

DOI: 10.24850/j-tyca-2019-06-01

Artículos

## **Ajuste de curvas IDF a partir de tormentas de corta duración**

### **Intensity-Duration-Frequency curves on short duration storms**

Alfonso Gutiérrez-López<sup>1</sup>

Raisa Barragán-Regalado<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad Autónoma de Querétaro, México, [alfonso.gutierrez@uaq.mx](mailto:alfonso.gutierrez@uaq.mx),  
ORCID: 0000-0003-2770-8642

<sup>2</sup>Universidad Autónoma de Querétaro, México, ORCID: 0000-0001-8765-5875

Autor para correspondencia: Alfonso Gutiérrez-López,  
[alfonso.gutierrez@uaq.mx](mailto:alfonso.gutierrez@uaq.mx)

#### **Resumen**

Las curvas intensidad-duración-frecuencia (IDF) se utilizan en hidrología para caracterizar la intensidad de la lluvia en función de su duración y su periodo de retorno. Estas curvas son de gran importancia en la planificación de recursos hídricos, así como para el diseño de obras hidráulicas. La ecuación empírica propuesta por Sherman en 1931 sigue siendo utilizada en la actualidad. Los parámetros de esta ecuación se estiman por métodos de mínimos cuadrados o de optimización. Sin embargo, los valores obtenidos para parametrizar esta ecuación carecen de sentido físico. Empleando datos de 523 tormentas monitoreadas a cada minuto se obtienen sus curvas IDF. Los resultados muestran que el parámetro que ajusta el factor de escala de la fórmula de Sherman es función de la duración típica de las tormentas que se analizan. Se concluye que el factor de escala debe obtenerse de relaciones físicas y no de métodos analíticos. Se recomienda que se revisen las curvas

IDF, calculadas tradicionalmente, y se comparen las duraciones típicas de tormenta con el factor de escala de la fórmula de Sherman.

**Palabras clave:** intensidad-duración-periodo de retorno, curvas IDF, Sherman, duración de tormenta, lluvia, hietograma.

### **Abstract**

The curves intensity-duration-frequency (IDF) are used in hydrology to characterize the intensity of rainfall according to its duration and its return period. These curves are of great importance in the planning of water resources, as well as for the design of hydraulic works. The empirical equation proposed by Sherman in 1931, is still used today. The parameters of this equation are estimated by least squares or optimization methods. However, the values obtained to parameterize this equation do not have a physical sense. Using data from 523 monitored storms every minute, IDF curves are obtained. The results show that the parameter that adjusts the scale factor of the Sherman formula is a function of the typical duration storms. It is concluded that the scale factor must be obtained from physical relationships and not from analytical methods. It is recommended that traditionally calculated IDF curves be reviewed and typical storm durations compared with the scale factor of Sherman's formula.

**Keywords:** Intensity of rainfall-storm duration-return period, curves (IDF), Sherman, rainfall, hietogram.

Recibido: 16/09/2018

Aceptado: 09/02/2019

## **Introducción**

La primera fórmula matemática para ajustar intensidades máximas observadas en función de la duración acumulada de una tormenta fue

propuesta en 1904 por Talbot, un profesor de la Universidad de Illinois, EUA. Después, durante el decenio de 1930, se presentaron otras formulaciones, donde las intensidades se asociaron con la frecuencia de las precipitaciones anuales, a lo cual se conoce como Ley de Montana (Chocat, 1997). Así nacieron las primeras relaciones para describir de forma conjunta la intensidad, duración y probabilidad de ocurrencia de una tormenta, que se conocen como curvas intensidad-duración-frecuencia (IDF), y su objetivo es caracterizar la intensidad de la lluvia en función de su duración y periodo de retorno (Burn, 2014). En la actualidad, estas curvas son de gran importancia en la planificación de recursos hídricos, al igual que para el diseño de diversas obras hidráulicas (Asikoglu & Benzedden, 2012).

Debido a las presentes condiciones de cambio climático, el uso de curvas IDF para describir eventos extremos es fundamental en el diseño y manejo de proyectos de recursos hídricos (Adamowski & Bougadis, 2003).

Después de que Sherman (1931) y Bernard (1932) fueran los primeros en parametrizar esta triple relación, muchas fórmulas, índices, gráficos y mapas de la relación IDF se desarrollaron para explicar la intensidad de precipitación en función de su duración y asociada ambas a su probabilidad de ocurrencia (Seong, 2014).

Por su parte, Hershfield (1962) propuso una exhaustiva cartografía de dicha relación a lo largo de todo el territorio de EUA. Posteriormente, Bell (1969) y Chen (1983) estudiaron la relación entre las láminas de precipitación registradas en 1 hora y 24 horas ( $R = R_1^T / R_{24}^T$ ); siempre con el objeto de construir relaciones experimentales de curvas IDF. En estas curvas, la intensidad juega un papel muy importante respecto a su relación con el periodo de retorno. Es necesario en todo caso realizar un análisis de frecuencias para conocer el aumento en el volumen de escurrimiento y, por consiguiente, en el caudal asociado con la respuesta de la cuenca en el proceso lluvia-escurrimiento (Pizarro, Valdés, Abarza, & Garcia-Chevesich, 2015).

En Latinoamérica, al igual que en muchos países, la construcción de curvas IDF es una práctica frecuente. En Argentina, Puricelli (2018) realizó una revisión de los parámetros de las curvas IDF para la región de la Pampa para duraciones de 30, 60 y 120 minutos. Pizarro *et al.* (2013) construyeron curvas IDF para la región metropolitana de Chile, para duraciones de 1, 2, 4, 6, 8, 12 y 24 horas. También en Chile, Pizarro *et al.* (2007) obtuvieron las curvas IDF para las regiones de Valparaíso y O'Higgins. En la región del Bío-Bío y de Araucanía se determinó que las intensidades máximas aumentan a

medida que se avanza latitudinalmente de norte a sur, algo fundamental según la geografía de Chile (Pizarro *et al.*, 2012). En Uruguay, Silveira *et al.* (2014) actualizaron las curvas IDF para el departamento de Montevideo.

En México, Campos y Gómez (1990) fueron los primeros en estudiar la relación  $R = R_1^T / R_{24}^T$ , donde se encontró que a mayor elevación sobre el nivel del mar el valor de  $R$  es más grande y viceversa. Pereyra-Díaz, Pérez-Sesma y Gómez-Romero (2004) realizaron un análisis comparativo de las fórmulas propuestas por Sherman (1931), Bernard (1932), Chow, Maidment y Mays (1994), y Koutsoyiannis, Kozonis y Manetas (1998) para construir curvas IDF y mostraron las ecuaciones para las estaciones climatológicas más importantes del Golfo de México.

En diferentes regiones del mundo también se tiene mucho cuidado en analizar la naturaleza de un registro de precipitaciones, sus periodos de medición, la cantidad de lluvia que se registra en cada intervalo de tiempo y su relación final con la precipitación total en 24 horas (Hanel & Máca, 2014).

En Canadá, Cunderlik y Ouarda (2007) son precursores en la construcción de curvas IDF para sitios donde los registros son escasos o nulos (*at ungaged sites*). Esta transferencia de información hidrológica de un sitio a otro se lleva a cabo empleando técnicas de regionalización hidrológica (Liew, Raghavan & Liang, 2013). Es importante mencionar que estas técnicas toman en cuenta características fisiográficas de cuencas y la mayor cantidad de registros históricos de precipitación, ya que Burn y Taleghani (2013) demostraron que las curvas IDF son sensibles a la cantidad de datos históricos que se utilizan.

