

## Ecuaciones de lluvia intensa generalizada para obtener precipitaciones máximas de corta duración

Domitilo Pereyra-Díaz, Carolina A. Ochoa-Martínez y José Antonio A. Pérez-Sesma

Carrera de Ciencias Atmosféricas de la Facultad de Instrumentación Electrónica, Universidad Veracruzana. Circuito Gonzalo Aguirre Beltrán s/n, Zona Universitaria, Xalapa, Veracruz. 91090 México.

E-mail: dpereyra@uv.mx; orac8a@hotmail.com;

### RESUMEN

Debido a la escasez de datos de intensidad para precipitación máxima de corta duración, del orden de minutos, en la República Mexicana, surge la necesidad de evaluar estas intensidades por medio de ecuaciones. En este estudio se presenta el modelo de lluvia intensa generalizada de Bell y Chen, que debe ajustarse a los registros pluviométricos; en este caso, de la ciudad de Xalapa, Veracruz (período 1927-2002). Para obtener los parámetros de ajuste de las ecuaciones, se utilizaron las precipitaciones máximas registradas en 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120 minutos y veinticuatro horas, para períodos de retorno de 2, 5, 10, 25 y 50 años. Para lo anterior, se utiliza el método cuasi-newton de aproximaciones sucesivas. Realizada la estimación para las ecuaciones de lluvia intensa generalizada, se encontró que, para la duración de una hora, la ecuación de Bell subestima la precipitación para períodos de retorno de 2 a 25 años, mientras que la de Chen la sobrestima para períodos de retorno de 2 a 5 años y la subestima para períodos de 10 a 50 años. Con solo conocer las precipitaciones máximas en una y veinticuatro horas, que es información disponible en los observatorios meteorológicos de México, la aplicación de este modelo puede extenderse a otros lugares donde las precipitaciones máximas duran menos de dos horas.

**Palabras Clave:** Lluvia intensa generalizada, curvas intensidad-duración-período de retorno, estimación no lineal.

### ABSTRACT

Data of maximum precipitation intensity for periods in the order of minutes is scarce in Mexico. For that reason, we propose the usage of equations to evaluate such intensities. In this study, the equations of intense generalized rainfall of Bell and Chen are presented, adjusted to the pluviometric records of Xalapa city, Veracruz, (period 1927-2002). To obtain the adjustment parameters of the equations, we used the maximum precipitations registered for 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120 minutes and twenty-four hours, for return periods of 2, 5, 10, 25 and 50 years, using the Quasi-Newton method of successive approaches. The evaluation of the equations of intense generalized rainfall, showed that the Bell equation underestimates the precipitation for return periods from 2 to 25 years, while the Chen equation overestimates the return periods from 2 to 5 years and underestimates for periods from 10 to 50 years. We conclude that based only on the maximum precipitations in one and twenty-four hours, information available at the Mexican meteorological observatories, the application of this model is valid for other places where maximum precipitations are less than two hours long.

**Keywords:** Intense generalized rainfall, intensity-duration-return period curves, non lineal estimation.

**Cita:** Pereyra-Díaz, D., Ochoa-Martínez, C. A. y Pérez-Sesma, J. A. A., 2005, Ecuaciones de lluvia intensa generalizada para obtener precipitaciones máximas de corta duración, *GEOS*, Vol. 25, No. 2.

## INTRODUCCIÓN

Según Maidment (1993), las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia de la lluvia (IDF) permiten calcular la intensidad promedio para cierta probabilidad de excedencia y duración. Mientras que Campos (1998) se refiere a las curvas IDF como gráficas en las cuales se concentran las características de las tormentas de la zona o región, con respecto a sus 3 variables principales: magnitud, duración y frecuencia. Considerando que la frecuencia es el inverso del período de retorno (T) o intervalo de recurrencia, el cual es el tiempo promedio, en años, en el que el evento puede ser igualado o excedido por lo menos una vez en promedio (Campos, 1987), se puede hablar de curvas Intensidad-Duración-Período de retorno (IDT) como sinónimo de las curvas IDF. Zapata (1998), realizó un estudio en donde aplica las curvas IDF al sur de España, utilizando cinco estaciones pluviométricas; menciona que las relaciones IDF generalizadas pueden obtenerse a partir de mapas isopluviales editados para grandes regiones geográficas. El desarrollo de estas relaciones es descrito por Bell (1969), Chen (1983), Stedinger *et al.* (1993) y Froehlich (1993 y 1995). Genovez y Pegoraro (2001) presentan una validación y adecuación de las ecuaciones de lluvias intensas generalizadas propuestas por Bell (1969) y Chen (1983). Después de aplicar las ecuaciones a las precipitaciones de varias ciudades de Sao Pablo, Brasil, recomendaron que estas ecuaciones pueden ser utilizadas para localidades sin información pluviométrica.

Para México, Campos (1990) sugirió un procedimiento para estimar las curvas IDT a partir de registros pluviométricos, de 33 estaciones, usando el cociente lluvia-duración, que relaciona a la lluvia de una hora y período de retorno de 2 años (o cualquier otro) con la de 24 horas para el mismo período de retorno. En este estudio aplicó las condiciones de Bell (1969) y Chen (1983). Encontró que la ecuación de Bell es más útil para duraciones pequeñas y períodos de retorno de 2 a 10 años y la de Chen es más funcional para períodos de retorno mayores o iguales a 10 años. Pereyra *et al.* (2002) ajustaron tres ecuaciones a una serie pequeña de precipitaciones máximas de Xalapa, las cuales describen las curvas IDT para duraciones menores a 2 horas. Estas mismas ecuaciones fueron ajustadas a tres localidades del estado de Quintana Roo (Bando *et al.*, 2002); en ambos casos se obtuvieron buenos resultados.

Domínguez y Franco (2002) estimaron el coeficiente K que relaciona la precipitación máxima de una hora con la correspondiente a 24 horas, para la República Mexicana y para el Valle de México, considerando diferentes períodos de retorno, habiendo propuesto una posible relación con los procesos físicos de formación de nubes. Pereyra *et al.* (2004) presentan una recopilación de las ecuaciones que estiman las curvas intensidad-duración-período de retorno de la lluvia, para duraciones menores o iguales a dos horas, y las compara al ajustarlas a las precipitaciones máximas registradas en la ciudad de Xalapa, Veracruz.

