



## XXIII SEMINARIO NACIONAL DE HIDRÁULICA E HIDROLOGÍA

IBAGUÉ, 15 AL 17 DE AGOSTO DE 2018

### DESARROLLO DE UNA CALCULADORA DE CURVAS IDF GENERALIZADAS PARA COLOMBIA

*Alexander Villamizar, Erasmo Rodríguez, Edgar Villarreal*

*Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá, Colombia*

*avillamizarh@unal.edu.co earodriguezs@unal.edu.co, elvillareal@unal.edu.co*

#### RESUMEN:

Las curvas intensidad-duración-frecuencia (IDF), deducidas a partir de registros de estaciones pluviográficas, sintetizan a nivel puntual la información de intensidades máximas para tormentas de corta duración. Su uso es extensivo y constituye el fundamento del diseño hidrológico de muchas estructuras.

En sitios en donde no se cuenta con estaciones pluviográficas, existe la posibilidad de emplear metodologías locales e importadas que permiten efectuar la estimación de curvas IDF sintéticas o generalizadas. Estas metodologías hacen uso solo de datos pluviométricos, de estos en combinación con información de ubicación y altitud de las estaciones, o utilizan técnicas de escalamiento de la precipitación.

Como una contribución a la práctica ingenieril, se ha desarrollado de forma preliminar para algunas regiones en Colombia una calculadora de curvas IDF generalizadas, como herramienta de apoyo para diseñadores y consultores. En el presente artículo se describen los métodos utilizados y los resultados obtenidos, así como las ventajas del uso de la calculadora.

#### ABSTRACT:

The intensity-duration-frequency (IDF) curves, obtained from pluviographic records, summarize, for a particular location, the maximum intensities for short duration storms. The use of the IDF curves is vast and it is the basis for the hydrological design of different structures.

In locations with lack of pluviographic records, it is possible to apply local and foreign methodologies to estimate the so-called synthetic or generalized IDF curves. These methodologies can make use of only pluviometric information, a combination of this data with information of geographic location and altitude, or can apply the scaling properties of the rainfall.

As a contribution to the engineering practice in Colombia, we have developed preliminarily, and for some regions of the country, a generalized IDF curves calculator, as a tool for designers and consultants. In this article we describe the methods

Mayor Información



implemented, the results obtained and we discuss the advantages of the use of the calculator.

**PALABRAS CLAVE:** Calculadora, curvas IDF generalizadas, Colombia

## INTRODUCCIÓN

La ingeniería hidráulica e hidrológica utiliza ampliamente las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) para el diseño de estructuras de control de escorrentía e inundaciones (Madsen, Mikkelsen, Rosbjerg, & Harremoës, 2002). Las curvas IDF básicamente establecen la intensidad promedio de la lluvia en un intervalo dado de duración, generalmente corto, para diferentes periodos de retorno (Langousis & Veneziano, 2007), sintetizando la información de precipitaciones extremas en un sitio particular. La forma tradicional de obtener estas curvas es a través de un análisis de frecuencias (Chow, Maidment, & Mays, 1988), con base en registros de estaciones pluviográficas.

En Colombia, al igual que en otras partes del mundo, no se cuenta con una red suficientemente densa de estaciones pluviográficas, siendo inviable obtener las curvas IDF en una gran cantidad de sitios (Vargas & Díaz-Granados, 1998). Por tal motivo, tanto a nivel internacional como nacional, se han propuesto diferentes metodologías para estimar curvas IDF sintéticas o generalizadas, las cuales, sin reemplazar el método estándar de estimación, pueden ser una alternativa inicial en sitios con carencia de información pluviográfica. Algunas de estas metodologías se pueden consultar en Chen (1983), Koutsoyiannis et al., (1998), Westra & Sisson (2011), Silva Medina (1987), Vargas y Díaz-Granados (1998), Pulgarin & Poveda (2008). Estos métodos, en general, utilizan datos pluviométricos, combinados con información de altitud y ubicación de las estaciones, o técnicas de escalamiento de la precipitación.

Como parte del proyecto de actualización de curvas IDF para Colombia, desarrollado por la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá para el Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), se actualizaron, al año 2010 las curvas IDF de 106 estaciones pluviográficas, ubicadas en diversas partes del territorio nacional. Utilizando la información disponible se aplicaron cuatro metodologías diferentes de estimación de curvas IDF sintéticas o generalizadas obteniendo resultados coherentes en la mayoría de los 106 sitios de análisis (IDEAM-UNAL, 2016). Para consolidar el ejercicio de estimación de curvas IDF generalizadas, se desarrolló, en lenguaje R, la Calculadora de Curvas IDF Generalizadas, con un gran potencial de aplicación en sitios o zonas con información pluviográfica escasa o nula. La comparación de las curvas deducidas de forma tradicional a partir de registros pluviográficos (ajustadas a la distribución Gumbel utilizando el método de L-momentos) con las curvas IDF generalizadas en los mismos sitios arrojó errores promedio entre el 15 y 25% que se consideran razonables para permitir su uso a nivel de prediseño de estructuras hidráulicas en sitios con carencia de datos pluviográficos.

## ÁREA DE ESTUDIO E INFORMACIÓN DISPONIBLE

Las 106 estaciones pluviográficas seleccionadas para el estudio están distribuidas a

Mayor Información

lo largo y ancho del territorio colombiano, con la mayor cantidad de ellas localizadas en la región Andina (66%), seguida de la región Caribe (13%), la Orinoquia (12%), la región Pacífico (6%) y la Amazonia (3%). Como criterio de selección de las estaciones consideradas en el estudio se definió que el registro histórico de precipitaciones debería ser mayor a 10 años, con el fin de actualizar las curvas IDF al año 2010. Como resultado del proyecto de actualización se obtuvieron curvas IDF que constituyen el registro más actual y completo existente en el país.

## METODOLOGÍA UTILIZADA

Para la actualización de las curvas IDF y a partir de las series históricas de precipitación diaria para las 106 estaciones, se organizaron los pluviogramas (cartas pluviográficas) previamente escaneados, identificando las fechas de los 15 eventos extremos, cuyas cartas pluviográficas fueron digitalizadas de forma semi-automática utilizando la Herramienta para el cálculo de curvas IDF desarrollada en la Universidad Nacional (HIDFUN) (Fuentes et al., 2018), obteniéndose la curva de masa para cada carta y de allí las intensidades en (mm/hr) para siete diferentes períodos de retorno (2, 3, 5, 10, 25, 50 y 100 años) y para duraciones de 5, 10, 15, 20, 30, 60, 120 y 360 minutos. En total utilizando esta técnica se digitalizaron cerca de 16,000 cartas pluviográficas. Seguidamente, se analizaron las inconsistencias y posibles puntos anómalos en las series anuales de intensidades máximas obtenidas con HIDFUN, evaluando la calidad y consistencia de los datos, descartando la información contenida en 23 cartas. Además, se efectuó un análisis de homogeneidad para las series obtenidas con HIDFUN (actualizadas) y las proporcionadas por el IDEAM (existentes), utilizando la prueba ANOVA (en las medias) y el test de homogeneidad de Levene (en las varianzas), cuyos resultados indicaron que las no homogeneidades principalmente se presentan en la media y ocurren para las duraciones menores. Adicionalmente, se desarrolló una herramienta para reconstruir las curvas IDF existentes y calcular y ajustar las curvas actualizadas, denominada AdFUNAL (Análisis de Frecuencias UNAL), la cual permite realizar el ajuste de series de intensidades a diez diferentes distribuciones de probabilidad, utilizando tres tipos de ajustes para los parámetros de cada distribución, evaluando el nivel de ajuste de una distribución de probabilidad dada mediante tres métodos diferentes.

Posteriormente, se aplicaron cuatro diferentes metodologías para la estimación de curvas IDF generalizadas, de acuerdo con la teoría que brevemente se describe a continuación:

### i) Metodología de Chen

Este método consiste en establecer relaciones IDF (Chen, 1983), regionalizando los parámetros  $C$ ,  $b$ , y  $n$  de la ecuación [1]:

$$I = \frac{C}{(t + b)^n} \quad [1]$$

A partir de los resultados obtenidos Chen pudo establecer que la relación profundidad-duración (Depth-duration ratio, denotada  $R_1^T / R_{24}^T$ ) para cualquier periodo de retorno  $T$ , es independiente del periodo de retorno, variando regionalmente. Para Estados Unidos Chen encontró que la relación profundidad-duración varía aproximadamente entre

Mayor Información

0.10 y 0.60, dependiendo de la ubicación geográfica. Para la aplicación de esta metodología en Colombia, se calculó el valor de  $R_1^T/R_{24}^T$  para los periodos de retorno de 2, 3, 5, 10, 25, 50 y 100 años en las 106 estaciones incluidas en el análisis, con resultados de esta relación variando aproximadamente entre 0.20 y 0.75 (20% - 75%). Adicionalmente, se verificó que esta relación efectivamente es independiente del periodo de retorno.