También la duración de cada tormenta en estudio es un elemento clave en la interpretación de las relaciones intensidad-duración y periodo de retorno (Svensson, Clarke, & Jones, 2007).

Para tener una idea de la clasificación de tormentas respecto a su duración suele emplearse una clasificación propuesta y utilizada en la provincia de Ontario, Canadá. Se consideran tormentas de corta duración a aquellas de cinco minutos a una hora, y las tormentas de larga duración de 1 a 24 horas (Bougadis & Adamowski, 2006). Estudios recientes demuestran que la significancia estadística de las curvas IDF se logra analizando duraciones de tormenta para 10, 15 y 30 minutos, así como para tormentas de 1 y 24 horas de duración (Soulis, Sarhadi, Tinel, & Suthar, 2016).

De esta forma, se pueden plantear tres preguntas, cuyas respuestas deben ser analizadas e incluidas en los próximos estudios hidrológicos: 1. ¿Cómo

caracterizar los eventos de lluvia en términos de intensidad y duración del evento?; 2. ¿Estas características de los eventos de lluvia son adecuadas en la simulación del proceso lluvia-escurrecimiento?; 3. ¿Existen características de la lluvia que pudieran ser relevantes para entender otros procesos del ciclo hidrológico? (como por ejemplo la duración de sequías hidrológicas o la erosión de suelo; Dunkerley, 2008b).

Respecto a la segunda pregunta, un análisis de registros históricos de pluviómetros con resolución de un minuto demostró que pueden identificarse claramente variaciones en las características de tormentas que se presentan en distintas zonas climáticas (Jones & Sims, 1978), por lo que las simulaciones de procesos hidrológicos deben realizarse con datos climatológicos medidos en el menor intervalo de tiempo posible.

Respecto a la tercera pregunta, el tamaño de la gota y su energía cinética son elementos que deben ser agregados a la lista de parámetros que requieren reproducirse de manera realista en los estudios hidrológicos (Dunkerley, 2008a).

El presente trabajo pretende dar nuevos elementos para responder a la primera pregunta.

En la actualidad, poca atención se pone al significado de los parámetros asociados con la duración de tormentas en las curvas IDF. Lejos de dar una interpretación física de los parámetros obtenidos, los investigadores se limitan a "ajustar" parámetros sin mayor significado. Como se comentó, la medición a cada minuto es recomendada y debe promoverse, pues existen evidencias de tormentas donde se registraron intensidades de 68 mm/h en un minuto en cuencas continentales a latitudes medias y hasta 238 mm/h para condiciones subtropicales marítimas (Dunkerley, 2008a). De lo anterior, es claro que debe estudiarse la duración de una tormenta de corta duración, menores de cinco minutos.

El presente artículo tiene como objetivo ajustar curvas IDF, utilizando registros de tormentas en donde se incluyan tormentas monitoreadas a cada minuto, debido a que se tienen disponibles este tipo de registros. El propósito es conocer si existe algún significado físico del parámetro  $C$  y su eventual relación con los estadísticos de la muestra de datos históricos. Se deberá probar que la duración típica de una tormenta en un cierto sitio debe ser utilizada en la ecuación propuesta por Sherman (1931).

## Materiales y métodos

A partir de la parametrización propuesta por Sherman (1931), se adopta en todo el mundo la representación matemática y gráfica del cálculo de curvas intensidad ( $i$ )-duración ( $d$ )-frecuencia ( $T$ ). Esta formulación es una ecuación racional del tipo:

$$i_d^T = f(x) = \frac{P(T)}{Q(d)} ; P(T), Q(d) \in \mathbb{R}[\text{tiempo}] \quad (1)$$

En esta expresión, tanto el numerador como el denominador son función del tiempo. El numerador  $P(T)$  es función de un número promedio de años ( $T$ ) e indica el cuantil para la frecuencia acumulada  $(1 - 1/T)$  de una función de distribución de probabilidad de una variable aleatoria  $Y = \{I_j(d_j + C)^n ; j = 1, \dots\}$ , la cual puede ser expresada como  $P(T) = F_Y^{-1}\left(1 - \frac{1}{T}\right)$ , donde  $F^{-1}(\cdot)$  define el inverso de una función de distribución de probabilidad (Seong, 2014). Para el denominador, que también es función del tiempo, se admite que puede expresarse como un polinomio que permite factorización puede escribirse:

$$Q(d) = (d - C_1)^{n_1} (d - C_2)^{n_2} \dots (d^2 + d + \dots + C_i)^{n_i} \dots$$

A este término se le llama factor de escala o de duración. Sustituido como denominador en la ecuación (1) se puede escribir como:

$$i_d^T = \frac{k T^m}{(d^\theta + C)^n} \quad (2)$$

Donde:

$i$  = intensidad de la precipitación, en mm/h

$T$  = periodo de retorno, en años

$d$  = duración de tormenta, en minutos

$k, m, n, C$  y  $\theta$  = parámetros de ajuste a estimar.

Una propiedad muy importante de esta expresión es que el factor de escala que caracteriza la duración puede ser formulado independientemente de la distribución de precipitaciones máximas anuales, definida por  $F^{-1}(\cdot)$  (Asikoglu & Benzedden, 2012).

La ecuación (2) es ampliamente utilizada y varios autores han propuesto diferentes valores de los parámetros  $k, m, n, C$  y  $\theta$ . En todos los casos, dichos parámetros son estimados por procedimientos numéricos, analíticos, numérico lineal, no lineal, estadísticos y de optimización. Valores óptimos de  $\theta$  pueden ser calculados mediante un procedimiento de prueba y error (Koutsoyiannis *et al.*, 1998; Lopcu, 2007). Sin embargo, en un ningún caso se tiene evidencia de que cualquiera de estos parámetros tenga significado físico. Es decir, no se ha demostrado que los parámetros de la ecuación (2) estén relacionados con alguna característica fisiográfica o climatológica del entorno. La Tabla 1 muestra los valores propuestos por diversos autores en la parametrización de la ecuación (2), siendo la de Sherman y Bernard las más utilizadas.

**Tabla 1.** Valores de los coeficientes de la ecuación (2) según diferentes autores.

Autor	k	m	n	$\theta$	C
Ley de Montana (Chocat, 1997) <sup>2</sup>			0		
Sherman (1931) <sup>2</sup>				1	
Bernard (1932) <sup>2</sup>		0	1	1	0
Linsley, Kohler y Paulhus (1949) <sup>1</sup>		0	1	1	
Wenzel (1982) <sup>2</sup>		0	1		
Chow <i>et al.</i> (1994) <sup>2</sup>			1	1	
Koutsoyiannis <i>et al.</i> (1998) <sup>3</sup>				1	
Seong (2014) <sup>2</sup>		1	(n · m)	1	

<sup>1</sup> Para duraciones ( $d$ ) entre 5 y 20 minutos, y mayores de 60 minutos; también conocida como de Talbot.