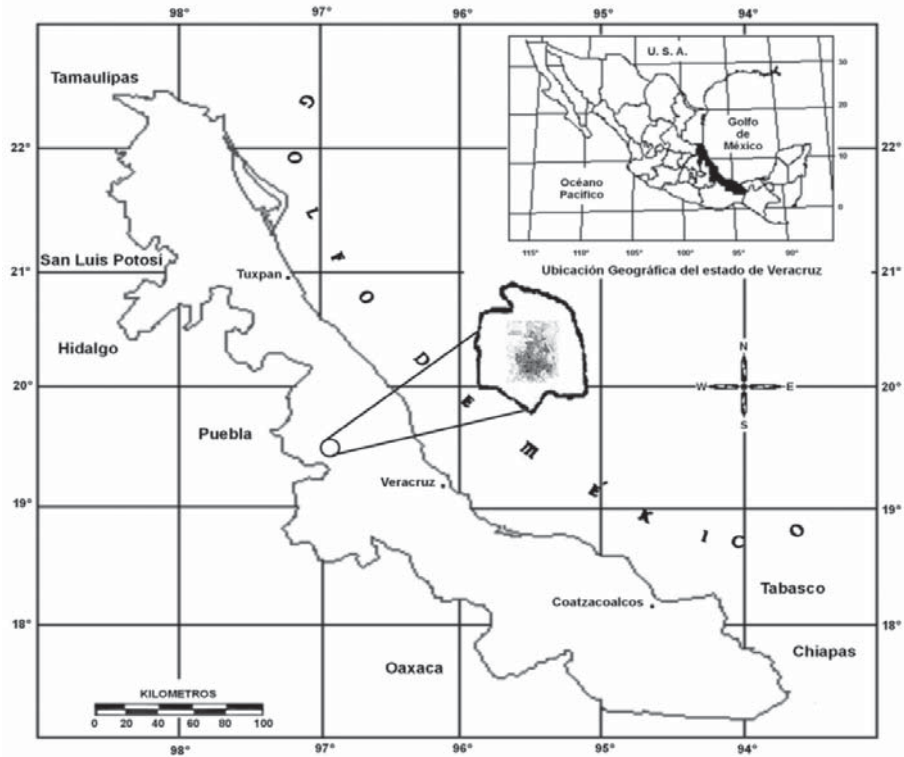
El objetivo de este estudio fue ajustar las ecuaciones de lluvia intensa generalizada, propuestas por Bell (1969) y Chen (1983), a las precipitaciones máximas de la ciudad de Xalapa, con el propósito de poderlas usar en otras partes del país, y en especial del estado de Veracruz, cuando se cuenta con precipitaciones máximas horarias y diarias y se requiera de precipitaciones máximas de corta duración para diseñar obras hidráulicas.

## METODOLOGÍA

La ciudad de Xalapa es la capital del estado de Veracruz y se ubica en la región central del estado, sobre la parte oriental del Cofre de Perote (4 200 m de altitud), a 19° 31' 35" latitud norte y 96° 54' 35" longitud oeste y a una elevación promedio de 1 400 msnm (Figura 1). Dentro de la ciudad se encuentra el cerro Macuiltépetl (1580 m de altitud). El clima de la ciudad de Xalapa es semicálido-húmedo con temperatura media anual de 19.6°C, la del mes más frío es de 10.0°C (enero) y la del mes más cálido es de 26.0 °C (mayo). La temporada de lluvia se presenta entre mayo y octubre, y la precipitación anual oscila entre 917.5 y 2 231.8 mm. La precipitación máxima registrada en una hora, en el período 1927-2002, varía entre 24.9 y 96.2 mm y en 24 horas entre 38.4 y 241.1 mm (CNA, 2004).

En este estudio se ajustaron las ecuaciones de lluvia intensa generalizada, propuesta por Bell (1969) y Chen (1983), a las precipitaciones máximas de la ciudad de Xalapa, Veracruz, registradas en el período 1927-2002. Las precipitaciones máximas utilizadas fueron para las duraciones de 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110,





**Figura 1 Ubicación geográfica de la ciudad de Xalapa, Veracruz (Tomada de Pereyra et al., 2000).**

120 minutos y 24 horas, obtenidas de los pluviogramas proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN). A continuación se describen las ecuaciones.

a) Ecuación de Bell

Bell (1969) encontró una ecuación generalizada de intensidad-duración-periodo de retorno, combinando las razones; lámina de lluvia-frecuencia (Ec. 1) con la lámina de lluvia-duración (Ec. 2).

$$\frac{P'_T}{P'_{10}} = a \ln T + b \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde  $P'_T$  es la lámina de lluvia en el tiempo  $t$  (en minutos) para un período de retorno  $T$  (en años),  $P'_{10}$  es la lámina de lluvia para el tiempo  $t$  (minutos) y período de retorno de 10 años.

$$\frac{P'_T}{P'_T} = at^b + c \quad (\text{Ec. 2})$$

y  $P'_T$  es la lámina de lluvia para la duración de 60 minutos y período de retorno  $T$  (años).

Resolviendo las ecuaciones (1) y (2), y combinándolas obtuvo la ecuación generalizada para la lámina de lluvia-duración-frecuencia (Ec. 3),

$$P'_T = (0.21 \ln T + 0.52)(0.54t^{0.25} - 0.50)P'^{60}_{10} \quad (\text{Ec. 3})$$

para 2 años  $\leq T \leq 100$  años y 5 minutos  $\leq t \leq 120$  minutos.

b) Ecuación de Chen

Chen (1983) presentó una fórmula general de intensidad-duración-periodo de retorno, útil para estimaciones dentro del intervalo de 5 minutos a 24 horas. Para la aplicación de la fórmula de Chen se requiere conocer los cocientes:

1) lámina de lluvia-duración,  $R = \frac{R_1^T}{R_{24}^T}$

donde  $R_1^T$  es la precipitación acumulada en una hora y período de retorno  $T$  y  $R_{24}^T$  es la precipitación acumulada en 24 horas y período de retorno  $T$ .