Teniendo en cuenta que  $r_t^T$  es la intensidad para un periodo de retorno  $T$  y una duración  $t$  dados, esta metodología propone que la relación  $r_t^T/r_1^T$  es independiente del periodo de retorno, y por lo tanto puede estimarse a partir de la ecuación [2]:

$$\frac{r_t^T}{r_1^T} = \frac{a_1}{(t + b_1)^{c_1}} \rightarrow r_t^T = \frac{a_1 r_1^T}{(t + b_1)^{c_1}} \quad [2]$$

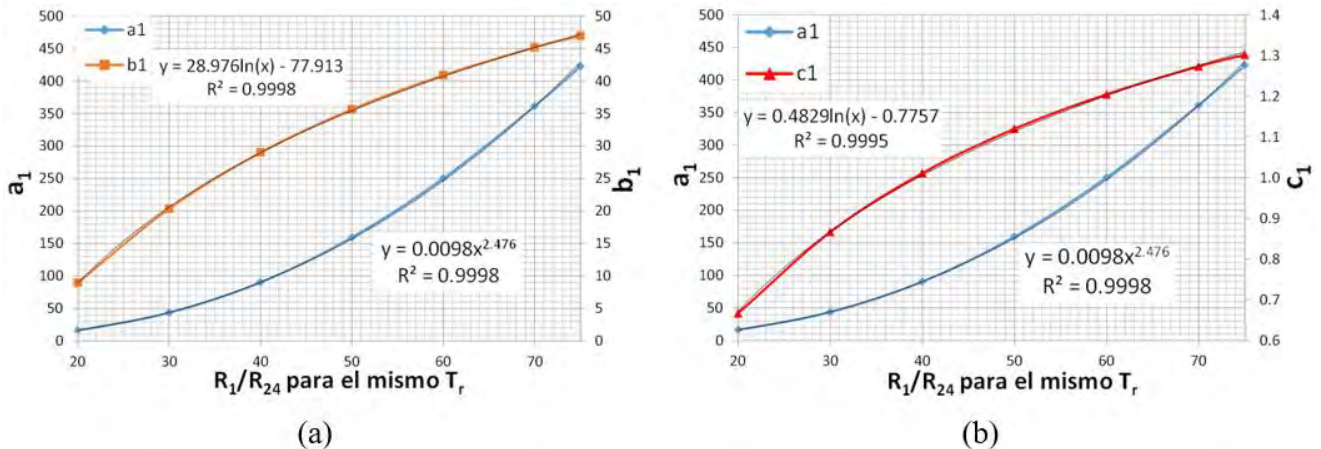
Chen encontró que los parámetros  $a_1$ ,  $b_1$  y  $c_1$ , conocidos como los parámetros estándar de la tormenta, varían con la relación profundidad-duración ( $R_1^T/R_{24}^T$ ). Por consiguiente, una vez conocidas la relación ( $R_1^T/R_{24}^T$ ), y por ende los valores  $a_1$ ,  $b_1$  y  $c_1$ , así como la intensidad  $r_1^T$  para un sitio en particular y un  $T$  dado, se pueden estimar los valores de intensidad para ese mismo periodo de retorno y cualquier duración  $t$ .

En el estudio de actualización de las curvas IDF para Colombia, se determinaron las relaciones  $R_t^T/R_1^T$  para duraciones de hasta una hora. Para duraciones superiores a una hora se estimó la lámina de precipitación para diferentes valores en el posible rango de variación de la relación  $R_1^T/R_{24}^T$ , asumiendo una variación lineal y suponiendo 1 mm como la profundidad de precipitación con una hora de duración (Tabla 1).

**Tabla 1.-** Relaciones estándar  $R_t^T/R_1^T$  en Colombia para duraciones seleccionadas.

DURACIÓN	RELACIONES ESTÁNDAR INTENSIDAD-DURACIÓN PARA DIFERENTES VALORES DE $R_1/R_{24}$							
	20%	30%	40%	50%	60%	70%	75%	
Minutos	15	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96
	30	1.47	1.47	1.47	1.47	1.47	1.47	1.47
	60	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Horas	2	0.59	0.55	0.53	0.52	0.51	0.51	0.51
	3	0.45	0.40	0.38	0.36	0.35	0.35	0.34
	6	0.31	0.25	0.22	0.20	0.19	0.18	0.18
	12	0.24	0.18	0.14	0.12	0.11	0.10	0.10
	24	0.21	0.14	0.10	0.08	0.07	0.06	0.06

Mediante el ajuste de la ecuación [2], junto con los valores de duración e intensidad estándar, se obtienen los valores de  $a_1$ ,  $b_1$  y  $c_1$ , para cada uno de los valores de la relación  $R_1^T/R_{24}^T$ . Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 1.



**Figura 1.-** Ecuación de Chen para Colombia. (a) Parámetros  $a_1$  y  $b_1$ . (b) Parámetros  $a_1$  y  $c_1$ .  
Tomado de IDEAM-UNAL (2016).

Para facilitar la aplicación del método se regionalizaron los valores de  $r_1^T$ , ajustados a la distribución Gumbel haciendo una interpolación de los datos puntuales mediante el método de distancia inversa ponderada (IDW) (WMO, 2008). Con la información así obtenida, la forma de aplicar el método de Chen en Colombia, para estimar intensidades en un sitio dado se resume a continuación:

- A partir de los mapas o de registros pluviográficos limitados existentes se estima el valor de  $r_1^T$  y de  $R_{24}^T$
- Con los dos valores estimados en el paso anterior se puede obtener  $R_1^T/R_{24}^T$ , y a su vez con esta relación se pueden obtener los valores de  $a_1$ ,  $b_1$  y  $c_1$  a partir de la Figura 1.
- Para obtener el valor estimado de  $r_t^T$  para una duración  $t$  dada, es posible reemplazar los valores calculados en los dos pasos anteriores en la ecuación [2].

## ii) Metodología de Vargas y Díaz-Granados

En Colombia, Vargas y Díaz-Granados (1998) propusieron un enfoque para regionalizar las curvas IDF en el territorio nacional, el cual consiste en ajustar ecuaciones que relacionan la intensidad ( $I$ ) con la duración ( $t$ ), la frecuencia ( $T$ ) de las lluvias máximas y otros parámetros pluviométricos. Tomando como punto de partida la relación entre la intensidad, la duración y la frecuencia dada por la ecuación [3]:

$$I = a * \frac{T^b}{t^c} * X \quad [3]$$

Vargas y Díaz-Granados (1998) propusieron diferentes ecuaciones en las que el factor  $X$  de la ecuación [3] es reemplazado por combinaciones de variables, tales como el promedio del valor máximo anual de precipitación diaria ( $M$ ), el promedio del número de días con lluvia al año ( $N$ ), la precipitación media anual ( $PT$ ), y la elevación de la estación ( $ELEV$ ). Vargas y Díaz-Granados (1998) concluyeron que las ecuaciones [4], [5], [6] y [7] resultan apropiadas para la estimación de las curvas IDF generalizadas en Colombia.

$$I = a * \frac{T^b}{t^c} * M^d \quad [4]$$

Mayor Información

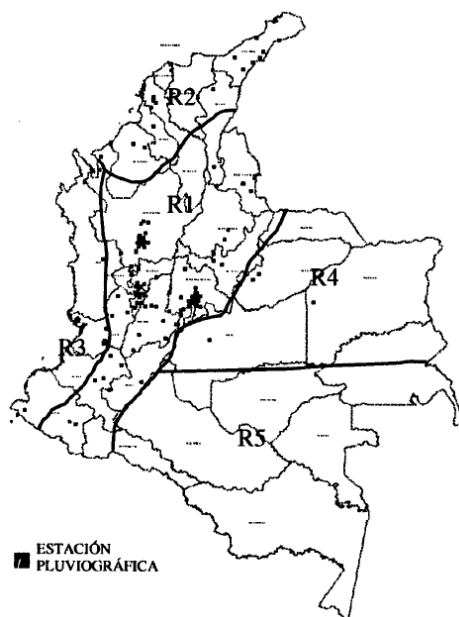
$$I = a * \frac{T^b}{t^c} * M^d * N^e \quad [5]$$

$$I = a * \frac{T^b}{t^c} * M^d * N^e * PT^f \quad [6]$$

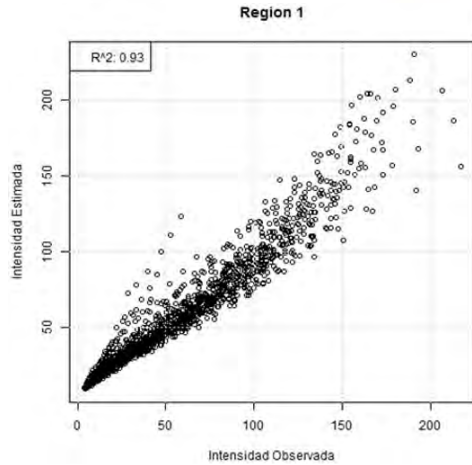
$$I = a * \frac{T^b}{t^c} * M^d * N^e * PT^f * ELEV^g \quad [7]$$

Para evaluar la aplicabilidad de estas ecuaciones, Vargas y Díaz-Granados (1998) dividieron el territorio nacional en cinco regiones climatológicas: Amazonia, Andina, Orinoquia, Caribe y Pacífico, como se indica en la Figura 2.

