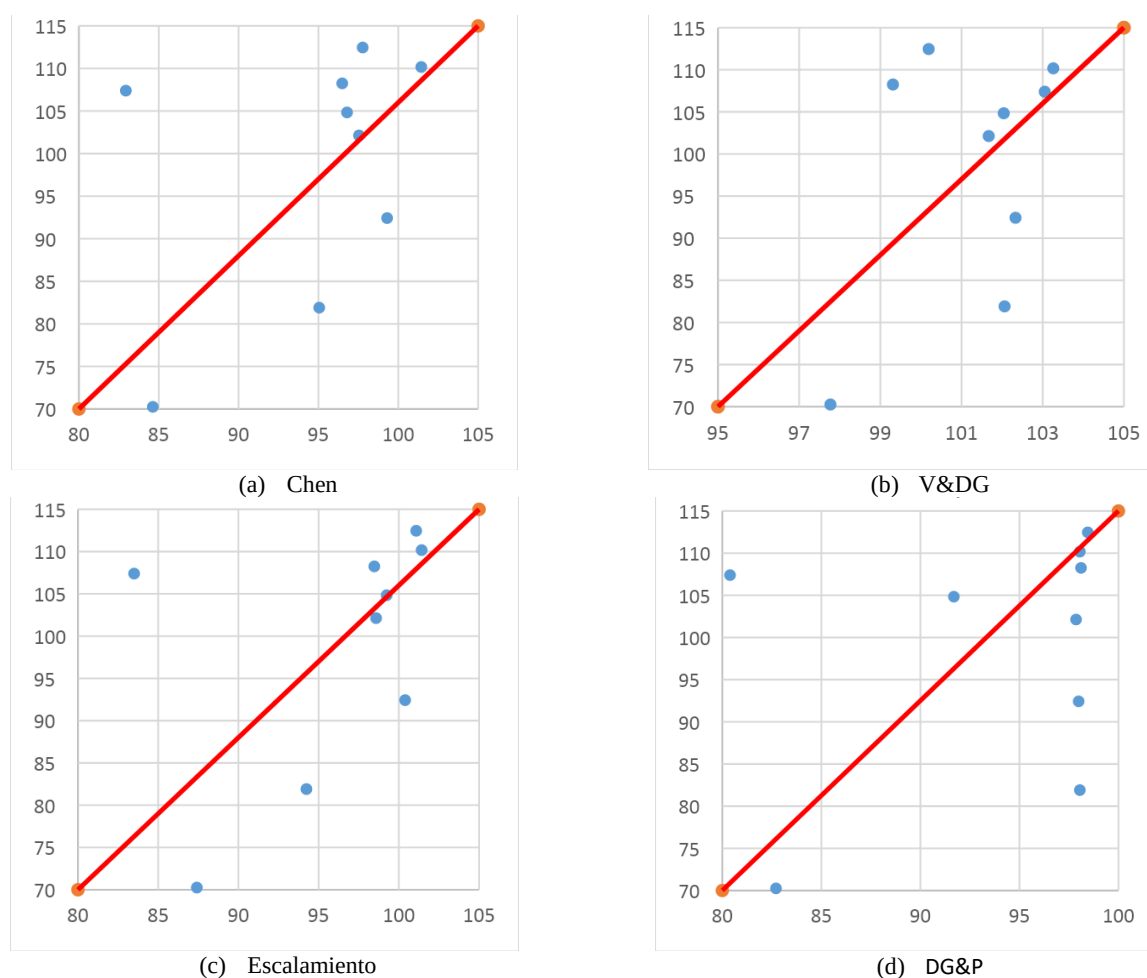


Figura 3.- Comparación intensidades de precipitación estimadas para cada metodología contra las calculadas. Tr = 2 años y duración de 15 min.