2) lámina de lluvia-periodo de retorno,

$$X = \frac{R_1^{100}}{R_1^{10}}$$

donde  $R_t^{100}$  es la precipitación en el tiempo  $t$  (minutos) y período de retorno de 100 años y  $R_t^{10}$  es la precipitación en el tiempo  $t$  (minutos) y período de retorno de 10 años.

La fórmula propuesta por Chen para estimar la lluvia (en milímetros) de duración  $t$  (minutos) y período de retorno  $T$  (años) es

$$R_t^T = \frac{aR_1^{10} \log(10^{(2-x)}T^{(x-1)})}{(t+b)^c} \quad (\text{Ec. 4a})$$

la cual es válida para las siguientes condiciones:  $T \in [1, 100]$  año y  $5 \text{ min} \leq t \leq 24 \text{ horas}$ . Donde  $R_1^{10}$  es la lluvia registrada para una duración de una hora y período de retorno de 10 años, en milímetros;  $a$ ,  $b$  y  $c$  son parámetros en función del cociente  $R$  y se determinan utilizando la Figura 2.

Chen (1983) supuso una condición promedio para la lluvia, considerando las variaciones geográficas, esto es, consideró que la razón  $R = 40\%$  y  $X = 1.48$ , con estas condiciones  $a = 22.57$ ,  $b = 7.48$  y  $c = 0.738$ , sustituyendo valores obtuvo la ecuación

$$R_t^T = \frac{22.57R_1^{10} \log(10^{(0.52)}T^{(0.48)})}{(t+7.48)^{0.738}} \quad (\text{Ec.4b})$$

La Tabla 1 muestra la lluvia máxima en los intervalos de tiempo utilizados para ajustar las ecuaciones de Bell y Chen a las precipitaciones de la ciudad de Xalapa, Veracruz.

Las precipitaciones máximas anuales de la ciudad de Xalapa, registradas en veinticuatro horas con su respectivo período de retorno, se muestran en la Tabla 2.

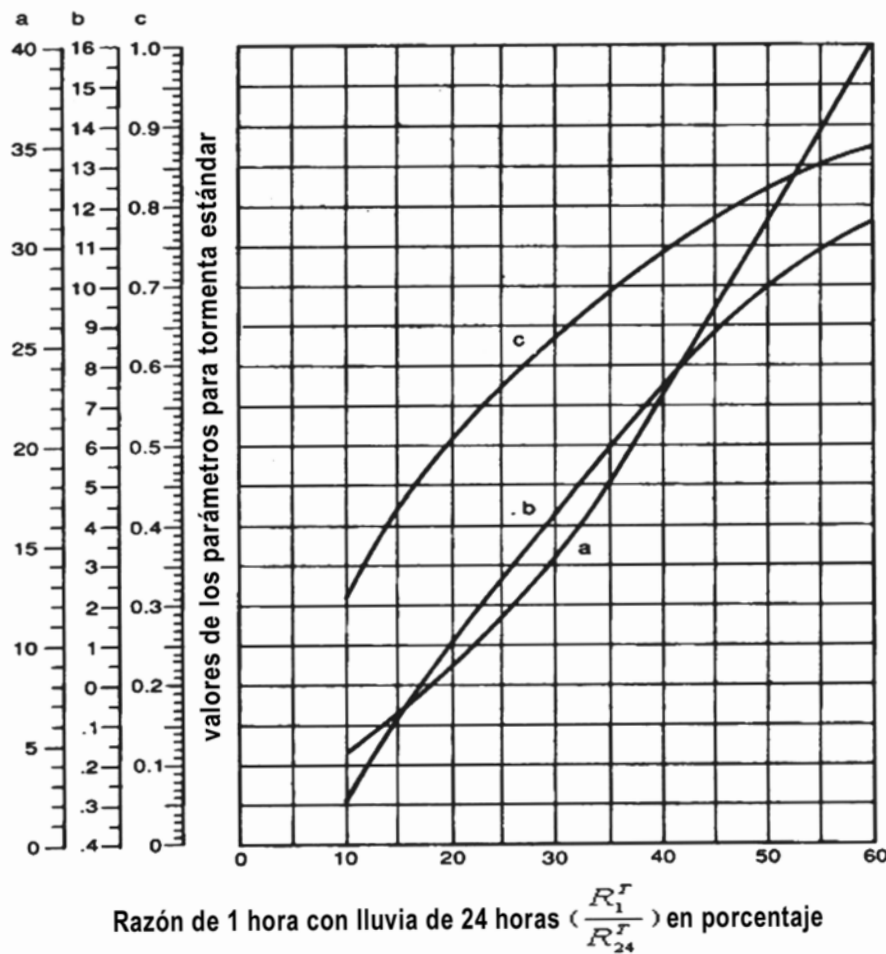


Figura 2. Relación entre los parámetros (a, b, c) de una tormenta estándar y la razón de la lluvia de una hora con la de 24 horas (Fuente: Chen, 1969).

**Tabla 1. Lluvia máxima (en mm) por intervalos de duración (en minutos, columnas), registrada en la ciudad de Xalapa, Veracruz para el periodo 1927-2002, ordenadas según el periodo de retorno (en años, renglones).**