En el estudio aquí reportado se consideró la misma división de regiones en el país; sin embargo, no se tuvo en cuenta la región de la Amazonia para el análisis por carencia de un número suficiente de estaciones. De otra parte, se incluyó la distancia al mar (DIS) como un parámetro adicional, sin resultados muy superiores a los hallados utilizando la ecuación [7]. En las Figura 3 a Figura 6 se presentan los resultados obtenidos mediante este análisis, en donde la intensidad observada hace referencia a las intensidades obtenidas para cada estación mediante la actualización de las curvas IDF. Se incluye también la tabla del estudio original de Vargas y Díaz-Granados (en la parte superior derecha) para efectos de comparación de los resultados actualizados.



**Figura 2.-** Regionalización definida en el artículo de Vargas y Díaz-Granados (1998).

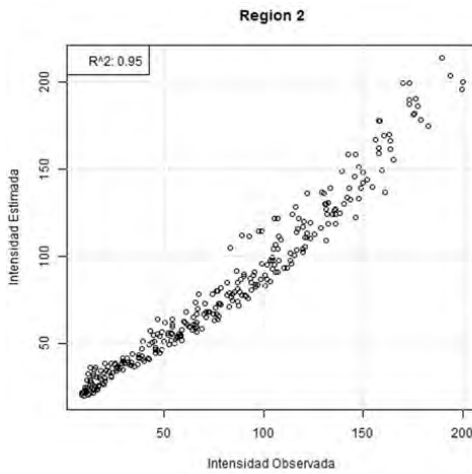


$$I = a \frac{T^b}{t^c} M^d N^e P T^f ELEV^g$$

	a	b	c	d	e	f	g	R <sup>2</sup>
Ec.4	0.94	0.18	0.66	0.83				0.93
Ec.5	1.22	0.19	0.66	0.83	-0.05			0.93
Ec.6	1.61	0.19	0.65	0.75	-0.15	0.08		0.93
Ec.7	1.64	0.19	0.65	0.73	-0.13	0.08	-0.01	0.93

	a	b	c	d	e	f	g	R <sup>2</sup>
Ec.4	2	0.151	0.54	0.672				0.909
Ec.5	11.45	0.151	0.54	0.68	-0.339			0.928
Ec.6	11.39	0.151	0.54	0.681	-0.337	-0.001		0.928
Ec.7	15.49	0.151	0.54	0.596	-0.317	0.022	-0.033	0.928

Figura 3.- Resultados del ajuste para la región Andina (R<sup>2</sup>= 0.93).

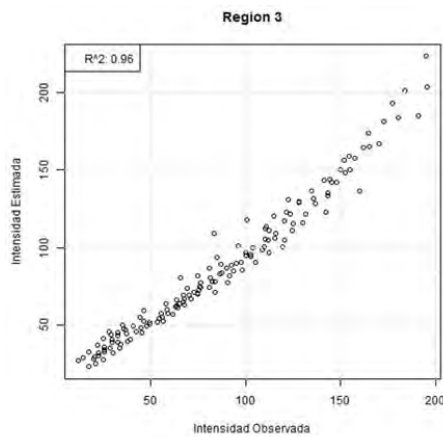


$$I = a \frac{T^b}{t^c} M^d N^e P T^f ELEV^g$$

	a	b	c	d	e	f	g	R <sup>2</sup>
Ec.4	24.85	0.22	0.5	0.1				0.72
Ec.5	16.66	0.21	0.5	0.03	0.15			0.72
Ec.6	8.51	0.21	0.5	-0.01	-0.08	0.28		0.74
Ec.7	8.39	0.21	0.49	-0.01	-0.04	0.26	-0.01	0.74

	a	b	c	d	e	f	g	R <sup>2</sup>
Ec.4	9.9	0.17	0.52	0.34				0.95
Ec.5	12.41	0.17	0.52	0.34	-0.054			0.95
Ec.6	26.69	0.17	0.52	0.35	0.167	-0.259		0.95
Ec.7	24.05	0.17	0.52	0.39	0.155	-0.263	0	0.95

Figura 4.- Resultados del ajuste para la región Caribe (R<sup>2</sup>= 0.95).



$$I = a \frac{T^b}{t^c} M^d N^e P T^f ELEV^g$$

	a	b	c	d	e	f	g	R <sup>2</sup>
Ec.4	13.92	0.19	0.58	0.2				0.88
Ec.5	3.02	0.19	0.58	0.04	0.44			0.9
Ec.6	2.31	0.19	0.58	-0.2	0.12	0.4		0.91
Ec.7	2.75	0.19	0.58	-0.19	0.14	0.37	-0.01	0.91

	a	b	c	d	e	f	g	R <sup>2</sup>
Ec.4	8.883	0.15	0.44	0.36				0.94
Ec.5	8.694	0.15	0.44	0.94	-0.52			0.95
Ec.6	28.42	0.15	0.44	-0.01	-0.45	0.362		0.96
Ec.7	5.197	0.15	0.44	0.66	-0.35	0.091	0.05	0.96

Figura 5.- Resultados del ajuste para la región Pacífico (R<sup>2</sup>= 0.96).

Mayor Información

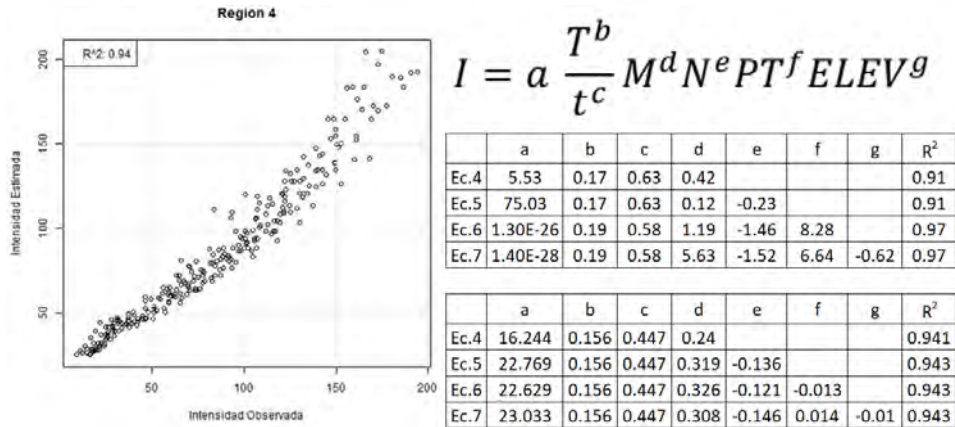


Figura 6.- Resultados del ajuste para la región Orinoquía ( $R^2=0.94$ ).

### iii) Metodología de escalamiento de la precipitación

El enfoque dado por Pulgarín & Poveda (2008) para la estimación de curvas IDF generalizadas en Colombia se fundamenta en las “propiedades de escala” de la lluvia para estimar relaciones IDF, siendo este un enfoque netamente estadístico, que está basado en el hecho de que la precipitación es un fenómeno que se puede analizar a la luz de la teoría de escalamiento. De acuerdo con esta teoría (Gupta & Waymire, 1990), un fenómeno presenta características de escalamiento para una variable aleatoria  $I$ , si se cumple la condición dada en la ecuación [8]

$$I(\lambda d) \bar{D} C(\lambda) I(d) \quad [8]$$

a la cual se le denomina escalamiento simple. De acuerdo con la ecuación [8], para el factor de escala  $\lambda$  ( $\lambda > 0$ ) existe una función  $C(\lambda)$ , de tal forma que se conserva la igualdad (denotada por  $\bar{D}$ ) entre las distribuciones de probabilidad de ambos lados de la ecuación. En otras palabras, la distribución de probabilidad del fenómeno es invariante con respecto a la escala. Para el caso del análisis de precipitaciones máximas,  $I$  es la intensidad de la lluvia y  $d$  la duración asociada.