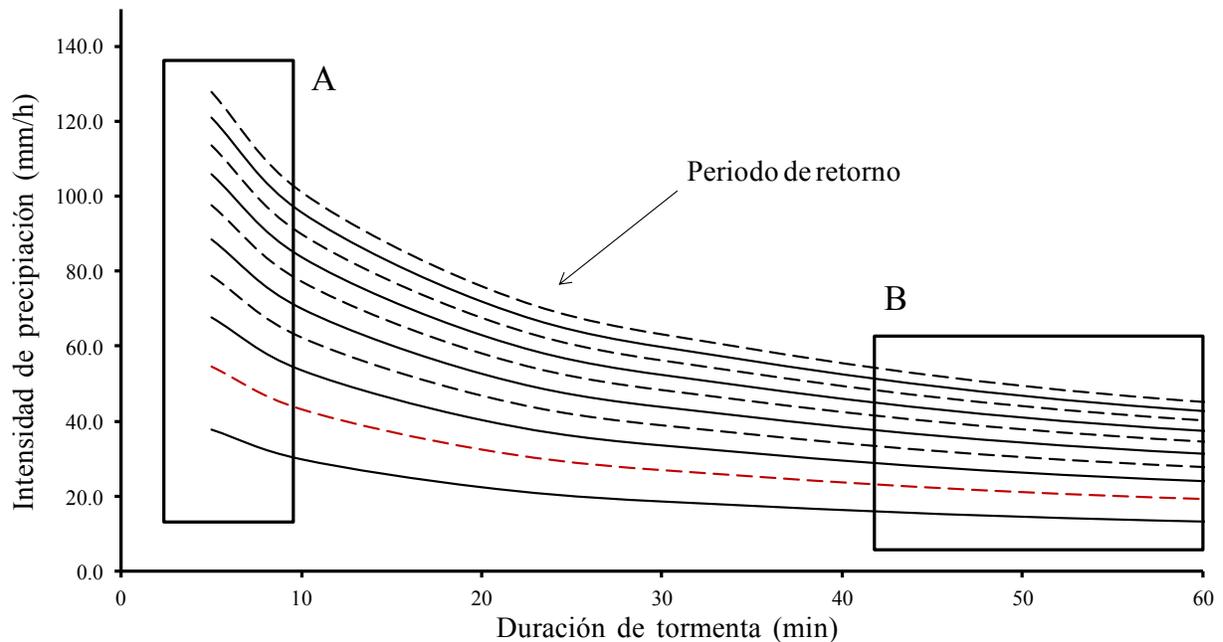
<sup>2</sup> También conocida como fórmula de Kimijima.

<sup>3</sup> Con  $T^m = m - \text{Ln}[-\text{Ln}(1 - 1/T)]$

La ecuación (2) es empleada como una formulación empírica para construir curvas IDF que tienden a converger paralelamente a medida que aumenta la duración ( $d$ ) (ver Figura 1, recuadro B). Es decir, entre mayor duración ( $d$ ), las curvas IDF tendrán un aspecto de paralelas y serán matemáticamente convergentes. La ecuación (2) es un modelo bivalente, ya que es una función del periodo de retorno ( $T$ ) y de la duración ( $d$ ); ambos en el dominio del tiempo. Para duraciones pequeñas, las curvas IDF son asintóticas al eje de las ordenadas (ver Figura 1, recuadro A), su crecimiento exponencial está condicionado justamente por el factor de escala  $(d^\theta + C)^n$ .

Seong (2014) demostró que el factor de escala  $(d^\theta + C)^n$  determina las propiedades estadísticas de la muestra de datos con la que se construyen las curvas IDF. Propiedades como la mediana, la dispersión o la asimetría se reflejan en el factor de escala. Tal afirmación adquiere una importancia crucial, pues si se observa la ecuación (1), ambos términos son función del tiempo. A su vez, la intensidad de la lluvia es función de un intervalo de tiempo y por lo tanto el parámetro  $C$  aditivo a la duración de la tormenta (en el parámetro de forma) tendría que tener unidades de tiempo. De esta forma, se acepta que los estadísticos de la muestra de datos pueden influir en las diferencias en la dispersión de intensidades  $\{I_j\}$  al trazar las curvas IDF. Ciertamente, en este proceso, el valor del parámetro  $C$  depende de varias condiciones estadísticas, como el sesgo o los valores atípicos de la muestra (Seong, 2014).

Lo que sí es cierto es que el parámetro  $C$  tiene unidades de tiempo y que es función de los estadísticos de la muestra. Sin embargo, la literatura científica publicada hasta el momento no ha especificado cuál duración ni cuál estadístico están relacionados con el valor de  $C$ . Como ya se comentó, la investigación en esta área se ha limitado a la estimación de los parámetros  $k$ ,  $m$ ,  $n$ ,  $C$  y  $\theta$  empleando la técnica de mínimos cuadrados o de optimización. Incluso en la actualidad, en latitudes y condiciones tan variadas, esta práctica se lleva a cabo ajustando los parámetros del factor de duración a partir de la muestra de datos (Sane *et al.*, 2018).



**Figura 1.** Representación tradicional de una curva IDF (ecuación (2)).

En este momento, en México se tiene acceso a datos de precipitación monitoreados a cada minuto en una de red de un poco más de 30 estaciones climatológicas en el centro del país (Aguilar, Pastor, Vázquez, & Ibarra, 2018). Dicha base de datos está formada por registros del año 2012 a agosto de 2018 (seis años en promedio); de esta forma, se utilizan los datos de 523 tormentas monitoreadas en dicha red a cada minuto. El propósito es conocer el significado físico del parámetro  $C$  y su eventual relación con los estadísticos de la muestra de datos históricos. Este estudio podría estimular el debate, revelar, proporcionar evidencia y contribuir al estudio del parámetro  $C$  dentro del factor de duración de la ecuación de Sherman (1931). Estudiar intensidades de tormenta para duraciones cortas no es una idea nueva y si bien no se utilizan para el diseño de obras hidráulica, sí es importante investigar intensidades de hasta 100 mm/h, las cuales se han presentado (y está documentado) para duraciones menores a cinco minutos (Sumner, 1978).

Hay más de 40 estaciones meteorológicas automáticas registrando datos de variables climatológicas, entre ellas, la precipitación. La base de datos de la red de monitoreo de precipitaciones extremas del estado de Querétaro

(RedCIAQ) registra las variables cada minuto (Gil, Ramírez, Muñoz, & González, 2018). Con esta información se integran series anuales para duraciones cortas de tormenta. Para este estudio se documentan las tormentas a partir de cinco y hasta los 20 minutos de duración. La Tabla 2 muestra un resumen de las duraciones y número de tormentas de algunas estaciones de la RedCIAQ. Para ejemplificar el procedimiento propuesto se utiliza la información de la estación Centro Histórico (id. CH-03). Con esta información se procede a calcular las intensidades de precipitación para cada duración y con ayuda de una tabla de frecuencias se asignan los periodos de retorno experimentales de cada serie de datos y se grafican. El detalle de este procedimiento se puede consultar en Aparicio (1989).

**Tabla 2.** Número de tormentas ( $ST_i$ ) para algunas estaciones del sistema de monitoreo de precipitaciones extremas de Querétaro.