N	7	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
1	50.000	30.0	45.0	60.0	73.0	81.0	87.0	92.0	97.0	101.5	105.5	107.5	108.0
2	25.0000	30.0	44.0	57.5	68.5	78.0	85.0	92.0	95.0	97.0	99.0	100.5	101.5
3	16.6667	25.0	44.0	54.0	64.0	73.0	77.5	82.5	89.5	94.0	96.5	98.0	99.0
4	12.5000	24.0	41.5	53.0	63.5	71.0	77.0	81.0	84.0	86.5	88.5	91.0	94.0
5	10.0000	24.0	40.0	52.0	63.5	69.5	75.0	80.5	83.5	86.0	88.0	90.5	92.5
6	8.33333	23.0	37.5	47.5	57.5	66.5	74.0	78.5	82.5	84.5	87.5	88.5	89.5
7	7.14286	21.0	37.0	47.5	57.0	63.0	68.5	74.0	79.5	84.0	85.0	85.5	86.0
8	6.2500	21.0	34.5	47.5	55.5	63.0	66.5	72.0	78.5	80.0	80.5	83.0	85.0
9	5.55556	20.0	34.0	46.5	54.0	62.0	63.0	69.5	74.0	77.0	80.0	81.0	81.5
10	5.0000	19.0	33.5	44.0	51.0	57.0	63.0	67.5	70.5	73.5	75.5	76.5	77.5
11	4.54545	19.0	32.5	42.0	50.0	56.5	62.5	67.5	70.5	71.0	71.2	72.5	74.5
12	4.16667	19.0	32.0	42.0	49.5	54.0	61.0	62.5	63.5	67.0	69.5	71.4	74.0
13	3.84615	18.0	30.0	42.0	48.0	53.5	60.0	61.0	63.0	66.5	69.0	70.5	71.6
14	3.57143	17.5	29.5	38.5	46.0	52.5	56.0	60.5	62.5	66.0	68.0	70.0	71.5
15	3.33333	17.0	29.0	37.0	43.5	50.0	54.5	58.0	62.5	65.0	67.0	70.0	71.0
16	3.1250	16.0	28.5	37.0	43.0	49.5	53.5	58.0	62.0	64.0	66.5	69.0	71.0
17	2.94118	15.5	28.0	36.5	43.0	49.0	53.0	57.5	62.0	62.5	66.5	68.5	70.0
18	2.77778	15.5	27.0	36.0	43.0	49.0	52.5	56.5	61.0	62.5	63.0	63.0	65.5
19	2.63158	15.0	27.0	35.5	42.5	48.5	52.5	56.0	59.0	62.0	62.5	62.5	63.0
20	2.5000	15.0	27.0	34.5	42.0	48.0	51.0	54.0	57.5	60.5	61.5	62.5	63.0
21	2.38095	14.5	26.5	34.0	41.5	47.5	50.5	54.0	57.0	59.0	60.5	62.0	63.0
22	2.27273	14.0	25.5	33.5	41.0	46.5	50.0	53.5	55.0	57.5	59.5	62.0	62.5
23	2.17391	14.0	24.0	33.0	41.0	45.5	49.5	52.5	55.0	57.0	59.0	61.0	62.0
24	2.08333	14.0	24.0	33.0	41.0	44.5	49.5	52.5	54.5	56.0	59.0	60.0	60.5
25	2.0000	14.0	24.0	33.0	40.0	44.5	49.5	51.5	54.5	55.5	57.0	58.5	59.5
26	1.92308	13.5	23.5	32.0	38.0	44.0	47.5	51.0	53.5	55.5	56.5	57.0	58.5
27	1.85185	12.5	23.5	31.0	38.0	43.5	47.5	51.0	52.5	54.5	55.5	56.5	57.5
28	1.78571	12.5	23.0	30.5	38.0	43.2	47.5	50.5	51.5	54.5	54.5	56.0	57.5
29	1.72414	12.0	22.5	30.0	36.6	43.0	46.6	50.5	51.5	51.5	53.5	54.5	55.4
30	1.66667	12.0	22.0	30.0	36.5	42.0	46.0	48.2	51.0	51.5	52.0	53.5	55.0
31	1.6129	12.0	22.0	30.0	36.0	42.0	45.0	47.5	48.6	50.5	51.5	53.2	54.5
32	1.5625	12.0	22.0	29.5	36.0	41.0	45.0	46.5	48.0	49.5	51.5	52.5	52.5
33	1.51515	12.0	21.5	29.0	35.5	38.5	43.5	45.5	47.5	49.0	50.6	51.5	51.5
34	1.47059	11.6	21.0	29.0	33.5	37.0	41.5	44.5	47.5	49.0	50.0	50.0	51.0
35	1.42857	11.5	21.0	29.0	33.0	36.5	40.5	44.0	47.5	48.0	49.2	49.6	51.0
36	1.38889	11.0	20.8	28.5	33.0	36.2	40.0	44.0	46.0	47.4	48.5	49.5	50.0
37	1.35135	11.0	20.6	28.0	32.5	36.0	40.0	42.4	44.6	46.5	48.0	49.4	49.5
38	1.31579	11.0	20.0	27.6	32.0	36.0	39.0	41.5	44.0	46.4	47.5	49.0	49.4
39	1.28205	10.0	20.0	27.5	32.0	36.0	37.0	40.4	43.5	45.5	47.0	47.5	48.0
40	1.2500	10.0	20.0	27.0	32.0	35.5	36.8	39.5	42.0	43.5	45.0	46.5	47.5
41	1.21951	10.0	20.0	27.0	31.5	35.5	36.5	38.5	40.0	42.0	43.5	44.5	45.0
42	1.19048	10.0	20.0	27.0	31.5	34.5	36.0	37.5	40.0	41.5	43.0	44.0	45.0
43	1.16279	10.0	20.0	26.5	31.0	34.0	36.0	37.0	39.0	40.5	41.5	42.5	43.0
44	1.13636	10.0	19.5	24.5	30.0	32.6	35.5	37.0	38.5	40.0	41.0	42.0	43.0
45	1.11111	10.0	18.5	24.0	29.0	32.5	35.0	36.5	37.0	37.5	38.0	39.5	40.5
46	1.08696	10.0	18.5	23.5	28.5	32.5	35.0	36.0	36.5	36.5	38.0	38.5	39.0
47	1.06383	9.5	18.4	23.2	28.0	32.0	35.0	36.0	36.0	36.0	36.5	36.5	36.5
48	1.04167	9.4	17.0	22.0	27.5	32.0	34.0	35.5	35.5	36.0	36.0	36.0	36.0
49	1.02041	8.5	16.5	22.0	27.0	30.5	32.0	32.0	34.0	35.5	35.5	35.5	35.5

Precipitación (mm)

## RESULTADOS

Para el ajuste de la ecuación generalizada propuesta por Bell (1969), para el caso específico de la ciudad de Xalapa, primero se obtuvo la razón entre la lluvia de una hora, con periodos de retorno de 1, 2, 5, 25 y 50 años, y la lluvia de una hora, con periodo de retorno de 10 años (Tabla 4).