Escribiendo la función  $C(\lambda)$  como:

$$C(\lambda) = \lambda^\theta \quad [9]$$

donde  $\theta$  (un número real cualquiera) es el exponente característico o de escalamiento. La condición de escalamiento simple (ecuación [8]) implica que los cuantiles también son invariantes con respecto a la escala temporal, de tal manera que, utilizando la ecuación [9], igualmente se cumple lo presentado en la ecuación [10].

$$I_q(\lambda d) = \lambda^\theta I_q(d) \quad [10]$$

En la ecuación [10],  $q$  denota el  $q$ -ésimo cuantil de la variable  $I$ . A su vez, esta igualdad implica también que, siempre y cuando existan los momentos de la variable  $I$ , estos también son invariantes con la escala:

$$M_r(\lambda d) = \lambda^{\theta r} M_r(d) \quad [11]$$

donde,  $M_r$  es el momento estadístico de orden  $r$  para la variable aleatoria  $I$ , y el

Mayor Información



exponente está dado por  $\xi_r = r\theta$ . La ecuación [11] indica que, para estimar el momento de cualquier orden y cualquier valor de  $d$ , basta con conocer los valores de los momentos para un valor dado de  $d$  y el valor del exponente  $\theta$ .

De acuerdo con lo anterior, si se conoce la función de distribución de los valores extremos de los registros de precipitación, así como el valor del exponente de escalamiento  $\theta$ , es posible calcular las intensidades máximas a partir de un valor de referencia conocido ( $I_{ref}$ ) y su valor asociado de duración ( $d_{ref}$ ), los cuales constituyen la base para determinar las características de escala de la lluvia.

Por lo tanto, la intensidad ( $I$ ) con duración  $t$  y periodo de retorno  $T$  está dada por la siguiente expresión:

$$I_t^T = I_{\lambda d}^T = \lambda^\theta I_d^T = (\mu_d + \alpha_d \hat{y}) \left(\frac{t}{d}\right)^\theta \quad [12]$$

donde

$$\hat{y} = -\ln[-\ln(1 - (1/T))] \quad [13]$$

La igualdad en la ecuación [12] indica que para obtener el factor de escala,  $\lambda$ , se divide la duración en cuestión  $t$  entre una duración de referencia  $d$ . Para el cálculo de  $\alpha_d$  y  $\mu_d$  se pueden emplear los momentos muestrales de orden 0 y 1 (Pulgarin & Poveda, 2008). Sin embargo, para el análisis aquí reportado, se optó por aplicar un procedimiento alternativo, mediante el cual se buscó regionalizar los valores de  $\alpha$ ,  $\theta$ , y  $\mu$ . El procedimiento alternativo adoptado consiste básicamente en ajustar los valores de intensidades (y sus respectivas duraciones) de las estaciones seleccionadas a la ecuación [12]. Para ello se tomó como duración de referencia la de 24 horas. Se estableció que la gran mayoría de las estaciones presentan escalamiento múltiple. Los resultados se obtuvieron en forma gráfica, en donde los subíndices 1 y 2 corresponden a los valores de los parámetros  $\alpha$ ,  $\theta$ , y  $\mu$ , para duraciones menores a una hora y mayores a una hora, respectivamente.

#### iv) Metodología Proceso Máximo Estable (Max-Stable Process)

La metodología del Proceso Máximo Estable es un enfoque puramente matemático, que permite analizar las precipitaciones máximas utilizando un modelo de valores extremos basado en la teoría de proceso máximo estable (max-stable process), la cual es una extensión de la teoría de valores extremos multivariados (Smith & Stephenson, 2009). El propósito del Proceso Máximo Estable es obtener una solución mediante la cual se ajusta un modelo de valores extremos espaciales a múltiples puntos localizados dentro de un dominio espacial de interés, en el cual se tienen en cuenta tanto la variabilidad espacial, como la temporal en los parámetros del modelo, así como la independencia entre los registros en cada punto. En el caso de la precipitación, los valores extremos son las intensidades y los puntos espaciales representan la distribución de la red de estaciones en las cuales se realizan las mediciones.

En una investigación realizada en Australia (Westra & Sisson, 2011), utilizaron la distribución generalizada de valores extremos mostrada en la ecuación [14].

Mayor Información

$$G(z) = \exp \left\{ - \left[ 1 + \xi \left( \frac{z - \mu}{\sigma} \right) \right]^{-1/\xi} \right\}, \quad [14]$$

definida en el conjunto  $\{z: 1 + \xi(z - \mu)/\sigma > 0\}$ , donde  $\mu$  y  $\sigma$  son los llamados parámetros de ubicación y escala, respectivamente. A  $\xi$  se le conoce como el parámetro de forma y determina una de las subfamilias de la distribución GEV: si  $\xi < 0$  se tiene la de Weibull, para  $\xi \rightarrow 0$  la de Gumbel, y en el caso  $\xi > 0$  la de Fréchet.

Suponiendo que  $\{X_i(s)\}_{s \in S}$  para  $i = 1, \dots, n$ , son los  $n$  posibles valores de un proceso continuo indexado por  $s$  (intensidades), donde  $S \subseteq \mathbb{R}^2$  representa un dominio espacial de dos variables (localización de las estaciones). Si el límite

$$\tilde{X}(s) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\max_{i=1, \dots, n} X_i(s) - a_n(s)}{b_n(s)}, \quad [15]$$

existe para todos los  $s \in S$ , donde  $a_n$  y  $b_n$  son constantes de normalización, entonces por definición  $\tilde{X}(s)$  es un Proceso Máximo Estable. Se tiene así que para cualquier distribución de  $K$  dimensiones (es decir, para múltiples ubicaciones  $s$ ), los parámetros resultantes  $\mu$ ,  $\sigma$  y  $\xi$  son funciones espaciales continuas que pueden ser estimadas. A diferencia de los modelos GEV espaciales, el Proceso Máximo Estable permite efectuar la modelación y predicción con dependencia espacial de los datos. Utilizando un modelo de probabilidad mixta por parejas (Westra & Sisson, 2011), se hace posible utilizar técnicas estadísticas estándar para determinar los parámetros, lo que facilita de manera significativa los cálculos, dando como resultado un marco de análisis poderoso y flexible.

Para aplicar la metodología, Westra & Sisson (2011) llevaron a cabo su investigación en la región este de Australia. En su estudio demuestran las ventajas de considerar explícitamente la información espacial en la detección y análisis de tendencias en los valores extremos. De esta forma, los parámetros de ubicación y escala son modelados como una función de las variables longitud (*lon*), latitud (*lat*), elevación (*elev*) y distancia a la costa (*dist*). El parámetro de forma,  $\xi$ , se tomó como un valor promedio constante (pues este resultó ser aproximadamente el mismo entre estaciones).

Para el estudio aquí reportado se aplicó dicho enfoque considerando estaciones que principalmente se localizaran en la Región Andina (definida según la regionalización propuesta por Vargas y Díaz-Granados, 1998). Así, se seleccionaron 75 de las 106 estaciones consideradas en el estudio de actualización. Para llevar a cabo el ajuste espacial de intensidades según el proceso máximo estable, se emplearon aquellas estaciones que en el periodo comprendido entre 1975 y 2010 tuvieran menos del 20% de datos faltantes. De las 75 estaciones, 41 cumplieron con esa condición; las 34 estaciones restantes se usaron para validar la calidad del ajuste del modelo implementado.

El ajuste espacial de los parámetros de la función GEV se realizó utilizando el software SpatialExtremes, particularmente mediante el uso de la función *fitspatgev* (Maximum Likelihood Estimation for a spatial GEV model).

En la aplicación de esta metodología a las estaciones seleccionadas, se consideraron dos casos: primero, utilizando únicamente las variables espaciales de las estaciones, y segundo, considerando las variables espaciales y además información pluviométrica de las estaciones.

a) Para el primer caso las variables consideradas fueron las siguientes:

Mayor Información

- Coordenadas planas de las estaciones EPSG Projection 3116 - MAGNA-SIRGAS / Colombia Bogota zone.
- Elevación sobre el nivel del mar de la estación según el Catálogo Nacional de Estaciones del IDEAM 2016.
- Así pues, las funciones lineales que representan los parámetros están dadas por las ecuaciones [16] a [18].

$$\mu = \alpha_1 + \alpha_2 \text{Norte} + \alpha_3 \text{Este} + \alpha_4 \text{Elevación} \quad [16]$$

$$\sigma = \beta_1 + \beta_2 \text{Norte} + \beta_3 \text{Este} + \beta_4 \text{Elevación} \quad [17]$$

$$\xi = \gamma_1 \quad [18]$$

Los valores de los coeficientes  $\alpha, \beta$  y  $\gamma$ , obtenidos para cada duración, se presentan en la Tabla 2.