Est.	Duración de tormenta ( $D_i$ ) (minutos)														TST
	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	18	20	
C-01	9	5	1	5	8	4	2	3	0	1	3	4	1	2	<b>48</b>
B-02	7	14	2	3	4	10	7	5	6	4	3	1	4	3	<b>73</b>
<b>CH-03</b>	<b>14</b>	<b>11</b>	<b>7</b>	<b>6</b>	<b>6</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>6</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>0</b>	<b>69</b>
CC-04	10	1	0	6	3	5	0	3	1	0	3	0	1	0	<b>33</b>
C-05	7	10	7	8	7	6	2	5	2	0	4	7	3	3	<b>71</b>
ER-06	26	11	0	6	9	7	1	4	1	2	5	2	1	2	<b>77</b>
M-07	13	16	7	6	10	5	6	2	4	2	7	2	2	0	<b>82</b>
RP-08	10	2	7	2	1	3	4	0	2	3	1	1	2	1	<b>39</b>
SJA-09	4	4	4	1	6	3	2	2	2	2	0	1	0	0	<b>31</b>
	<b>100</b>	<b>74</b>	<b>35</b>	<b>43</b>	<b>54</b>	<b>45</b>	<b>27</b>	<b>30</b>	<b>22</b>	<b>16</b>	<b>30</b>	<b>20</b>	<b>16</b>	<b>11</b>	<b>523</b>

A continuación se detallan los cuatro procedimientos que serán desarrollados y comparados en este estudio. Para calcular los valores del coeficiente  $C$ , en minutos, de la ecuación (2) se proponen las condiciones siguientes:

- a) [C-a] valor de  $C$  obtenido por el procedimiento numérico tradicional linealizando la ecuación (2), como  $\log i = \log k + m \log T - n \log(d^\theta + C)$  (Aparicio, 1989). También se pueden aplicar procedimientos de optimización no lineal (Mendoza, Trasviña, & Gutiérrez-López, 2018).

b) [C-b] valor de  $\bar{C}$  ponderado con el número de eventos ( $ST_i$ ) para cada duración de tormenta analizada ( $D_i$ ) en minutos, entre el número total de eventos registrados (TST). Se utiliza un arreglo similar al que se presenta en la Tabla 2.

$$c) \bar{C} = \frac{1}{TST} \sum (ST_i \cdot D_i) \quad (3)$$

d) [C-c] valor de  $C$  obtenido por tanteos hasta lograr “visualmente” que las curvas IDF se transformen en líneas rectas; cuando el eje de las duraciones, en es minutos, se representa en escala logarítmica (Koutsoyiannis *et al.*, 1998).

e) [C-d] valor de  $\hat{C}$  obtenido con un significado físico. Resulta al considerar un cambio proporcional de la intensidad respecto a la duración (en logaritmos). Matemáticamente, lo anterior puede expresarse a partir de diferenciales de intensidad y de tiempo, como lo muestra la ecuación (4). Para completar la diferencial se incluye un término constante que puede o no existir en función de los estadísticos de la muestra. Esto puede expresarse de la siguiente manera:

$$\hat{C} f(i, \Delta t) = i \frac{\partial \ln i}{\partial \ln \Delta t} + t \quad (4)$$

Resolviendo la diferencial por la regla de la cadena se tiene:

$$i \frac{\partial \ln i}{\partial \ln \Delta t} = i \frac{\partial \ln i}{\partial i} \frac{\partial i}{\partial \Delta t} \frac{\partial \Delta t}{\partial \ln \Delta t} = i \frac{\partial i}{\partial \Delta t} \frac{1}{i} e^{\ln(\Delta t)} = \frac{\partial i}{\partial \Delta t} e^{\ln(\Delta t)} = \left( \frac{\partial i}{\partial \Delta t} \Delta t \right) + t \quad (5)$$

Esta expresión denota el cambio de  $C$  en función de la intensidad. Es decir, el primer término  $\left[ \frac{\partial i}{\partial \Delta t} \Delta t \right]$  corresponde al cambio de la intensidad en un intervalo de tiempo durante todo el intervalo de tiempo; esto es, la duración ponderada con el número de tormentas ocurridas entre 5 y 20 minutos ( $\bar{C}$ ). Dicho término tiene una forma similar al factor de duración de la fórmula de Sherman (1931). El segundo término ( $t$ ) es la duración que caracteriza esa intensidad; esto es, la duración típica de una tormenta ( $D_t$ ); lo anterior se puede escribir como la suma del valor del coeficiente  $C$  ponderado más la duración típica de tormenta, en minutos, que se presenta en un sitio:

$$\hat{C} = \bar{C} + D_t \quad (6)$$

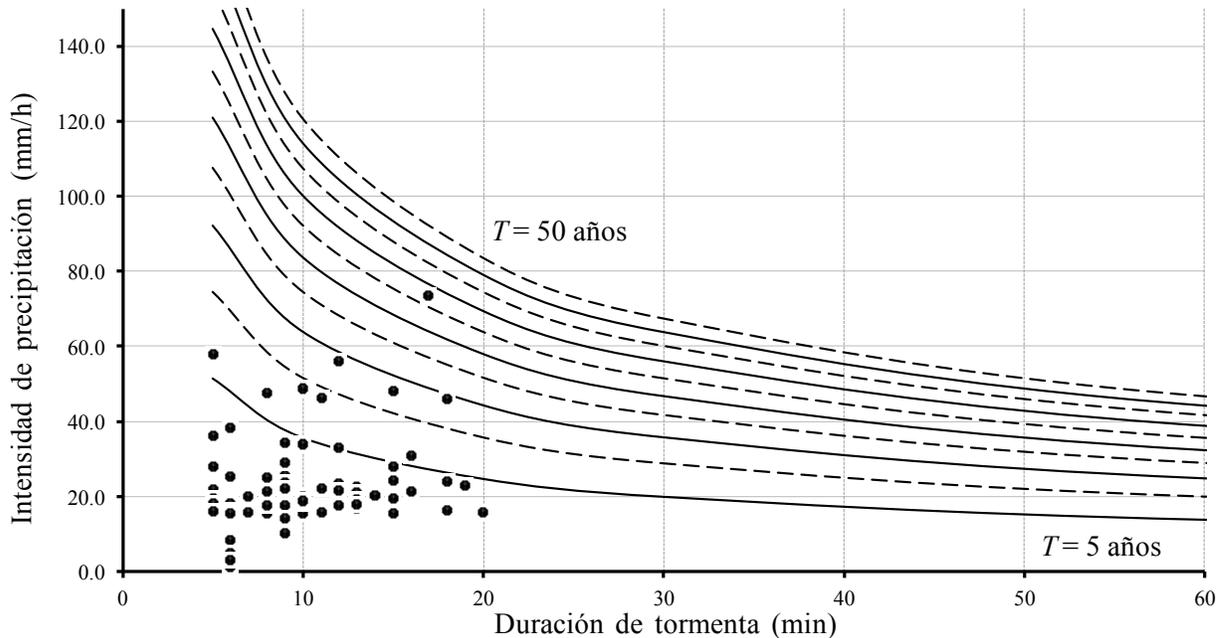
Es importante mencionar que existe toda una "polémica" sobre las duraciones de tormenta y tiempos de concentración en cuencas. Existe la "duda" de cuándo inicia y cuándo termina una tormenta. Si se acepta que las precipitaciones caen en "eventos" o "tormentas", cuyo comienzo y fin están definidos por intervalos sin lluvia, entonces se puede definir un tiempo mínimo entre eventos (MIT), conocido como *minimum inter-event time* (Dunkerley, 2008b). Se ha demostrado que la intensidad de precipitación puede disminuir hasta en un 50% si se toma un MIT cada vez mayor (Dunkerley, 2010). Lo anterior es evidente si se recuerda la fórmula propuesta por Sherman (1931), donde la intensidad de la precipitación es inversamente proporcional a la duración de la tormenta. Para fines de este trabajo, la duración de una tormenta es el intervalo de tiempo en minutos que transcurre desde el inicio hasta el final de una tormenta mientras no se registre un valor nulo de precipitación.

Una vez que se definen las cuatro condiciones para estimar el coeficiente  $C$ , se procede a realizar los cálculos respectivos. A continuación se muestran los resultados de las estaciones más emblemáticas de las cuales se tiene información a cada minuto.