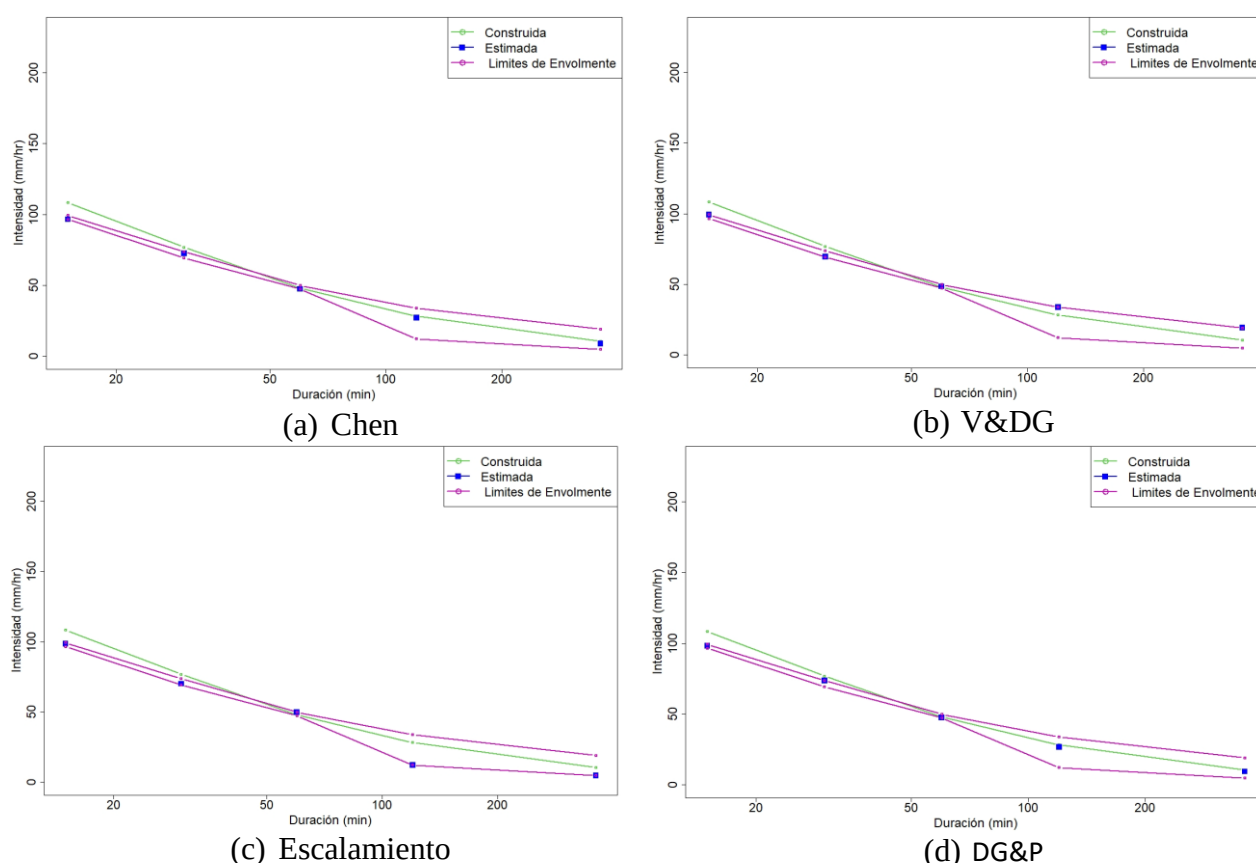


Figura 4.- Comparación de curvas IDF calculadas y estimadas por cada metodología, para $T_r = 2$ años, junto con la envolvente propuesta por la calculadora para la estación 1 (VILLA ROSA 28035010).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 1, se presentan los resultados por estación con los valores obtenidos de la métrica RMSE, para cada una de las metodologías utilizadas de la calculadora. Los resultados obtenidos indican que, para el RMSE, el mayor C_v (mayor dispersión de los errores) se presenta para el método de Díaz-Granados & Puente (DG-P) con valores de 74.3%, para duraciones menores o iguales a 1 hora ($d \leq 1$ h) y para el método de Chen de 79.8%, para duraciones mayores a 1 hora ($d > 1$ h). De otra parte, la metodología de Vargas & Díaz-Granados (V&DG) obtiene el menor C_v , con un valor de 46.4% para $d \leq 1$ h, y el método de escalamiento de la precipitación un valor de 40.4% para $d > 1$ h. Al profundizar en los análisis se obtiene que el método de Chen para las estaciones 8 y 9 (localizadas al norte y oriente del Departamento de La Guajira) presenta las mayores diferencias para duraciones iguales o mayores a 1 h y para todos los periodos de retorno. Para las duraciones cortas y periodos de retorno de 2, 3 y 5 años, las diferencias entre intensidades reales y estimadas son mixtas entre metodologías. En general, para todos los métodos, la estación 2 (localizada en la parte norte de la cuenca alta del río Cesar) para duraciones cortas y los periodos de retorno de 10, 25, 50 y 100 años, y las estaciones 4 y 6 (localizadas en el Departamento del Atlántico) para duraciones cortas y todos los periodos de retorno, son las que presentan mayor dispersión de los errores. Lo anterior, posiblemente se deba al comportamiento de los microclimas en las zonas mencionadas, producto del relieve.