**Tabla 2.-** Parámetros ajustados cuando se conoce la ubicación y elevación del sitio de interés.

Duración (min)	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_4$	$\gamma_1$
15	1.03E+02	4.74E-05	-4.93E-05	-2.32E-02	2.81E+01	-1.50E-06	1.89E-06	-3.81E-03	-1.73E-01
30	7.88E+01	3.45E-05	-3.46E-05	-1.88E-02	2.59E+01	-1.19E-06	3.29E-06	-3.91E-03	-1.76E-01
60	5.45E+01	2.50E-05	-2.49E-05	-1.40E-02	1.72E+01	-8.39E-08	3.16E-06	-3.36E-03	-1.40E-01
120	3.28E+01	1.69E-05	-1.70E-05	-8.49E-03	1.14E+01	-3.11E-09	1.64E-06	-2.54E-03	-1.10E-01
360	1.26E+01	6.57E-06	-6.61E-06	-3.12E-03	4.94E+00	-3.58E-07	5.58E-07	-1.03E-03	-9.44E-02

b) Para el segundo caso, las variables consideradas fueron las siguientes:

- Coordenadas planas de las estaciones EPSG Projection 3116 - MAGNA-SIRGAS / Colombia Bogota zone. (m, m)
- Elevación sobre el nivel del mar (m) de la estación según el Catálogo Nacional de Estaciones del IDEAM 2016.
- El promedio del valor máximo anual de precipitación diaria ( $M$ , en mm), el promedio de días con lluvia al año ( $N$ , días), y la precipitación media anual ( $PT$ , en mm).
- Para este caso, la forma de las funciones lineales que representan los parámetros está dada por las ecuaciones [19] a [21]:

$$\mu = \alpha_1 + \alpha_2 \text{Norte} + \alpha_3 \text{Este} + \alpha_4 \text{Elevación} + \alpha_5 M + \alpha_6 N + \alpha_7 PT \quad [19]$$

$$\sigma = \beta_1 + \beta_2 \text{Norte} + \beta_3 \text{Este} + \beta_4 \text{Elevación} + \beta_5 M + \beta_6 N + \beta_7 PT \quad [20]$$

$$\xi = \gamma_1 \quad [21]$$

Los valores obtenidos para los coeficientes se presentan en la Tabla 3 y Tabla 4.

**Tabla 3.-** Parámetros  $\alpha_i$  ajustados para la ubicación y la información pluviométrica.

Duración (mm)	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$	$\alpha_5$	$\alpha_6$	$\alpha_7$
15	5.95E+01	1.23E-05	-1.61E-05	-7.57E-03	5.37E-01	-1.19E-01	6.22E-03
30	3.35E+01	8.06E-06	-1.03E-05	-4.11E-03	5.52E-01	-8.84E-02	3.01E-03
60	1.50E+01	4.81E-06	-7.79E-06	-1.68E-03	4.95E-01	-5.82E-02	9.48E-04
120	3.55E+00	3.38E-06	-5.33E-06	-2.42E-04	3.46E-01	-2.50E-02	8.16E-05
360	-8.89E-01	7.27E-07	-7.16E-07	9.02E-05	1.39E-01	-3.64E-03	3.75E-05

**Tabla 4.-** Parámetros  $\beta_i$  ajustados para la ubicación y la información pluviométrica.

Duración (mm)	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_4$	$\beta_5$	$\beta_6$	$\beta_7$	$\gamma_1$
15	3.22E+01	1.97E-07	-1.15E-06	-3.12E-03	-3.85E-02	-2.44E-02	7.79E-04	-1.73E-01
30	1.46E+01	-4.03E-07	2.68E-07	-1.84E-03	9.50E-02	-1.12E-03	-1.42E-03	-1.76E-01
60	6.05E+00	-1.20E-06	9.71E-07	-7.45E-04	1.24E-01	-4.19E-03	-1.19E-03	-1.40E-01
120	3.36E+00	-1.01E-06	1.63E-06	-7.96E-04	7.84E-02	-6.07E-03	-4.97E-04	-1.10E-01
360	1.45E+00	-1.18E-06	8.31E-07	-2.89E-04	3.51E-02	-1.85E-03	-1.50E-04	-7.82E-02

Con el propósito de llevar esta contribución a la práctica de la ingeniería, se ha desarrollado la calculadora de Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia Generalizadas, consolidando así los resultados y aplicando las cuatro metodologías arriba descritas.

## DESCRIPCIÓN DE LA CALCULADORA

La Calculadora de Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) Generalizadas (Figura 7(a)) es una herramienta computacional que permite estimar las curvas IDF en zonas del territorio colombiano en donde no existen estaciones pluviográficas pero se cuenta con datos pluviométricos, así como con la localización y elevación del sitio de interés. Esta herramienta es amigable con el usuario, ya que le permite seleccionar de manera fácil y sencilla la forma de ingresar coordenadas (manualmente o ubicándolas en un mapa), y escoger las metodologías para efectuar la estimación de las Curvas IDF Generalizadas, las cuales incluyen: el método de Chen, la metodología de Vargas & Díaz-Granados, la metodología de escalamiento y la metodología del Proceso Máximo Estable (max-stable process). La calculadora también presenta los resultados en Tablas y Gráficos, en donde el usuario puede consultar la envolvente y la mediana para cada curva IDF de cada periodo de retorno (2, 3, 5, 10, 25, 50 y 100 años). Cabe mencionar que la calculadora se encuentra en un desarrollo preliminar, ya que los archivos raster, shapes, ecuaciones y datos resultantes fueron obtenidos del análisis de tan sólo 106 estaciones (con datos pluviográficos), ubicadas a lo largo de toda Colombia, equivalentes solo al 25% de las estaciones del país operadas por el IDEAM que cuentan con pluviógrafo y tienen longitud de registro de más de 10 años.

La construcción de la calculadora se desarrolló en *RStudio*. El código implementado utiliza las siguientes librerías: “Shiny”, estructura de aplicación web que facilita la creación de aplicaciones web interactivas (apps) directamente desde *R* (Chang et al., 2017), aunque con algunas variaciones en la sintaxis; “leaflet”, la cual permite crear y personalizar mapas interactivos (Cheng et al., 2017); ggmap, que incluye una colección de funciones para visualizar datos espaciales y modelos sobre mapas estáticos de varias fuentes en línea (Kahle & Wickham, 2016); dplyr, herramienta consistente y rápida para trabajar con marco de datos (data frame) como objetos (Wickham & Francois, 2016); rgdal la cual proporciona acceso a las operaciones de proyección y transformación de la biblioteca PROJ.4 (Bivand et al., 2017); sp, que trabaja con clases y métodos para datos espaciales y proporciona funciones de utilidad para graficar datos como mapas, selección espacial, métodos para recuperar coordenadas y para subconjuntos, mostrar un resultado y su resumen (Pebesma et al., 2016); raster, librería con funciones de lectura, escritura, manipulación, análisis y modelación de datos espaciales en rejilla (Hijmans et al., 2016); png, paquete que proporciona una manera fácil y sencilla para leer, escribir y mostrar

Mayor Información



imágenes de mapa de bits almacenados en el formato PNG (Urbanek, 2015); xlsx, la cual proporciona funciones en *R* para leer, escribir y formatear archivos de Excel 2007 y Excel 97/2000/XP/2003 (Dragulescu, 2015); plotly, permite traducir fácilmente los gráficos 'ggplot2' a una versión interactiva basada en web y/o crear visualizaciones basadas en web personalizadas directamente desde *R* (Hijmans et al., 2016); SpatialExtremes, contiene herramientas para la modelación estadística de extremos espaciales utilizando procesos máximos estables, copulación o modelos jerárquicos bayesianos (Ribatet, 2015); y minpack.lm, que tiene una función que proporciona una interfaz *R* a otras funciones de la biblioteca MINPACK, para resolver problemas no lineales de mínimos cuadrados mediante una modificación del algoritmo de Levenberg-Marquardt, con soporte para los límites de parámetros inferiores y superiores (Elzhov, Mullen, Spiess, & Bolker, 2016).

Mediante el uso de los paquetes arriba mencionados, es posible cargar 8 archivos raster (.TIFF) que utiliza el método de Chen, 6 archivos raster (.TIFF) necesarios para la aplicación de la metodología de Escalamiento y 5 archivos raster (.TIFF) que son empleados para la aplicación de la metodología de Vargas & Díaz-Granados. Cabe señalar que uno de estos raster delimita las cinco regiones en Colombia (R1 - Región Andina, R2 - Región del Caribe, R3 - Región del Pacífico, R4 - Región Orinoquía y R5 - Región de la Amazonia), definidas en el artículo de Vargas y Díaz-Granados (1998), que también es utilizado para la metodología del Proceso Máximo Estable, condicionado a ser aplicado solo a la R1, y omitiendo, por limitaciones de información, la R5 para ambos casos. Los demás raster corresponden a los diferentes parámetros de cada metodología ( $R_1^T / R_{24}^T$  - relación profundidad-duración,  $r_1^T$  - intensidades de una hora para cada uno de los siete periodos de retorno,  $\theta$  - exponente característico o de escalamiento para duraciones mayores y menores a 1 hora,  $\mu$  - parámetro de localización de las series de intensidad de la precipitación máxima anual para duraciones mayores y menores a 1 hora,  $\alpha$  - parámetro de escala de las series de intensidad de la precipitación máxima anual para duraciones mayores y menores a 1 hora,  $M$  - promedio del valor máximo anual de precipitación diaria,  $N$  - promedio del número de días con lluvia al año,  $PT$  - precipitación media anual y  $ELEV$  - elevación), los cuales son extraídos de los mapas, de acuerdo con las coordenadas suministradas por el usuario. Además, las librerías permiten leer 4 archivos de Excel (.xlsx), los cuales contienen los coeficientes de las ecuaciones propuestas por la metodología de Vargas & Díaz-Granados y dos archivos con información de las curvas IDF secundarias, las cuales fueron obtenidas a partir de la revisión de información secundaria reportada por ejemplo en informes de consultoría y por entidades como EPM y EAAB, entre otras.