Utilizando el método de Quasi-Newton del paquete Statistica v.6.0 (Statsoft, Inc., 2003), se encontraron los valores de los parámetros  $a$  y  $b$  de la ecuación (1) y se obtuvo para Xalapa la ecuación

$$\frac{P_t^r}{P_{10}^r} = 0.19 \ln T + 0.49 \quad (\text{Ec. 5})$$

**Tabla 2. Precipitación máxima anual en 24 horas entre 1920 y 2002, ordenadas de mayor a menor, con su respectivo período de retorno (T).**

N	T	Precipitación máxima anual en 24 horas(mm)	N	T	Precipitación máxima anual en 24 horas(mm)	N	T	Precipitación máxima anual en 24 horas(mm)	N	T	Precipitación máxima anual en 24 horas(mm)
1	82	241.1	22	3.72	103.1	43	1.9	81.9	64	1.28	68.1
2	41	211.2	23	3.56	102.9	44	1.86	81.5	65	1.26	67.1
3	27.3	194.4	24	3.41	101.8	45	1.82	81.4	66	1.24	66.2
4	20.5	183.8	25	3.28	98.7	46	1.78	80.6	67	1.22	66
5	16.4	175	26	3.15	95.5	47	1.74	80.6	68	1.2	65.2
6	13.6	158	27	3.03	95.5	48	1.7	80.4	69	1.18	65.2
7	11.7	153.2	28	2.92	94.1	49	1.67	78.8	70	1.17	64
8	10.2	152.7	29	2.82	94	50	1.64	77.9	71	1.15	63.3
9	9.1	149.2	30	2.73	93.3	51	1.6	77.2	72	1.13	63.3
10	8.2	120.6	31	2.64	90	52	1.57	76.1	73	1.12	62
11	7.4	120	32	2.56	89.7	53	1.54	75.5	74	1.1	61.2
12	6.8	111.6	33	2.48	89.4	54	1.51	74.8	75	1.09	57.1
13	6.3	111.5	34	2.41	89.3	55	1.49	74.5	76	1.07	57
14	5.8	109.8	35	2.34	87.4	56	1.46	74.1	77	1.06	54.5
15	5.4	109	36	2.27	86.6	57	1.43	73.5	78	1.05	53.1
16	5.1	109	37	2.21	85	58	1.41	72	79	1.03	50.6
17	4.8	108.3	38	2.15	83.4	59	1.38	71.2	80	1.02	47.8
18	4.55	107.5	39	2.1	83.3	60	1.36	71.2	81	1.01	32
19	4.31	107.5	40	2.05	83.2	61	1.34	70.5			
20	4.1	106.4	41	2	82.3	62	1.32	69.7			
21	3.9	105.6	42	1.95	82.2	63	1.3	68.6			

N es el número de orden, T es el período de retorno en años.

**Tabla 3. Precipitaciones máximas anuales en una hora, registradas en la ciudad de Xalapa, Veracruz entre 1920 y 2002.**

Año	Precipitación máxima anual en 1 hora (mm)	Año	Precipitación máxima anual en 1 hora (mm)	Año	Precipitación máxima anual en 1 hora (mm)	Año	Precipitación máxima anual en 1 hora (mm)
1920	62.5	1941	39.2	1962	48.2	1983	37.4
1921	38.5	1942	38.2	1963	39.5	1984	60
1922	44.2	1943	47.6	1964	40	1985	54.5
1923	50.5	1944	31	1965	65	1986	49
1924	62.8	1945	29.2	1966	51.5	1987	74.5
1925	45.4	1946	24.9	1967	37.5	1988	33.5
1926	96.2	1947	35	1968	50	1989	55.1
1927	40	1948	36.4	1969	32.8	1990	59.5
1928	43.7	1949	48.5	1970	75	1991	50.5
1929	48.2	1950	30.8	1971	54.3	1992	33.4
1930	40	1951	47.5	1972	52	1993	S/D
1931	52	1952	79	1973	56.5	1994	S/D
1932	32.5	1953	49	1974	56	1995	38.3
1933	50	1954	51	1975	69.5	1996	82.5
1934	70	1955	49	1976	30	1997	58.8
1935	40	1956	30	1977	48	1998	40
1936	46	1957	47.8	1978	53.5	1999	52.3
1937	65	1958	50	1979	48.5	2000	59
1938	47	1959	79	1980	50	2001	40.8
1939	50	1960	42.5	1981	71.9	2002	72.2
1940	52	1961	60	1982	43.5		





cuyo coeficiente de determinación  $R^2= 0.965$ . Esta ecuación es válida para periodos de retorno de  $2 \leq T \leq 50$  años.

El siguiente paso fue obtener las razones entre la lluvia con duración de 10 minutos hasta 120 minutos y periodos de retorno de 2, 5, 25 y 50 años, contra la lluvia de una hora y periodo de retorno de 10 años (como denominador) Tabla 5.

La Figura 3 muestra gráficamente las razones obtenidas, para diferentes periodos de retorno, para la ciudad de Xalapa, Veracruz.

Dado que sólo se tienen, en este caso, datos de una sola estación (Xalapa), para encontrar las razones suavizadas que eliminan la intersección entre las curvas obtenidas (Figura 3), se procedió a promediar los valores de los periodos de retorno de 5, 10 y 25 años con su inmediato anterior y posterior, dejando los mismos valores para T igual a 2 y 50 años (Tabla 6).

La Figura 4 muestra la gráfica de las razones suavizadas (Tabla 6) para la ciudad de Xalapa donde ya no se observan intersecciones entre las curvas.

Así, las razones mostradas en la Tabla 6, se utilizaron para cualquier duración con periodo de retorno de 10 años y mediante el módulo de estimación no lineal del paquete Statistica v.6.0 (Statsoft, Inc., 2003) se obtuvieron los parámetros de la ecuación (1), por lo que la ecuación para la ciudad de Xalapa es

$$\frac{P_T^t}{P_T^{60}} = 0.51t^{0.27} - 0.59 \quad (\text{Ec. 6})$$

con un coeficiente de determinación  $R^2= 0.987$ . Por último, combinando las ecuaciones [5] y [6] se obtuvo la ecuación

$$P_T^t = (0.19 \ln T + 0.49)(0.51t^{0.27} - 0.59)P_{10}^{60} \quad (\text{Ec. 7}),$$

que es similar a la de Bell (1969) para los registros de la ciudad de Xalapa y es válida para los intervalos siguientes:

- $2 \leq T \leq 81$  años
- $10 \leq t \leq 120$  minutos.