Con relación a los resultados agrupados por metodología, en la Figura 5, se evidencia claramente que para la metodología de Chen se obtienen resultados entre buenos y muy buenos para la mayoría de las estaciones y para ambos grupos de duraciones (66.7 % en $d \leq 1$ h y 77.8% en $d > 1$ h). También, es importante señalar que la metodología de V&DG, para el 88.9% de las estaciones obtiene resultados buenos en las $d > 1$ h, pero que para las duraciones cortas solo el 11.1% de las

estaciones presenta resultados buenos o muy buenos. Con relación a la metodología de escalamiento, se obtiene que para las duraciones cortas el 44.4% de las estaciones obtiene resultados buenos y muy buenos, mientras que para las duraciones largas, solo el 22.2% de las estaciones obtiene resultados buenos o muy buenos. Analizando la nueva metodología incluida en la calculadora, (DG-P), se observa que para las $d \leq 1$ h presenta un 22.2% muy bueno y 33.3% en bueno; en las $d > 1$ h el porcentaje de muy bueno mejora (44.4%) y el de bueno se mantiene en 33.3%.

Tabla 1.- Síntesis de resultados de la métrica RMSE para las diferentes estaciones y metodologías

MÉTRICA: RMSE EST. CONSTRUIDA VS	CHEN		V&DG		Escalamiento		DG&P	
	Menor o igual a 1 h	Mayor a 1 hr	Menor o igual a 1 h	Mayor a 1 hr	Menor o igual a 1 h	Mayor a 1 hr	Menor o igual a 1 h	Mayor a 1 hr
1. VILLA ROSA 28035010	0,164	0,091	0,235	0,134	0,101	0,239	0,079	0,123
2. RINCON EL 28025020	0,357	0,036	0,096	0,183	0,093	0,174	0,218	0,070
3. CALLAO EL 28035020	0,132	0,059	0,282	0,150	0,270	0,209	0,143	0,102
4. NORMAL MANATI - AUT 29035080	0,205	0,056	0,522	0,157	0,300	0,234	0,316	0,081
5. URUMITA 28015070	0,095	0,111	0,244	0,132	0,179	0,248	0,057	0,147
6. JUAN DE ACOSTA 29045110	0,224	0,105	0,547	0,141	0,375	0,263	0,550	0,095
7. YE LA 15015020	0,177	0,173	0,310	0,167	0,154	0,287	0,176	0,185
8. ESC AGRICOLA CARRAIPIA 15085030	0,318	0,378	0,523	0,181	0,525	0,489	0,728	0,421
9. NAZARETH 15085020	0,311	0,334	0,518	0,254	0,376	0,436	0,422	0,307
PROMEDIO	0,220	0,149	0,364	0,167	0,264	0,287	0,299	0,170
COEFICIENTE DE VARIACIÓN	51,5%	79,8%	46,4%	50,0%	58,7%	40,4%	74,3%	69,1%