## APLICACIÓN DE LA CALCULADORA Y RESULTADOS

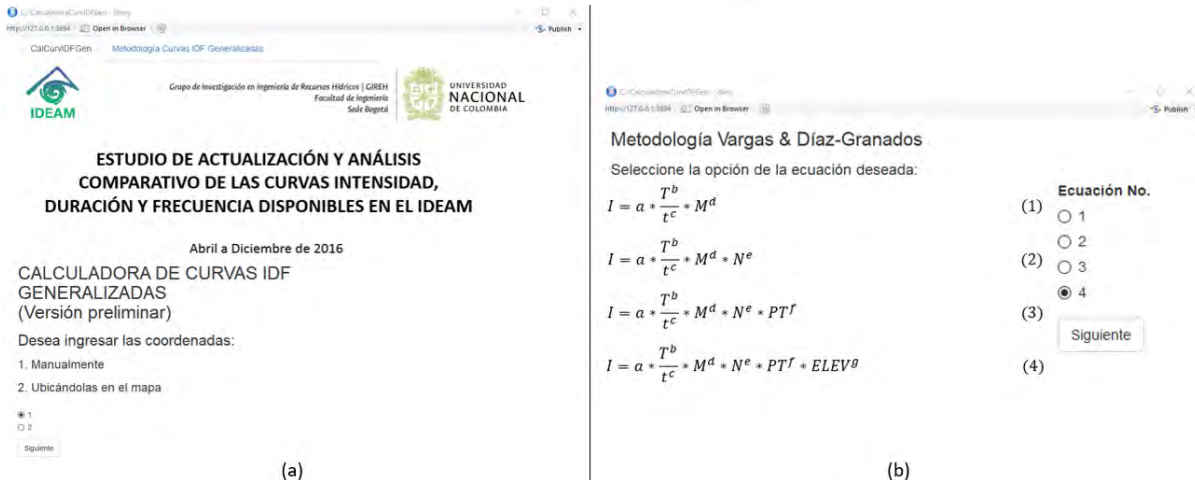
A manera de ejemplo se presenta a continuación una breve descripción del uso de la calculadora. En primera medida, para utilizar la Calculadora de Curvas IDF Generalizadas, solo basta con descargar las librerías descritas y ejecutar el código desarrollado en *RStudio*. El tiempo de ejecución del código dependerá de las características de cada computadora. Una vez cargado el código y las librerías, se abrirá automáticamente una ventana, en donde el usuario deberá seleccionar la forma de introducir las coordenadas del sitio para el cual se desean estimar las curvas IDF generalizadas, cuyas opciones son manual o ubicándolas en el mapa. Para el caso de

Mayor Información



ilustración aquí presentado, se ha seleccionado la forma manual (Figura 7(a)), ingresando longitud  $-75.14675$  y latitud  $6.54038889$ , correspondiente a las coordenadas de la estación “Guayabito” (Código: 27015190). A continuación, se identifica y despliega el punto en el mapa y de manera automática la herramienta identifica la región a la cual pertenece (para el ejemplo en cuestión es la R1- Región Andina). Dependiendo de la región, la calculadora podrá preguntarle al usuario si desea que los datos de los parámetros  $M$ ,  $N$ ,  $PT$ ,  $ELEV$  sean ingresados manualmente o de forma automática (extraídos de mapas interpolados para cada uno de estos parámetros). Eligiendo la segunda opción se debe seleccionar una de las cuatro opciones de las ecuaciones de la metodología de Vargas & Díaz-Granados, recomendando elegir la ecuación No. 4 de la Figura 7(b), dado que es esta la que utiliza todos los parámetros solicitados. Por último, el usuario deberá elegir la(s) metodología(s) para estimar las curvas IDF, en donde la última opción muestra las curvas para los cuatro métodos incluidos. La calculadora presentará seguidamente los resultados de cada método en tablas y gráficas, tal como se muestra en la Figura 8, en donde resulta que con la metodología de Chen y el sitio de interés ejemplo se tienen intensidades entre  $11.30$  mm/h (periodo de retorno de 2 años y una duración de 360 minutos, es decir  $T=2$  años y  $D=360$  min) y  $277.12$  mm/h ( $T$  de 100 años y una duración de 5 minutos); para la de Vargas & Díaz-Granados, se obtienen intensidades entre  $17.75$  mm/h y  $322.68$  mm/h; para la metodología de Escalamiento, se encuentran valores entre  $4.41$  mm/h y  $179.21$  mm/h; y para el Proceso Máximo Estable, intensidades entre  $15.27$  mm/h y  $166.21$  mm/h. Adicionalmente, y para propósitos de comparación, la calculadora muestra las curvas IDF actualizadas mediante el ajuste de la distribución de Gumbel y el método de L-momentos para la estación pluviográfica más cercana, con resultados para el caso aquí ejemplificado con duraciones que varían entre  $15.46$  mm/h y  $164.71$  mm/h (Figura 9(a)). Es de anotar que la estación más cercana, para este ejemplo, es la misma estación “Guayabito”, ya que para el ejemplo aquí reportado se ingresaron las coordenadas de la ubicación de ésta. Al realizar el cálculo del error porcentual promedio, es decir el valor absoluto de la división de la diferencia de las intensidades obtenidas con AdFUNAL y las obtenidas mediante cada metodología, con respecto a las intensidades obtenidas con AdFUNAL, para cada duración y periodo de retorno, se obtiene un menor error promedio para la metodología del proceso máximo estable ( $4.07\%$ ), seguida del método de Vargas & Díaz-Granados ( $15.66\%$ ), el método de Chen ( $15.69\%$ ) y por último la metodología de Escalamiento ( $24.47\%$ ). Para el caso analizado, es evidente que con el Proceso Máximo Estable se obtienen los mejores resultados, recordando que dicha metodología sólo se aplica para la Región Andina. En la Figura 9(b), también se presentan las curvas IDF secundarias (obtenidas de la recolección de información secundaria reportada por diversas entidades), con intensidades entre  $8.39$  mm/h ( $T=5$  años y  $D=360$  min) y  $257.91$  mm/h ( $T=100$  años y  $D=5$  min). Cabe resaltar que para las curvas IDF secundarias mostradas en esta Figura no se contó con información para los periodos de retorno de 2, 3 y 5 años.

Mayor Información



**Figura 7.-** (a) Calculadora de Curvas IDF Generalizadas (Versión preliminar). (b) Elección de las ecuaciones de la metodología de Vargas & Díaz-Granados

Adicionalmente, y para propósitos de análisis es posible consultar la envolvente de las curvas IDF generalizadas para las cuatro diferentes metodologías. El eje de las abscisas (duraciones en minutos) es presentado en papel logarítmico con el fin de poder visualizar de mejor forma la variación de las intensidades con respecto al tiempo y sus correspondientes envolventes. Como ejemplo, en la Figura 10 se puede apreciar la envolvente de la curva IDF con periodo de retorno de 2 años (línea de guiones), para el método de Chen. Es importante resaltar que, para la construcción de la envolvente, se toma la intensidad máxima y mínima de las cuatro metodologías para cada duración y periodo de retorno. En la Figura 10 también se puede visualizar la mediana (línea punteada), obtenida a partir de las intensidades obtenidas de las cuatro metodologías mencionadas.