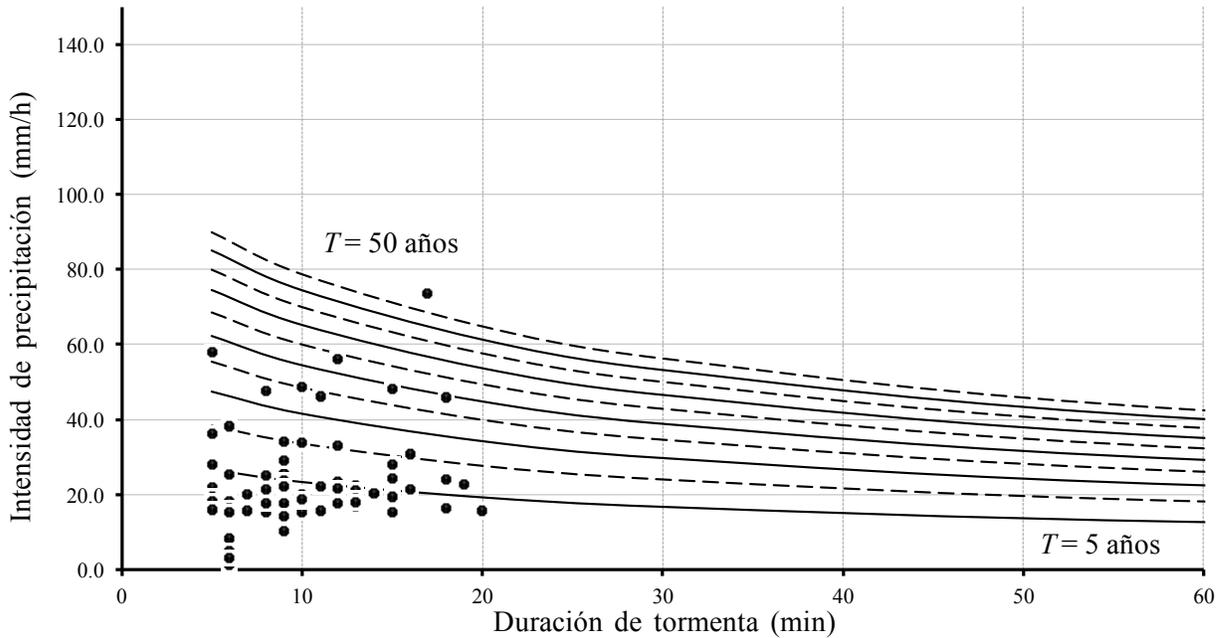
## Resultados

Empleando los datos históricos de las estaciones climatológicas con datos completos del año 2012 a agosto de 2018 se realizó el cálculo de sus respectivas curvas IDF. En cada estación se seleccionaron sólo tormentas con duraciones de 5 a 20 minutos, cada minuto. A continuación se procedió a realizar el ajuste de curvas IDF para las cuatro condiciones mencionadas. Asimismo, se incluye a manera de condición inicial el cálculo de la ecuación (2), con un valor de  $C = 0$  (Figura 2);  $C \neq 0$  para las demás condiciones. Los resultados de este procedimiento para la estación CH-03 se muestran en la Figura 3, Figura 4, Figura 5 y Figura 6. Como se puede observar, al tomar

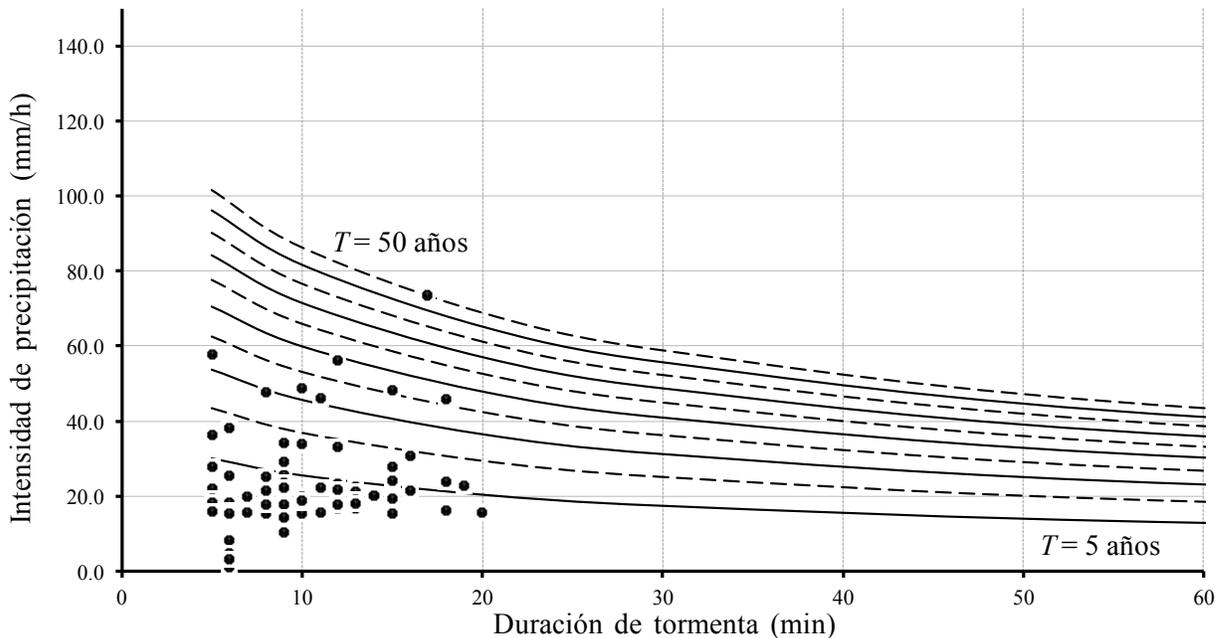
diferentes valores del parámetro  $C$  se modifica la posición de las curvas, principalmente en la zona del recuadro A, comentado ya en la Figura 1. La Tabla 3 muestra los resultados de algunas estaciones, así como los valores de la duración típica de las tormentas, el número de tormentas analizadas para cada estación y los valores del coeficiente  $C$  calculado para las condiciones mencionadas. También se muestra la intensidad típica ( $i$ ) en cada estación; es decir, la intensidad más frecuente del total de tormentas.



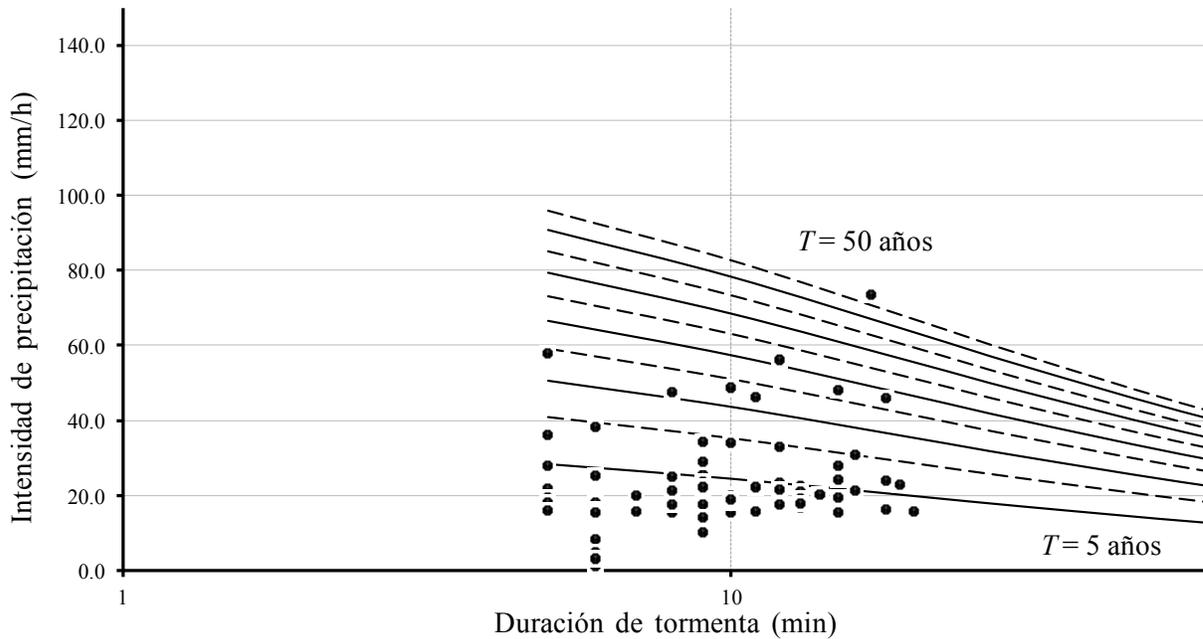
**Figura 2.** Curvas IDF ajustadas por regresión para la estación CH-03, tomando un valor de  $C = 0$ .