La Figura 5 muestra las curvas intensidad-duración-periodo de retorno generadas por la ecuación (7) de Bell obtenida para la ciudad de Xalapa con información pluviométrica del periodo 1927-2002.

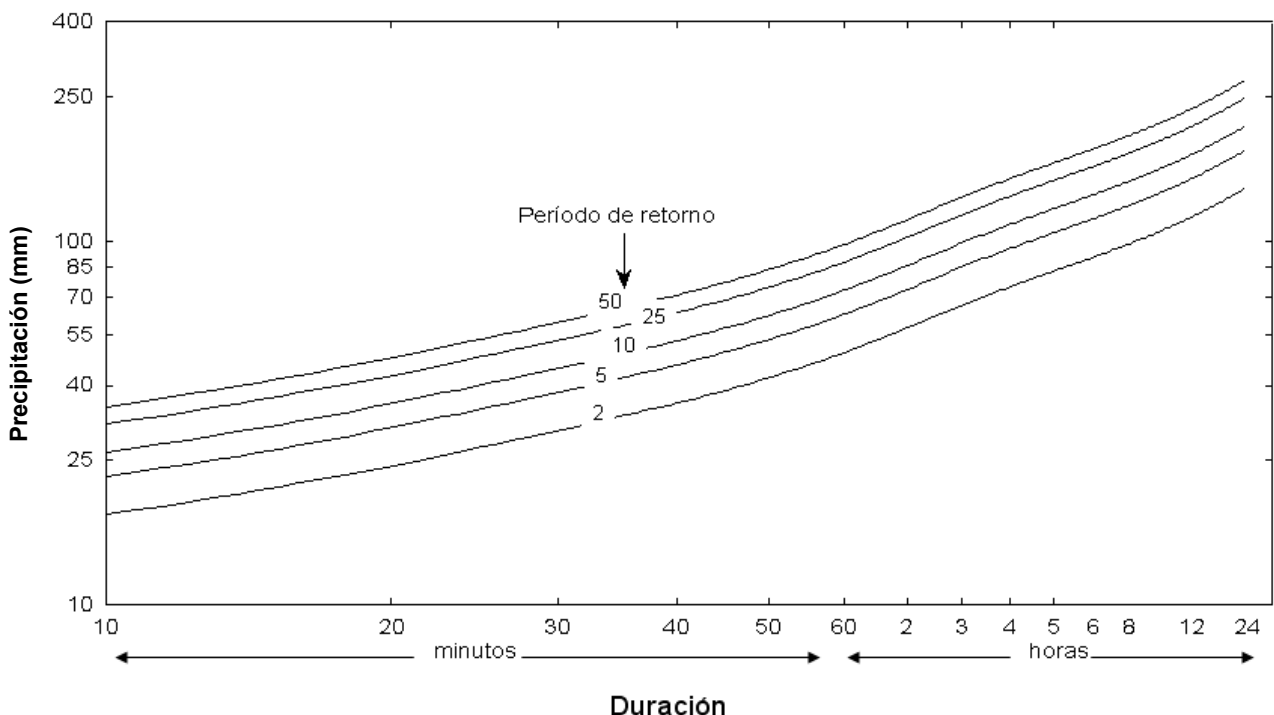


Figura 5. Curvas IDT del modelo de Bell para la ciudad de Xalapa, Veracruz.

**Tabla 4. Razones entre la lluvia de una hora, con periodos de retorno 1, 2, 5, 25 y 50 años, y la lluvia de una hora y período de retorno de 10 años.**

<b>T</b>	<b>Razón</b>
1	0.4267
2	0.6600
5	0.8400
25	1.1333
50	1.1600

**Tabla 5. Razones entre la lluvia con duración de 10 a 120 minutos (renglones), y periodos de retorno de 2, 5, 25 y 50 años (columnas), y la lluvia de 1 hora y período de retorno de 10 años (como denominador) para la ciudad de Xalapa, Veracruz.**

<b>Duración</b>	<b>T=2</b>	<b>T=5</b>	<b>T=10</b>	<b>T=25</b>	<b>T=50</b>
10	0.187	0.2533	0.3200	0.4000	0.4000
20	0.320	0.4467	0.5333	0.5867	0.6000
30	0.440	0.5867	0.6933	0.7667	0.8000
40	0.533	0.6800	0.8467	0.9133	0.9733
50	0.593	0.7600	0.9267	1.0400	1.0800
60	0.660	0.8400	1.0000	1.1333	1.1600
70	0.687	0.9000	1.0733	1.2267	1.2267
80	0.727	0.9400	1.1133	1.2667	1.2933
90	0.740	0.9800	1.1467	1.2933	1.3533
100	0.760	1.0067	1.1733	1.3200	1.4067
110	0.780	1.0200	1.2067	1.3400	1.4333
120	0.793	1.0333	1.2333	1.3533	1.4400

**Tabla 6.- Razones suavizadas entre la lluvia con duración de 10 a 120 minutos (columnas) y periodos de retorno de 2, 5, 25 y 50 años (renglones) con la lluvia de 1 hora y período de retorno de 10 años (como denominador) para la ciudad de Xalapa, Veracruz.**

<b>Duración</b>	<b>T=2</b>	<b>T=5</b>	<b>T=10</b>	<b>T=25</b>	<b>T=50</b>
10	0.187	0.2533	0.3200	0.4000	0.4000
20	0.320	0.4467	0.5333	0.5867	0.6000
30	0.440	0.5867	0.6933	0.7667	0.8000
40	0.533	0.6800	0.8467	0.9133	0.9733
50	0.593	0.7600	0.9267	1.0400	1.0800
60	0.660	0.8400	1.0000	1.1333	1.1600
70	0.687	0.9000	1.0733	1.2267	1.2267
80	0.727	0.9400	1.1133	1.2667	1.2933
90	0.740	0.9800	1.1467	1.2933	1.3533
100	0.760	1.0067	1.1733	1.3200	1.4067
110	0.780	1.0200	1.2067	1.3400	1.4333
120	0.793	1.0333	1.2333	1.3533	1.4400