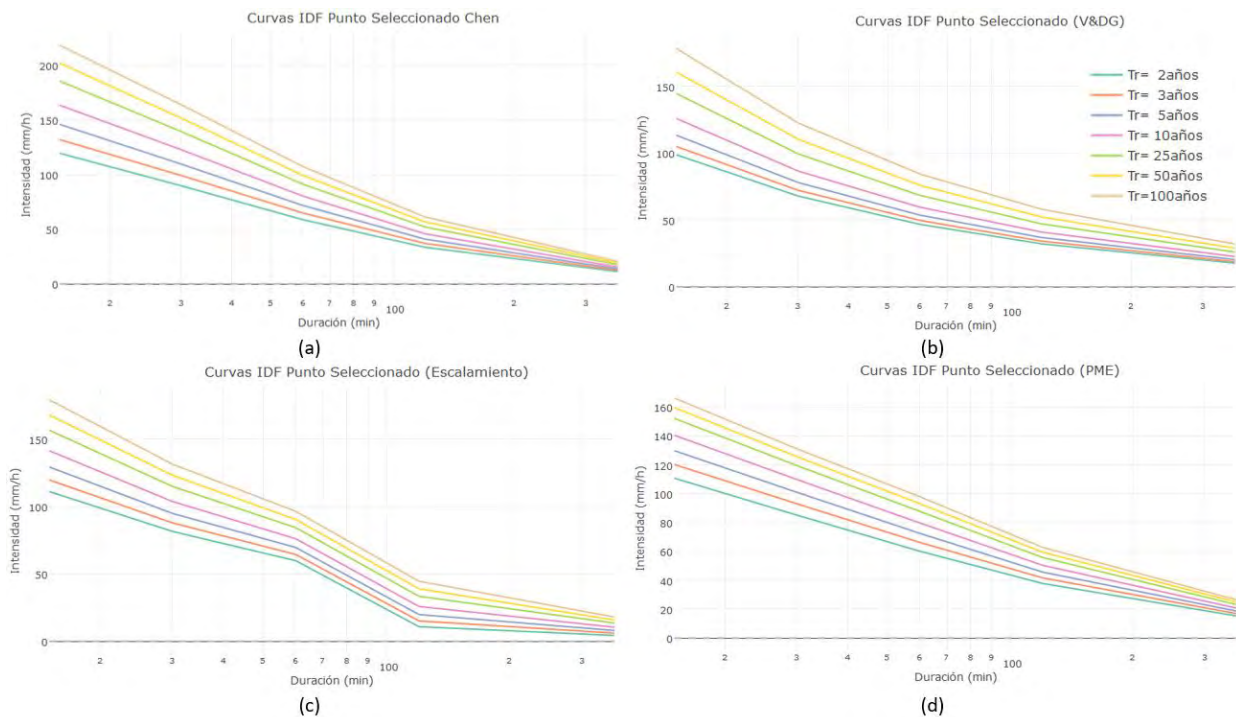
Al comparar los resultados obtenidos mediante la aplicación de cada metodología, para las 106 estaciones analizadas con curvas IDF actualizadas, se identifica que para el método de Chen, las diferencias porcentuales son menores al 10%, en promedio. Las diferencias más grandes (mayores al 30%) se presentan consistentemente para duraciones de 15 y 360 minutos, para los periodos de retorno más grandes. Además, para todos los periodos de retorno y todas las duraciones, los resultados muestran que la gran mayoría de los casos (más del 75%) se presentan errores porcentuales de hasta el 15%, la mayoría de los valores (entre el 63% y el 76%, dependiendo del periodo de retorno) presentan errores de hasta el 5%. Entre el 76% y el 90% de los datos presentan errores porcentuales menores al 15%. Para la metodología de Vargas y Díaz-Granados, los resultados presentan errores máximos porcentuales del 30%, y en promedio entre el 15 y el 25%, dependiendo de la región considerada. En la metodología de escalamiento se obtienen buenos resultados (errores relativos promedio del 17%, aproximadamente), pocos casos con errores relativos del orden del 30%, y solo para una estación el error es del orden del 110%, en promedio. Para la metodología del Proceso Máximo Estable, los errores promedio están por debajo del 30%, y al incluir las variables pluviométricas, se reducen a errores promedio por debajo del 20%, aclarando que este método solo aplica para la región Andina (zona con un conjunto importante de estaciones).

El error porcentual y el error cuadrático medio son métricas usualmente utilizadas para comparar la curva IDF actualizada de forma tradicional, con los resultados de las

Mayor Información

metodologías de estimación de curvas IDF generalizadas, implementadas en la calculadora. La metodología que presenta el error porcentual promedio más bajo es la del proceso máximo estable (del orden del 4%), mientras que la de escalamiento de la precipitación presenta un error promedio del 25%, siendo el más alto. Para los demás métodos el error es del orden del 15%, aproximadamente. En cuanto al error cuadrático medio, la metodología de escalamiento presenta los peores resultados, para todas las duraciones y periodos de retorno, seguida de la de Vargas y Díaz-Granados. La metodología del proceso máximo estable presenta los errores más bajos, seguida de la metodología de Chen.

A partir de estos resultados preliminares se puede inicialmente afirmar que las metodologías del proceso máximo estable y la de Chen tienen un gran potencial de aplicación en el territorio nacional. Para todas las metodologías se debe hacer un análisis más exhaustivo a nivel regional, en el que se incluyan más estaciones, para así poder refinar los resultados obtenidos, aquí reportados.



**Figura 8.-** Curvas IDF para el método de Chen (a), metodología de Vargas y Díaz-Granados (b), Escalamiento (c) y Proceso Máximo Estable (d)



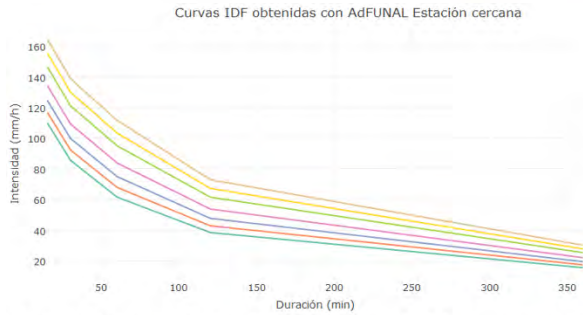


Tabla Curvas IDF obtenidas por Gumbel & L-momentos (AdFUNAL)

Estación 27015190 más cercana de las Curvas IDF obtenidas con AdFUNAL. Coordenadas: ( 881735.302, 1215123.467 )

	D15	D30	D60	D120	D360
Tr= 2años	110.10	85.54	61.50	38.41	15.46
Tr= 3años	117.02	92.28	67.85	42.77	17.32
Tr= 5años	124.72	99.79	74.91	47.63	19.38
Tr= 10años	134.40	109.23	83.79	53.74	21.98
Tr= 25años	146.63	121.16	95.01	61.45	25.26
Tr= 50años	155.70	130.00	103.33	67.19	27.70
Tr=100años	164.71	138.78	111.60	72.86	30.12

(a)

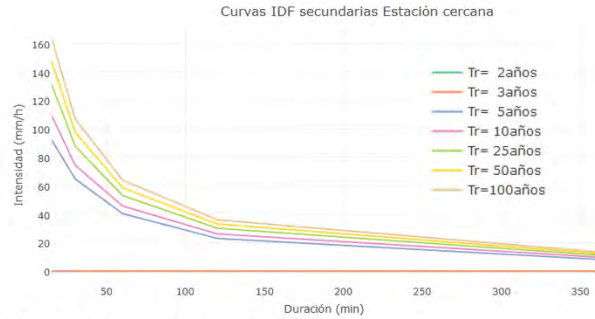


Tabla Curvas IDF Secundarias

Ref: 20 Estación Chorrillos más cercana de las Curvas IDF secundarias. Coordenadas: ( 842280 , 1188220 )

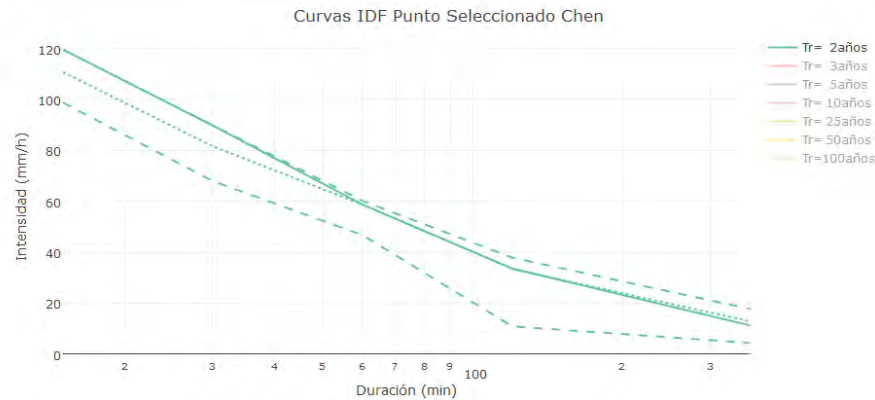
	D15	D30	D60	D120	D360
Tr= 2años	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Tr= 3años	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Tr= 5años	92.33	64.80	40.49	23.05	8.39
Tr= 10años	109.47	74.45	45.80	26.19	9.91
Tr= 25años	131.54	87.71	53.20	30.18	11.39
Tr= 50años	147.85	97.51	58.69	33.16	12.49
Tr=100años	163.79	106.98	64.01	36.10	13.64

(b)