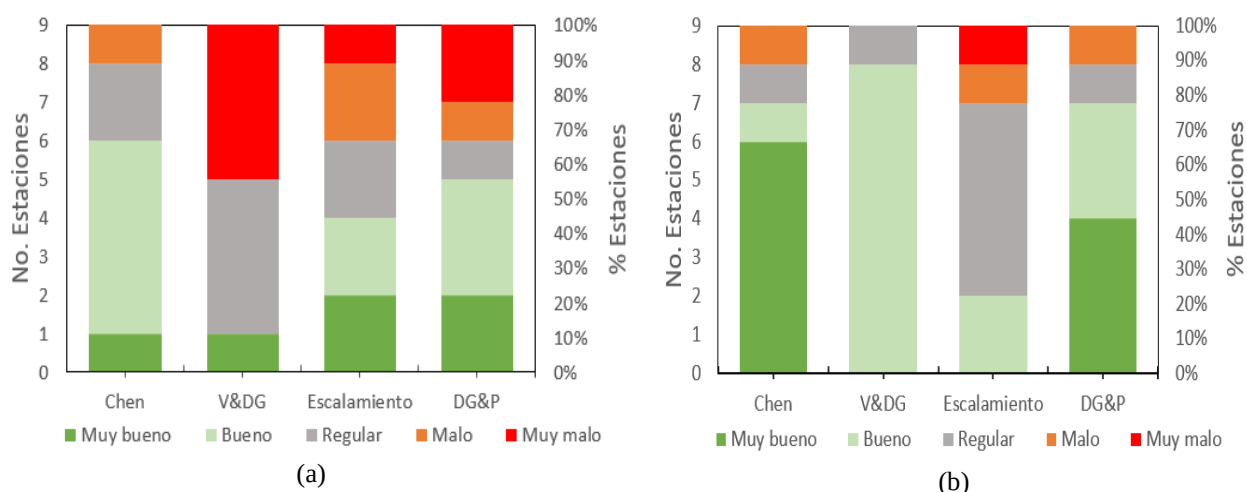


Figura 5.- Métrica estandarizada para el RMSE para a) duraciones menores o iguales a 1 h y b) duraciones mayores a 1 h.

En la Figura 6 se muestran los valores para la métrica RMSE en diagramas de violín, integrando el diagrama de cajas, para cada metodología y duraciones menores o iguales a 1 hora. Nótese que con el método de Chen se tiene una mayor concentración de puntos en valores bajos de RMSE, cercanos o menores a 0.2. Además, el diagrama de cajas contenido en el gráfico de violín del método de Chen, corrobora que la mayoría de valores están dentro del cuartil 1 y 3, cuya proporción mayor de los resultados están en el cuartil 1. Para las demás metodologías es evidente que los valores del RMSE están muy dispersos y por ende tienen formas más alargadas en el gráfico de violín, y los respectivos

diagramas de cajas, comparándolos con el método de Chen, que tiene una forma más achatada, siendo el que muestra los mejores resultados.

De manera similar, la Figura 7 logra evidenciar que para duraciones mayores a 1 h, la metodología de V&DG es la que tiene mejores resultados, con la forma de violín más achatada y el diagrama de cajas con la mayoría de datos concentrados entre el cuartil 1 y 3, menores a 0.2 de RMSE. Es importante destacar que los métodos de Chen y DG&P, muestran valores de RMSE concentrados entre 0 y 0.2, pero la forma del violín es más alargada, debido a que tiene algunas estaciones con valores de RMSE superiores a 0.3.