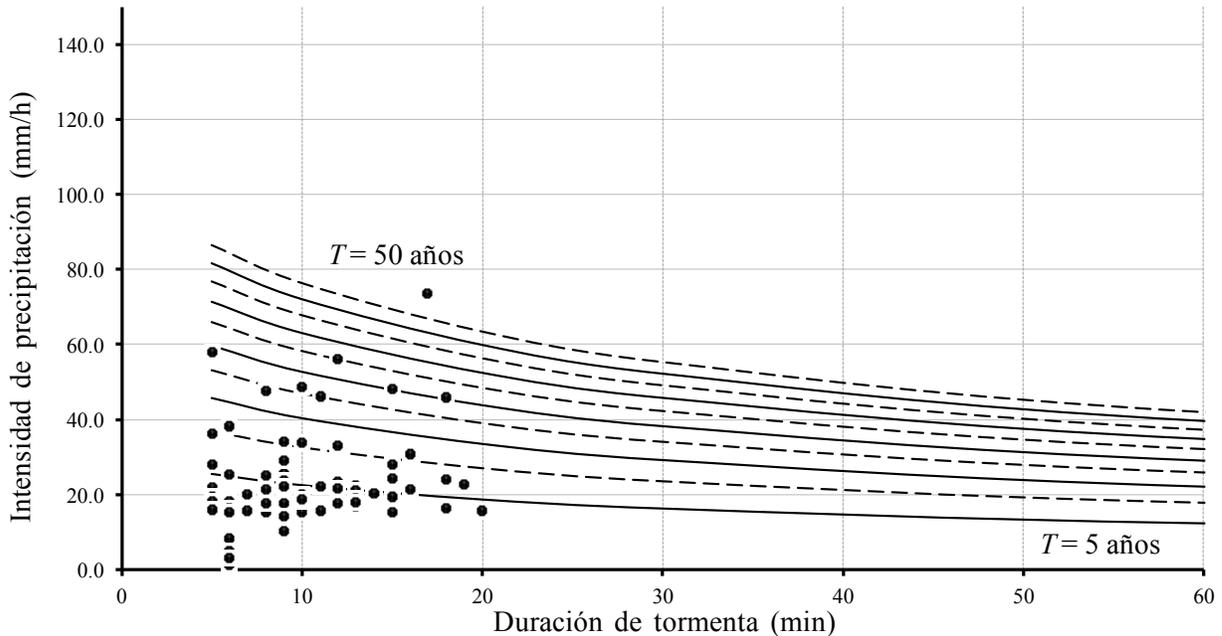
**Figura 3.** Curvas IDF ajustadas por regresión para la estación CH-03, condición [C-a] (C = 12.50).



**Figura 4.** Curvas IDF ajustadas por regresión para la estación CH-03 condición [C-b] ( $C = 8.88$ ).



**Figura 5.** Curvas IDF ajustadas por regresión para la estación CH-03 condición [C-c] ( $C = 10.5$ ).



**Figura 6.** Curvas IDF ajustadas por regresión para la estación CH-03 condición [C-d] ( $C = 13.88$ ).

El valor de  $C$  obtenido por el procedimiento [C-a] resultó  $C = 12.5$  para la estación CH-03. La Figura 3 muestra las curvas IDF con este procedimiento.

El valor de  $C$  obtenido por la ponderación propuesta en [C-b] resulta  $C = 8.88$  (Figura 4). Empleando los valores que se muestran en la Tabla 2, a continuación se detalla este cálculo:

$$\bar{C} = \frac{1}{69} [(14 \cdot 5) + (11 \cdot 6) + \dots + (2 \cdot 18) + (0 \cdot 20)] = 8.88 \text{ minutos}$$

Para la condición [C-c], el valor de  $C$  se obtuvo por tanteos hasta lograr una línea recta en las curvas IDF, con una escala logarítmica en el eje de las duraciones. Este resultado se muestra en la Figura 5.

Para el cálculo del valor de  $\hat{C}$  bajo el esquema propuesto [C-d], es necesario tomar el resultado de la condición [C-b] y sumar la duración típica de una tormenta ( $D_t$ ) registrada históricamente. Para el caso de la estación CH-3, se tiene según la ecuación (3):  $8.88 + 5 = 13.88$  minutos.

**Tabla 3.** Identificación de estaciones y valores del coeficiente C para las condiciones de análisis propuestas.

Est.	TST( $D_t$ )	$i$ (mm/h)	C-a (min)	C-b (min)	C-c (min)	C-d (min)
C-01	48(5)	18.0	13.55	9.85	10.0	14.85
B-02	73(6)	15.0	21.02	11.00	16.0	17.00
CH-03	69(5)	15.6	12.50	8.88	10.5	13.88
CC-04	33(5)	15.0	12.00	11.18	12.5	16.18
C-05	71(6)	15.0	13.03	10.98	8.0	16.98
ER-06	77(5)	15.6	12.07	7.70	13.0	12.70
M-07	82(6)	18.0	18.01	11.09	17.5	17.09
RP-08	39(5)	15.6	15.42	11.07	12.5	16.07
SJA-09	31(9)	15.0	13.51	11.29	12.5	20.29

## Discusión

Se encontró que para las duraciones cortas (5-20 minutos), la parte inicial de las curvas IDT se vuelve más sensible ante un valor de C dado. La intensidad de la lluvia muestra una disminución exponencial, con una duración de tormenta cada vez mayor. Es evidente que para una misma condición de duración y periodo de retorno, la Figura 2, Figura 3, Figura 4, Figura 5 y Figura 6 arrojarían valores diferentes de intensidad. Entonces debe existir un valor único de C para parametrizar las curvas de forma correcta.

Como ya se mencionó en la revisión de la literatura científica reflejada en la metodología, el parámetro C tiene unidades de tiempo y es un valor asociado con los estadísticos de las tormentas analizadas. Entonces, el valor correcto

de  $C$  debe ser el de alguno de los casos analizados [C-a], [C-b], [C-c] o [C-d], pero ¿Cuál de ellos? Los valores propuestos para dar un valor a  $C$  resultan similares cuando se observan las columnas [C-a], [C-b] y [C-c] prácticamente iguales, por ejemplo, para la estación CC-04. Ello indica que el valor de  $C$  que normalmente se ajusta con una regresión múltiple es un valor muy cercano al que se obtiene al ponderar con las duraciones y el número de tormentas. Esta combinación de resultados proporciona apoyo a la premisa que dice que  $C$  es un valor que logra una línea recta cuando se toman los logaritmos de las duraciones; entonces,  $C$  resulta de una modificación de la intensidad directamente proporcional al cambio de la intensidad respecto a la duración (en logaritmos).