**Figura 9.-** Curvas IDF obtenidas (a) por Gumbel y L-momentos y (b) por información secundaria Curvas IDF

Seleccione el periodo de retorno para mostrar la envolvente (líneas de guiones) y la mediana (línea de puntos)

Tr= 2años



**Figura 10.-** Envolvente de la curva IDF para un periodo de retorno de 2 años y resultados del método de Chen en la estación seleccionada como ejemplo.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se ha desarrollado una Calculadora de Curvas IDF generalizadas como herramienta que agrupa cuatro metodologías: Chen, Vargas y Díaz Granados, teoría de escalamiento y proceso máximo estable, la cual es muy útil para la estimación de las curvas IDF sintéticas o generalizadas en zonas en donde la información pluviográfica es escasa o nula. En este proyecto se utilizaron los datos de 106 estaciones pluviográficas actualizadas al año 2010, representando aproximadamente el 25% del total de estaciones operadas por el IDEAM en todo el país, que cuentan con registros pluviográficos y periodos de registro superiores a 10 años. Por consiguiente, al contar con un número de

Mayor Información



estaciones reducido, los resultados obtenidos mediante el uso de la calculadora son preliminares, de uso limitado, y deben usarse con precaución. Sin embargo, lo que es claro es que mediante el uso de la calculadora las metodologías de estimación de curvas IDF generalizadas incluidas en la misma muestran un gran potencial de aplicabilidad que se deberá explorar a futuro incorporando los datos de un mayor número de estaciones.

Al evaluar las curvas IDF generalizadas estimadas por las metodologías implementadas, versus las obtenidas con el método tradicional y ajustadas a la distribución Gumbel y el método de L-momentos, los errores promedio encontrados están en el rango entre 15-25%, es decir, que en general las cuatro metodologías de regionalización arrojan buenos resultados, para el conjunto de estaciones aquí analizadas, pero con incertidumbres importantes, que usualmente no se tienen en cuenta a la hora de utilizarlas como insumo en el diseño hidrológico. Cabe resaltar que los mejores resultados para la región Andina, se han obtenido con el proceso máximo estable, involucrando la ubicación y elevación del sitio de interés. Para las demás regiones el método de Chen estima los valores de intensidades bastante bien, seguido de la metodología de Vargas y Díaz-Granados (siendo esta la que actualmente más se utiliza en Colombia) y finalmente la metodología de escalamiento.

Se recomienda desarrollar a futuro un estudio más completo, abarcando la totalidad o un gran número de las estaciones pluviográficas disponibles en Colombia. Resulta también importante tratar de incluir y analizar, mediante el uso de la calculadora, otras metodologías de estimación de curvas IDF generalizadas, como las propuestas por Díaz-Granados y Puente (2006) y Díaz-Granados y Puente (2008), permitiendo al usuario disponer de múltiples opciones para la estimación de las intensidades en un punto cualquiera de la geografía nacional, incluyendo el análisis de las incertidumbres correspondientes.

## REFERENCIAS

**Bivand, R. et al.** (2017). rgdal: Bindings for the Geospatial Data Abstraction Library. R package version 1.2-7. Obtenido de <https://cran.r-project.org/web/packages/rgdal/rgdal.pdf>

**Chang, W. et al.** (2017). shiny: Web Application Framework for R. R package version 1.0.3. Obtenido de <https://cran.rstudio.com/web/packages/shiny/shiny.pdf>

**Chen, C.-I.** (1983). Rainfall intensity-duration-frequency formulas. Journal of hydraulic engineering, págs. 1603-1621.

**Cheng, J. et al.** (2017). leaflet: Create Interactive Web Maps with the JavaScript 'Leaflet' Library. R Package Version 1.1.0. Obtenido de <https://cran.r-project.org/web/packages/leaflet/leaflet.pdf>

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

**Díaz-Granados, M., Puente, X.** (2006). Estimación de curvas intensidad-duración-frecuencia a partir de información pluviométrica. XVII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología. Popayán, Colombia.

**Díaz-Granados, M., Puente, X.** (2008). Estimación de curvas intensidad-duración-frecuencia a partir de información pluviométrica. XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Cartagena, Colombia.

Mayor Información



**Dragulescu, A. A.** (2015). xlsx: Read, write, format Excel 2007 and Excel 97/2000/XP/2003 files. R package version 0.5.7. Obtenido de <https://cran.rstudio.com/web/packages/xlsx/xlsx.pdf>

**Elzhov, T. V., Mullen, K. M., Spiess, A.-N., & Bolker, B.** (2016). minpack.lm: R Interface to the Levenberg-Marquardt Nonlinear Least-Squares Algorithm Found in MINPACK, Plus Support for Bounds. R package version 1.2-1. Obtenido de <https://cran.r-project.org/web/packages/minpack.lm/minpack.lm.pdf>

**Fuentes, C., Rodríguez, E., Villarreal, E.,** (2018). HIDFUN una herramienta para la extracción y análisis de pluviogramas. Aceptado en el XXVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica Buenos Aires, Argentina. Septiembre de 2018.

**Gupta, V., & Waymire, E.** (1990). Multiscaling properties of spatial rainfall and river flow distributions. Journal of geophysical research.

**Hijmans, R. J. et al.** (2016). raster: Geographic Data Analysis and Modeling. R package version 2.5-8. Obtenido de <https://cran.r-project.org/web/packages/raster/raster.pdf>

**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.

**Kahle, D., & Wickham, H.** (2016). ggmap: Spatial Visualization with ggplot2. R package version 2.6.1. Obtenido de <https://cran.r-project.org/web/packages/ggmap/ggmap.pdf>

**Kendall, M.** (1975). Rank Correlation Methods. 4th edition, Charles Griffin, London.

**Koutsoyiannis, D., Kozonis, D., & Manetas, A.** (1998). A mathematical framework for studying rainfall intensity-duration-frequency relationships. Journal of Hydrology, págs. 118-135.

**Langousis, A., & Veneziano, D.** (2007). Intensity-duration-frequency curves from scaling representations of rainfall. Water Resour. Res., 43, W02422, doi:10.1029/2006WR005245.

**Madsen, H., Mikkelsen, P., Rosbjerg, D., & Harremoës, P.** (2002). Regional estimation of rainfall-intensity-duration-frequency curves using generalised least squares regression of partial duration series statistics. Water Resources Research, 38 (11), p. 1239, 10.1029/2001WR001125.

**Mann, H.** (1945). Non-parametric tests against trend. Econometrica 13:163-171.

**Pebesma, E. et al.** (2016). sp: Classes and Methods for Spatial Data. R package version 1.2-4. Obtenido de <https://cran.r-project.org/web/packages/sp/sp.pdf>

**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.

**Ribatet, M.** (2015). SpatialExtremes: Modelling Spatial Extremes. R package version 2.0-2. Obtenido de <https://cran.rstudio.com/web/packages/SpatialExtremes/SpatialExtremes.pdf>

**Sievert, C. et al.** (2017). plotly: Create Interactive Web Graphics via 'plotly.js'. R Package Version 4.7.0. Obtenido de <https://cran.r-project.org/web/packages/plotly/plotly.pdf>

**Silva Medina, G.** (1987). Hidrología en cuencas pequeñas con información escasa. Ingeniería e investigación, 24-30.

Mayor Información



Sociedad Colombiana  
de Ingenieros



Sociedad Tolimense  
de Ingenieros

**XXIII Seminario  
Nacional  
DE HIDRÁULICA E HIDROLOGÍA**

**Smith, E L, & Stephenson, A G.** (2009). An extended Gaussian max-stable process model for spatial extremes. *Journal of Statistical Planning and Inference*, 139(4), 1266–1275.

**Urbanek, S.** (2015). png: Read and write PNG images. R Package Version 0.1-7. Obtenido de <https://cran.rstudio.com/web/packages/png/png.pdf>

**Vargas M, R., & Díaz-Granados O, M.** (1998). Curvas Sintéticas Regionalizadas de Intensidad-Duración-Frecuencia para Colombia. XIII Seminario de Hidráulica e Hidrología, Sociedad Colombiana de Ingenieros. Cali, Agosto 1998.

**Westra, S., & Sisson, S.** (2011). Detection of non-stationarity in precipitation extremes using a max-stable process model. *Journal of Hydrology*. 406, 119-128.

**Wickham, H., & Francois, R.** (2016). dplyr: A Grammar of Data Manipulation. R Package Version 0.5.0. Obtenido de <https://cran.r-project.org/web/packages/dplyr/dplyr.pdf>.

**WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. WMO.** (2008). Guide to Hydrological Practices. Volume I. Hydrology - From Measurement to Hydrological Information, WMO-No. 168, Sixth edition.

Mayor Información

Comisión Técnica Permanente  
de Ingeniería de Recursos Hídricos

57 (1) 5550520 [logistica@sci.org.co](mailto:logistica@sci.org.co)