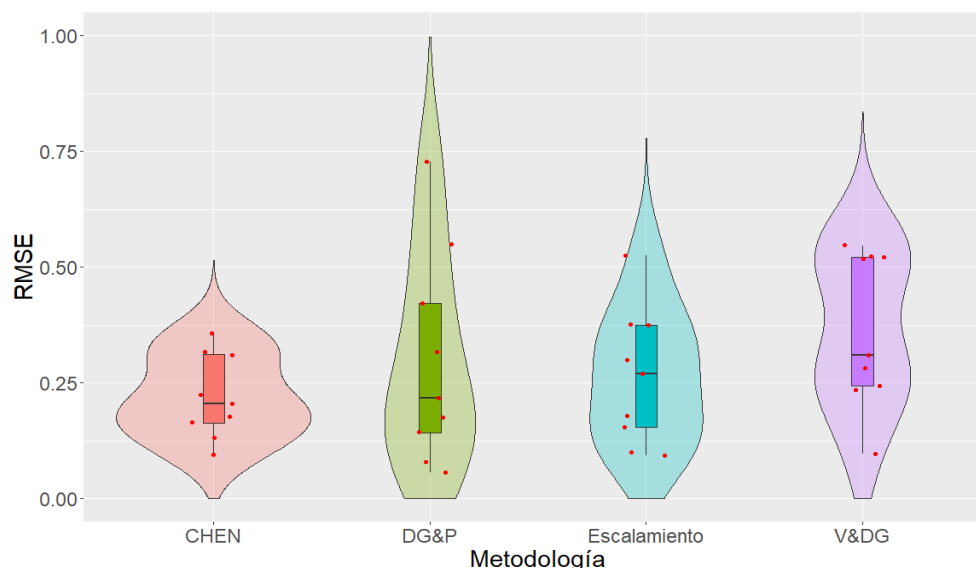


Figura 6.- Diagramas de Violín para la métrica RMSE en cada metodología y duraciones menores o iguales a 1 h.

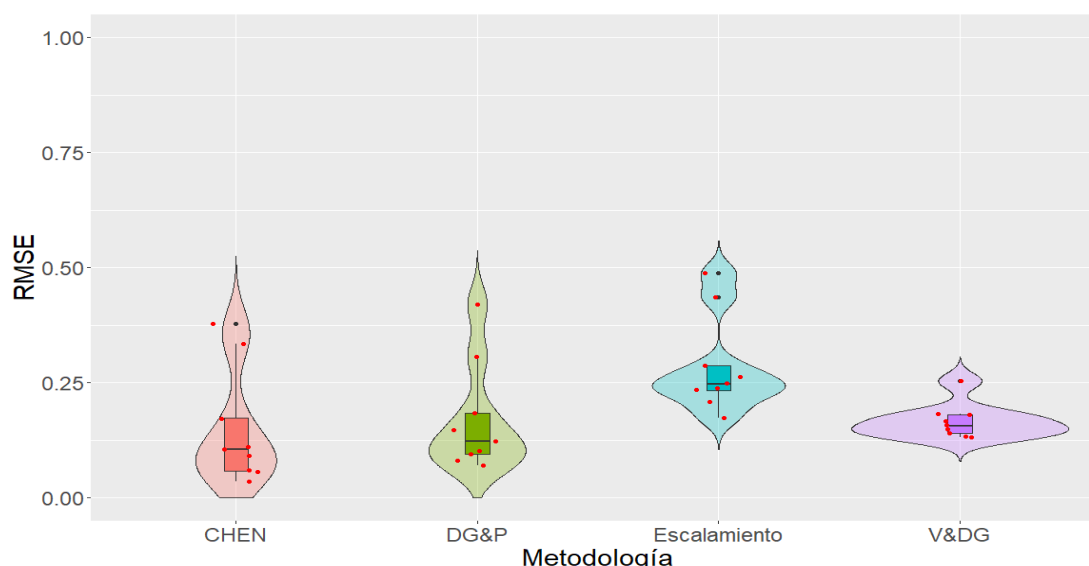
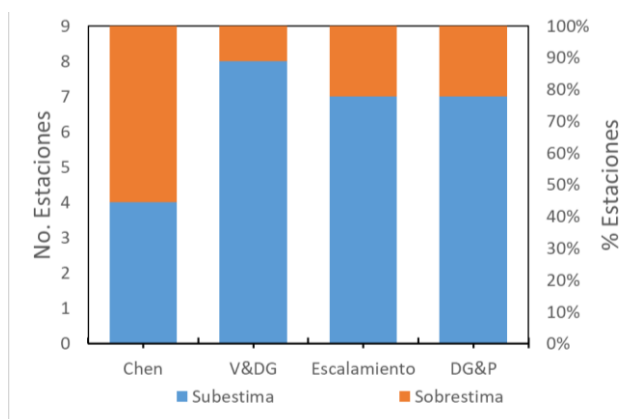