Los valores así obtenidos para las demás estaciones se muestran en la columna [C-d] de la Tabla 3. Para verificar tales resultados, el valor de  $C$  así calculado será el correcto sólo si una fracción adicional  $C$  a la duración de tormenta mantendrá la cantidad total de precipitación ( $H_p$ ). Lo anterior puede expresarse como  $H_p = \int_0^C i dt$ . Derivando esta expresión respecto a  $C$  se tiene:

$$\frac{\partial H_p}{\partial C} = i(C) \quad (7)$$

Si la cantidad total de precipitación se mantiene igual a la que se registra en las curvas IDF, entonces  $H_p = C i$ . Derivando esta expresión respecto a  $C$  e igualando con (7) se tiene que:

$$\frac{\partial H_p}{\partial C} = i + \left( C \frac{\partial i}{\partial C} \right) \quad (8)$$

Se comprueba que el valor correcto de  $C$  modifica la intensidad de precipitación durante la duración ( $d$ ) de la fórmula de Sherman (1931)  $C$ , adicional a la duración de la tormenta.

Por último, como ejemplo, la Tabla 4 muestra los valores de las intensidades de precipitación (mm/h) calculados para diferentes periodos de retorno, estimados en la estación CH-03 para una duración de 10 minutos y diversos valores propuestos del parámetro  $C$ . Como se puede observar, la formulación propuesta para calcular  $C$  es acorde con los valores que tradicionalmente se

usan para ajustar las curvas IDF; pero en este caso, si se toma la condición [C-d], puede decirse que el valor de  $C$  tiene un significado físico de acuerdo con la duración y ocurrencia de las tormentas.

**Tabla 4.** Intensidades de precipitación (mm/h) para diferentes periodos de retorno estimados en la estación CH-03 para una duración de 10 minutos y diferentes valores propuestos del parámetro  $C$ .

$T$ (años)	$C = 0$	$(C-a) = 12.5$	$(C-b) = 8.88$	$(C-c) = 10.5$	$(C-d) = 13.88$
20	74.4	48.4	53.1	50.9	46.9
10	51.6	33.5	36.8	35.2	32.5
5	35.7	23.2	25.5	24.4	22.5

## Conclusiones

Los resultados de este trabajo tienen implicaciones importantes en el desarrollo futuro de las curvas IDF. Primero,  $C$  es independiente del periodo de retorno ( $T$ ). Cuando se utilice la fórmula de Shermann (1931), el valor de  $C$  debe ser obtenido como una ponderación entre las duraciones de tormentas (5-20 minutos) y el número de eventos registrados más la duración típica de la tormenta más frecuente en el sitio.

Entre las futuras y posibles preguntas de investigación que pueden formularse a partir de estos resultados es que  $C$  no debe calcularse mediante métodos de regresión múltiple ni de optimización. Debe obtenerse a partir de los estadísticos de la muestra histórica de tormentas. Estos resultados ayudan a comprender que existe un significado físico en el valor del parámetro  $C$ . Aceptando que  $C$  es parte del factor de duración de la fórmula de Shermann (1931), se recomienda que estudios futuros, e incluso curvas IDF ya calculadas en sitios muy específicos, deben ser revisadas, considerando el significado físico del parámetro  $C$ .

Los resultados proporcionan soporte concluyente para determinar que el valor de  $C$  es una condición física del sitio y de la muestra de datos.  $C$  no es una variable aleatoria y debe calcularse a partir de la muestra de datos.

Los presentes hallazgos parecen ser consistentes con los de otras investigaciones, que ya encontraron valores de  $C$  muy cercanos a las duraciones y número de tormentas, pero que no habían sido explícitamente mencionados en los resultados. Por ejemplo, Olsson, Berggren, Olofsson y Viklander (2009: 374) mencionan: "la serie de tiempo de precipitaciones que permite la transferencia correcta al modelo es de **30 minutos**" y la duración de la tormenta que inicia todo el estudio es de **35 minutos**, ¿casualidad? Otra evidencia de esta conclusión se encuentra en Cheng, Wei, Cheng y Yeh (2003: 16), donde se dice que "el índice de tormentas asociado a las láminas de precipitación para las tormentas de diseño tienen una duración de **60 minutos**" y la ecuación IDF que se presenta es del tipo Koutsoyiannis *et al.* (1998), donde  $C = 55$ , ¿otra casualidad? Los mismos Koutsoyiannis *et al.* (1998) mencionan que el parámetro  $C$  varía entre 0 y  $C_{\text{máx}} = 12d_{\text{mín}}$ ; ellos utilizan duraciones de tormentas en horas, su datos varían entre **0.083** h (5 minutos) y **0.167** h (10 minutos). Los resultados de su trabajo presentan dos ecuaciones IDF. Para obtener los parámetros de dichas ecuaciones utilizan el método de momentos-L y una rutina de optimización (Koutsoyiannis *et al.*, 1998: 129). Los coeficientes encontrados de  $C$  para las curvas IDF fueron  $C = 0.189$  y  $C = 0.143$ , respectivamente.

Finalmente, respecto a las duraciones de tormenta, definir la duración de una tormenta utilizando el criterio del MIT significa dar un comportamiento arbitrario a un periodo sin lluvia, lo cual puede traer errores graves en la interpretación de las curvas IDF. Por ejemplo, si se toma un MIT = 3 horas, un evento definido como una tormenta podría contener uno o más periodos sin lluvia de casi tres horas de duración. Es claro que este enfoque no es apropiado para estudiar eventos intensos de corta duración, lo cual es cada vez más necesario, sobre todo en cuencas urbanas (Dunkerley, 2010).

## Referencias

- Adamowski, K., & Bougadis, J. (2003). Detection of trends in annual extreme rainfall. *Hydrological Processes*, 17(18), 3547-3560. DOI: 10.1002/hyp.1353

- Aguilar, E., Pastor, D., Vázquez, A., & Ibarra, D. (2018). Recolección de datos meteorológicos en tiempo real mediante el uso de funciones asíncronas non-blocking. *Revista NTHE*, (24), 113-117.
- Aparicio, F. (1989). *Fundamentos de hidrología de superficie*. México, DF, México: Editorial Limusa.
- Asikoglu, O., & Benzedden, E. (2012). Simple generalization approach for intensity-duration-frequency relationships. *Hydrological Processes*, 28(3), 1114-1123. DOI: 10.1002/hyp.9634
- Bell, F. (1969). Generalized rainfall-duration-frequency relationships. *ASCE Journal of Hydraulics Division*, 95(HY1), 311-327.
- Bernard, M. (1932). Formulas for rainfall intensities of long durations. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 96, 592-624.
- Bougadis, J., & Adamowski, K. (2006). Scaling model of a rainfall intensity-duration-frequency relationship. *Hydrological Processes*, 20(17), 3747-3757. DOI: 10.1002/hyp.6386
- Burn, D. (2014). A framework for regional estimation of intensity-duration-frequency (IDF) curves. *Hydrological Processes*, 28(14), 4209-4218. DOI: 10.1002/hyp.10231
- Burn, D., & Taleghani, A. (2013). Estimates of changes in design rainfall values for Canada. *Hydrological Processes*, 27(11), 1590-1599. DOI: 10.1002/hyp.9238
- Campos, D., & Gómez, R. (1990). Procedimiento para obtener curvas IDT a partir de registros pluviométricos. *Ingeniería hidráulica en México*, 5(2), 39-52.
- Chen, C. (1983). Rainfall intensity-duration-frequency formulas. *ASCE Journal of Hydraulic Engineering*, 109(12), 1603-1621.
- Cheng, K., Wei, C., Cheng, Y., & Yeh, H. (2003). Effect of spatial variation characteristics on contouring of design storm depth. *Hydrological Processes*, 17(9), 1755-1769. DOI: 10.1002/hyp.1209
- Chocat, B. (1997). *Encyclopédie de l'hydrologie urbaine et de l'assainissement*. Collection Eaux Pluviales. Paris, France: Lavoisier.
- Chow, V., Maidment, D., & Mays, L. (1994). *Hidrología aplicada*. Santa Fe de Bogotá, Colombia: McGraw-Hill.