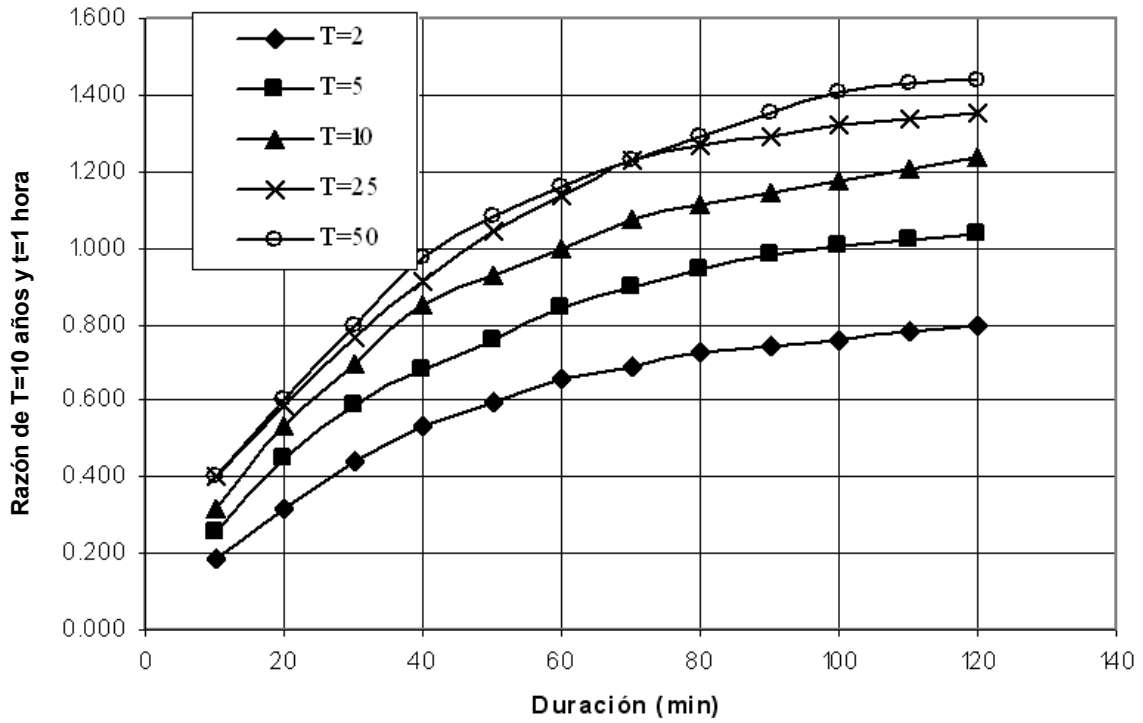


Figura 3. Razones de la lámina de lluvia- duración- período de retorno de la lluvia, para la ciudad de Xalapa, Veracruz.

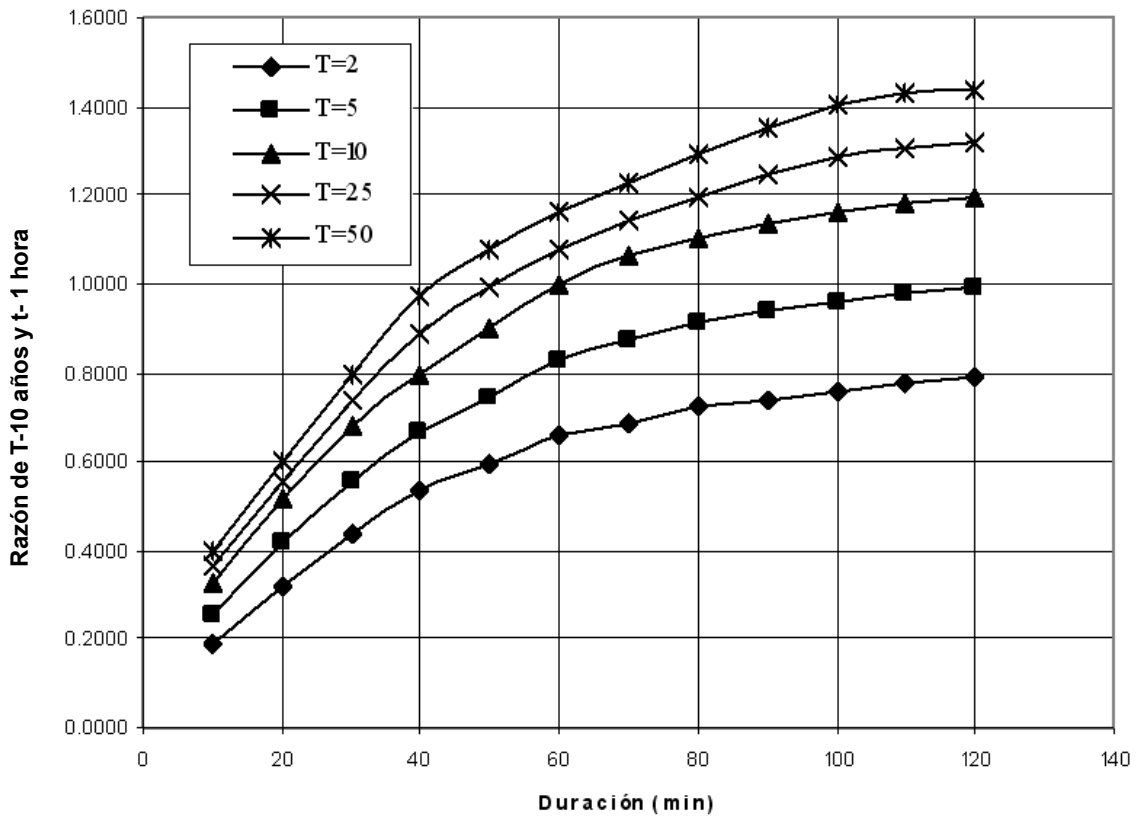


Figura 4. Razones de la lámina de lluvia- duración- período de retorno para la ciudad de Xalapa, Veracruz, con el denominador de T=10 años y t=1 hora.