Figura 7.- Diagramas de Violines para la métrica RMSE en cada metodología y duraciones mayores a 1 h.

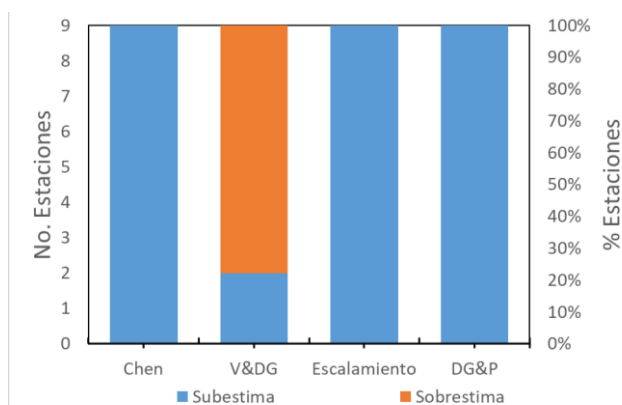
Los resultados de la métrica de BIAS (Figura 8), basados en los datos de la Tabla 2, indican que todas las metodologías de estimación de curvas IDF sintéticas investigadas, con excepción del método de Chen para $d \leq 1$ hr con $\text{BIAS} = +55.6\%$ y de la metodología de V&DG para $d > 1$ h con $\text{BIAS} = +77.8\%$, subestiman los valores de intensidades de las curvas IDF reales.

Tabla 2.- Síntesis de resultados de la métrica BIAS para las diferentes estaciones y metodologías