- Cunderlik, J., & Ouarda, T. (2007). Regional flood-rainfall duration-frequency modeling at small ungaged sites. *Journal of Hydrology*, 345(1-2), 61-69. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2007.07.011
- Dunkerley, D. (2008a). Identifying individual rain events from pluviograph records: A review with analysis of data from an Australian dryland site. *Hydrological Processes*, 22(26), 5024-5036. DOI: 10.1002/hyp.7122
- Dunkerley, D. (2008b). Rain event properties in nature and in rainfall simulation experiments: A comparative review with recommendations for increasingly systematic study and reporting. *Hydrological Processes*, 22(22), 4415-4435. DOI: 10.1002/hyp.7045
- Dunkerley, D. (2010). How do the rain rates of sub-event intervals such as the maximum 5 and 15-min rates (I5 or I30) relate to the properties of the enclosing rainfall event? *Hydrological Processes*, 24, 2425-2439. DOI: 10.1002/hyp.7650
- Gil, S., Ramírez, G., Muñoz, M., & González, S. (2018). Implementación de un modelo de datos para el almacenamiento de información climatológica en el estado de Querétaro. *Revista NTHE*, (24), 16-19.
- Hanel, M., & Máca, P. (2014). Spatial variability and interdependence of rain event characteristics in the Czech Republic. *Hydrological Processes*, 28, 2929-2944. DOI: 10.1002/hyp.9845
- Hershfield, D. (1962). Extreme rainfall relationships. *ASCE Journal of Hydraulics Division*, 88(HY6), 73-92.
- Jones, D., & Sims, A. (1978). Climatology of instantaneous rainfall rates. *Journal of Applied Meteorology*, 17, 1135-1140.
- Koutsoyiannis, D., Kozonis, D., & Manetas, A. (1998). A mathematical framework for studying rainfall intensity-duration-frequency relationships. *Journal of Hydrology*, 206(1-2), 118-135. DOI: 10.1016/s0022-1694(98)00097-3
- Liew, S., Raghavan, S., & Liang, S. (2013). How to construct future IDF curves, under changing climate, for sites with scarce rainfall records? *Hydrological Processes*, 28(8), 3276-3287, DOI: 10.1002/hyp.9839
- Linsley, R., Kohler, M., & Paulhus, J. (1949). *Applied hydrology*. New York, USA: McGraw-Hill.

- Lopcu, Y. (2007). *Modeling the intensity-duration-frequency relationships of annual maximum storms*. (MSc Thesis). Dokuz Eylul University, Izmir, Turkey.
- Mendoza, C., Trasviña, J., & Gutiérrez-López, A. (2018). Empleo del algoritmo GRG Nonlinear en el cálculo de intensidades de lluvia. *Revista NTHE*, (24), 11-15.
- Olsson, J., Berggren, K., Olofsson, M., & Viklander, M. (2009). Applying climate model precipitation scenarios for urban hydrological assessment: A case study in Kalmar City, Sweden. *Atmospheric Research*, 92, 364-375. DOI: 10.1016/j.atmosres.2009.01.015
- Pereyra-Díaz, D., Pérez-Sesma, J., & Gómez-Romero, L. (2004). Ecuaciones que estiman las curvas intensidad-duración-periodo de retorno de la lluvia. *GEOS* 24(1), 46-56.
- Pizarro, R., Aravena, D., Macaya, K., Abarza, A., Cornejo, M., Labra, M., Pavez, M., & Román, L. (2007). *Curvas intensidad-duración-frecuencia para la zona centro sur de Chile*. PHI-VI Documento Técnico N° 7. Montevideo, Uruguay: Programa Hidrológico Internacional de UNESCO (PHI) para América Latina y el Caribe.
- Pizarro, R., Valdés, R., García-Chevesich, P., Vallejos, C., Sangüesa, C., Morales, C., Balocchi, F., Abarza, A., & Fuentes, R. (2012). Latitudinal analysis of rainfall intensity and mean annual precipitation in Chile. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 72(2), 252-261.
- Pizarro, R., Sangüesa, C., Bro, P., Ingram, B., Vera, M., Vallejos, C., Morales, C., Olivares, C., Balocchi, F., Fuentes, R., Mendoza, R., Abarza, A., & Valdés, R. (2013). *Curvas intensidad-duración-frecuencia para las regiones Metropolitana, Maule y Biobío. Intensidades desde 15 minutos a 24 horas*. PHI-VII Documento Técnico N° 29. Montevideo, Uruguay: Programa Hidrológico Internacional de UNESCO (PHI) para América Latina y el Caribe.
- Pizarro, R., Valdés, R., Abarza, A., & Garcia-Chevesich, P. (2015). A simplified storm index method to extrapolate intensity-duration-frequency (IDF) curves for ungauged stations in central Chile. *Hydrological Processes*, 29(5), 641-652. DOI: 10.1002/hyp.10187
- Puricelli, M. (2018). Rainfall extremes modeling under shortage of data and uncertainty in the Pampean region (Argentina). *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 44(2), 719-742. DOI: 10.18172/cig.3371

- Sane, Y., Panthou, G., Bodian, A., Vischel, T., Lebel, T., Dacosta, H., Guillaume, Q., Catherine, W., Ousmane, N., Diongue-Niang, A., & Mariane, D. (2018). Intensity-duration-frequency (IDF) rainfall curves in Senegal. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18(7), 1849-1866. DOI: 10.5194/nhess-18-1849-2018
- Seong, K. (2014). Deriving a practical form of IDF formula using transformed rainfall intensities. *Hydrological Processes*, 28, 2881-2896. DOI: 10.1002/hyp.9806
- Sherman, C. (1931). Frequency and intensity of excessive rainfall at Boston, Mass. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 95(1), 951-960.
- Silveira, L., Usera, G., Alonso, J., Scavone, M., Chreties, C., Perera, G., & González, M. (2014). Nuevas curvas intensidad-duración-frecuencia de precipitación para el departamento de Montevideo, Uruguay. *Agrociencia Uruguay* 18(1), 113-125.
- Soulis, E., Sarhadi, A., Tinel, M., & Suthar, M. (2016). Extreme precipitation time trends in Ontario, 1960-2010. *Hydrological Processes*, 30(22), 4090-4100. DOI: 10.1002/hyp.10969
- Sumner, G. (1978). The prediction of short-duration storm rainfall intensity maxima. *Journal of Hydrology*, 37(1-2), 91-100. DOI: 10.1016/0022-1694(78)90098-7
- Svensson, C., Clarke, R., & Jones, D. (2007). An experimental comparison of methods for estimating rainfall intensity-duration-frequency relations from fragmentary records. *Journal of Hydrology*, 341(1-2), 79-89. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2007.05.002
- Wenzel, H. (1982). Rainfall for urban storm water design. In: *Urban storm water hydrology* (pp. 35-67). Water Resources Monograph 7. Washington DC, USA: American Geophysical Union.