MÉTRICA: BIAS. CONSTRUCCIÓN VS	CHEN				V&DG				Escalamiento				DG&P			
Estación / Grupos de duración	Menor o igual a 1 h	Clasif	Mayor a 1 hr	Clasif	Menor o igual a 1 h	Clasif	Mayor a 1 hr	Clasif	Menor o igual a 1 h	Clasif	Mayor a 1 hr	Clasif	Menor o igual a 1 h	Clasif	Mayor a 1 hr	Clasif
VILLA ROSA 28035010	3,140	Sobre	-3,662	Sub	-9,868	Sub	4,830	Sobre	-3,272	Sub	-10,589	Sub	-0,463	Sub	-4,837	Sub
RINCON EL 28025020	14,435	Sobre	-1,064	Sub	2,126	Sobre	7,988	Sobre	3,824	Sobre	-7,544	Sub	9,026	Sobre	-2,730	Sub
CALLAO EL 28035020	1,143	Sobre	-2,549	Sub	-12,099	Sub	6,420	Sobre	-11,639	Sub	-9,081	Sub	-5,595	Sub	-4,366	Sub
NORMAL MANATI - AUT 29035080	-9,046	Sub	-2,300	Sub	-21,948	Sub	6,492	Sobre	-12,289	Sub	10,373	Sub	13,425	Sub	-3,110	Sub
URUMITA 28015070	2,171	Sobre	-4,554	Sub	-9,813	Sub	4,489	Sobre	-7,234	Sub	11,017	Sub	-1,730	Sub	-5,942	Sub
JUAN DE ACOSTA 29045110	-9,390	Sub	-4,298	Sub	-21,736	Sub	5,032	Sobre	-14,554	Sub	11,686	Sub	21,878	Sub	-3,113	Sub
YE LA 15015020	5,563	Sobre	-6,464	Sub	-6,990	Sub	2,603	Sobre	0,013	Sobre	12,508	Sub	3,800	Sobre	-6,599	Sub
ESCA AGRICOLA CARRAIPA 15085030	-	Sub	-	Sub	-21,121	Sub	-5,389	Sub	-22,806	Sub	21,210	Sub	30,782	Sub	-	Sub
NAZARETH 15085020	-4,857	Sub	-11,661	Sub	-10,841	Sub	-1,745	Sub	-6,578	Sub	17,666	Sub	-9,575	Sub	-9,853	Sub
PROMEDIO	-1,136		-5,834		-12,477		3,413		-8,282		12,408		-7,847		-6,405	
	Sub (%) Sobre (%)	44,4 55,5	Sub (%) Sobre (%)	100,0 0,00	Sub (%) Sobre (%)	88,88 11,11	Sub (%) Sobre (%)	22,2 77,7	Sub (%) Sobre (%)	77,77 22,22	Sub (%) Sobre (%)	100,0 0,00	Sub (%) Sobre (%)	77,77 22,22	Sub (%) Sobre (%)	100 0,0



(a)



(b)

Figura 8.- Métrica de BIAS para a) duraciones menores o iguales a 1 h y b) duraciones mayores a 1h.

Al realizar la comparación visual entre las curvas IDF calculadas y estimadas con los diferentes métodos, teniendo en cuenta la envolvente propuesta por la calculadora para cada estación (ver Figura 4 y anexos digitales), se observa que en la mayoría de las estaciones y periodos de retorno, la envolvente es inferior a las intensidades reales para las duraciones de 15, 30 y 60 min; y para seis estaciones, a partir del periodo de retorno de 10 años hacia adelante, la envolvente se encuentra por fuera de los valores reales. Se debe anotar que la envolvente se estima con las intensidades de precipitación máximas y mínimas de todas las metodologías incluidas en la calculadora, lo cual evidencia un aspecto a mejorar en dicha herramienta. Dado que en general, los resultados de varias metodologías no son muy diferentes (lo cual es ideal), la envolvente brinda diferencias entre las intensidades calculadas por los diferentes los métodos bastante pequeñas, como se ilustra en la Figura 3, en donde se muestra que para duraciones menores a 1 hora se tiene una envolvente delgada y para duraciones mayores a 1 hora más gruesa. En concordancia con lo mencionado anteriormente, al presentar una dispersión alta, la envolvente no alcanza a cubrir los valores reales de las estaciones 8 y 9 en casi todos los casos de periodos de retorno y duraciones. También, las envolventes de las estaciones 2, 4 y 6, no tienen un rango amplio en las duraciones menores a 1 hora y cualquier periodo de retorno.

CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos, en general y para el Caribe colombiano las cuatro metodologías de estimación de curvas IDF sintéticas investigadas brindan resultados comparables y tienden a subestimar las intensidades reales. De las cuatro metodologías investigadas e incluidas en la calculadora de curvas IDF sintéticas desarrollada para Colombia, la metodología de Chen proporciona los mejores resultados en la región Caribe colombiana, tanto para duraciones cortas (≤ 1 h) como para duraciones largas (> 1 h), seguida de la metodología V&DG. Sin embargo, la dispersión de los resultados depende de si las duraciones investigadas son cortas o largas y de la metodología empleada, pues a pesar de que la metodología de Chen presenta los mejores resultados, se observa gran dispersión de estos.

Las gráficas comparativas de las curvas IDF construidas contra las estimadas, considerando la envolvente propuesta por la calculadora, evidenciaron que se debe explorar otros métodos para proponer una envolvente más robusta, con el fin de ampliar el margen de error, especialmente en las duraciones cortas, mejorando la herramienta de la calculadora.

Teniendo en cuenta que para el desarrollo original de cada uno de los métodos empleados en la calculadora, se utilizaron un conjunto de estaciones para calibrar y otro para validar los métodos, los resultados obtenidos en este estudio muestran la validez de esta herramienta, ya que se ha efectuado una validación completamente independiente, utilizando datos que no existían antes del desarrollo de la versión 1 de la calculadora, lo cual motiva al mejoramiento de la misma para fines diversos, incluyendo por ejemplo el diseño hidrológico de estructuras hidráulicas de diferente tipo.

Además, es importante señalar que al contar con un número cada vez mayor de estaciones con curvas de IDF disponibles, se obtendrán mejores resultados, al actualizar cada uno de los insumos utilizados por las distintas metodologías incluidas en la calculadora.

REFERENCIAS

Aguilera, M., Reina, Y., Orozco, A., Yabrudy, J., & Barcos, R. (2017). “Evolución socioeconómica de la región Caribe colombiana entre 1997 y 2017”. Centro Regional de Estudios Económicos-CREE - Banco de la República en Cartagena. Documentos de Trabajo Sobre Economía Regional y Urbana. Núm. 258. Agosto, 2017. pp. 1-37.

- Chen, C-I.** (1983). Rainfall intensity-duration-frequency formulas. *Journal of Hydraulic Engineering*, 109(12): 1603-1621.
- Díaz-Granados, M., Puente, X.** (2008). Estimación de curvas intensidad-duración-frecuencia a partir de información pluviométrica. XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Cartagena, Colombia.
- Fuentes, C., Rodríguez, E., & Villareal, E.** (2018). HIDFUN una herramienta para la extracción y análisis de pluviogramas. XXVIII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA BUENOS AIRES, ARGENTINA, SEPTIEMBRE DE 2018.
- IDEAM-UNAL.** (2016). Estudio de Actualización y Análisis Comparativo de las Curvas Intensidad, Duración y Frecuencia Disponibles en el IDEAM. Convenio Interadministrativo No. 113 de 2016. Bogotá D.C.
- Pulgarin, E., & Poveda, G.** (2008). Estimación de curvas IDF basadas en las propiedades de escala de la lluvia. XVIII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología. Bogotá: Sociedad Colombiana de Ingenieros.
- Torres, L., Agudelo, L., Rincón, F., Mercado, I., Guzmán, D., Bayona, J., Cuavas, J., Bonilla, A., Ochoa, N., Villamizar, A., Rodríguez, E., Velandia, K., Reyes, G.** (2021). Un aporte a la caracterización de lluvias extremas en el Caribe Colombiano a través de la construcción de curvas intensidad- duración- frecuencia. XXIV SEMINARIO NACIONAL DE HIDRÁULICA E HIDROLOGÍA. BARRANQUILLA, 20 AL 24 DE SEPTIEMBRE, 2021.
- Vargas M, R. Díaz-Granados O., M.** (1998) Curvas Sintéticas Regionalizadas de Intensidad-Duración-Frecuencia para Colombia. In: XIII Seminario de Hidráulica e Hidrología, Sociedad Colombiana de Ingenieros. Cali, agosto 1998.
- Villamizar, A., Rodríguez, E., & Villarreal, E.** (2018). Desarrollo de una Calculadora de Curvas IDF Generalizadas para Colombia. XXIII SEMINARIO NACIONAL DE HIDRÁULICA E HIDROLOGÍA IBAGUÉ, 15 AL 17 DE AGOSTO DE 2018.