Para la fórmula general de la intensidad de la lluvia-duración-período de retorno propuesta por Chen (1983) fue necesario conocer los cocientes lámina de lluvia-duración y lámina de lluvia-período de retorno. De los valores de lluvia estimados, correspondientes a las tablas 2 y 3, se tiene que las razones utilizadas en la formulación son:

$$R = \frac{R_1^{10}}{R_{24}^{10}} = \frac{75\text{mm}}{152.7\text{mm}} = 0.491 \quad (\text{Ec. 8})$$

y

$$X = \frac{R_1^{81}}{R_1^{10}} = \frac{96.2\text{mm}}{75\text{mm}} = 1.28 \quad (\text{Ec. 9})$$

Convirtiendo la razón obtenida en porcentaje y utilizando la Figura 2, se obtuvieron los valores  $a=30.1$ ,  $b=9.9$  y  $c=0.82$ ; sustituyendo los valores de  $a$ ,  $r_1^{10}$  y  $X$ , se obtiene

$$R_t^T = \frac{(30.1)(75)\log(10^{(2-1.28)T^{(1.28-1)}})}{(t+9.9)^{0.82}}$$

y simplificando valores, se obtiene

$$R_t^T = \frac{2257.5\log(10^{(0.72)T^{(0.28)}})}{(t+9.9)^{0.82}} \quad (\text{Ec. 10})$$

Por lo que, la intensidad promedio de la lluvia para cualquier duración  $t$  (minutos) y período de retorno  $T$  (años) en la ciudad de Xalapa puede ser calculada por medio de la ecuación (10).

La Figura 6 muestra las curvas intensidad-duración-período de retorno generada por la ecuación (10) de Chen obtenida para la ciudad de Xalapa, con información pluviométrica del período 1927-2002.

Cabe aclarar que el ajuste realizado a la ecuación propuesta por Chen se hizo para 81 años (período 1920-2002; ver tablas 2 y 3), que es número total de años de registro de precipitación en la ciudad.

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Las ecuaciones 7 (tipo Bell) y 10 (tipo Chen), resultado del ajuste hecho a las precipitaciones máximas de la ciudad de Xalapa, Veracruz, muestran un error estándar de estimación de 6.2 mm/h y 5.5 mm/h,

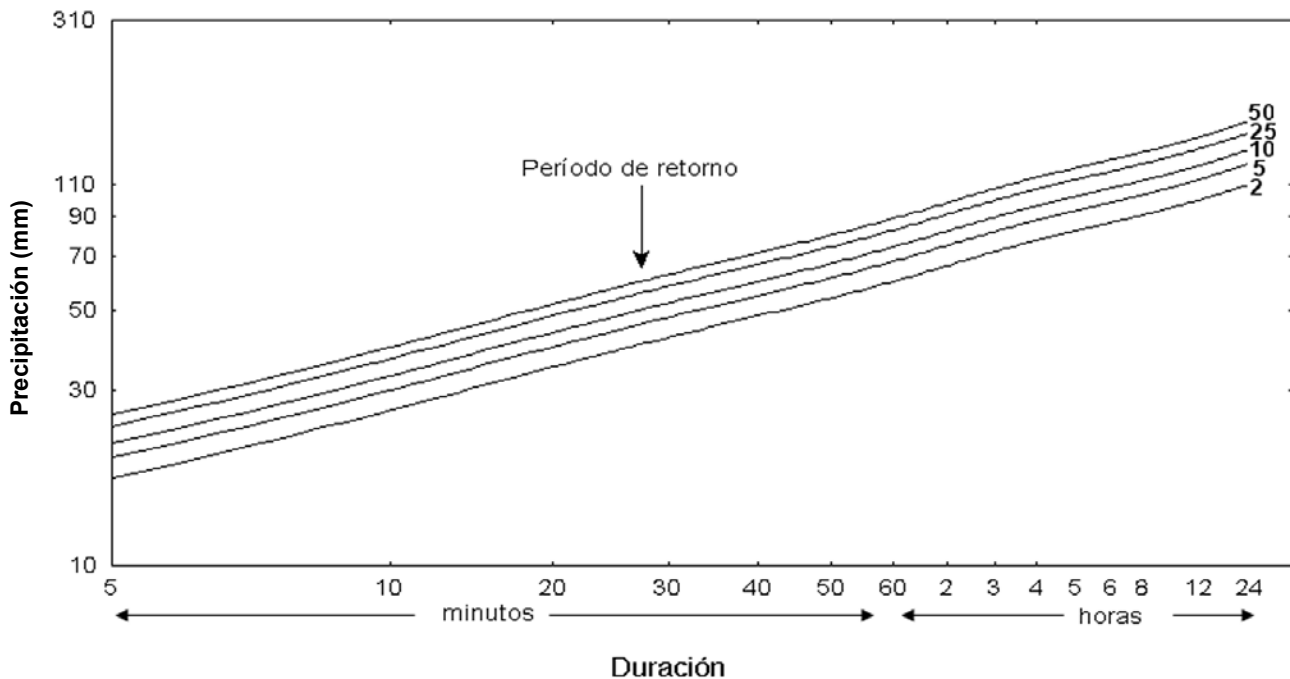


Figura 6. Curvas IDT del modelo de Chen para la ciudad de Xalapa, Veracruz.

respectivamente (Haber y Runyon, 1973). Considerando el error estándar de estimación de los modelos aplicados en este estudio, se puede decir que ambos son bastante aceptables al compararlos con los modelos de Koutsoyianis *et al.* (1998), Chow *et al.* (1994), Sherman (1931) y el de Bernard (1932) (en Raudkivi, 1979; Pereyra *et al.*, 2004) donde el error varió entre 2.7 mm/hr y 7.8 mm/hr.

**Tabla 7. Intensidades (mm/hr) calculadas por las ecuaciones de Bell y Chen ajustadas para la ciudad de Xalapa, para una duración de 60 minutos.**

T (años)	Valores observados (mm/hr)	Ec. Bell (mm/hr)	Bell-Valores Obsv. (mm/hr)	Ec.Chen (mm/hr)	Chen-Valores Obsv. (mm/hr)
2	49.5	44.3	-5.2	55.7	6.2
5	63.0	56.6	-6.4	63.5	0.5
10	75.0	66.0	-9.0	69.3	-5.7
25	85.0	78.3	-6.7	77.0	-8.0
50	87.0	87.6	+0.6	82.9	-4.1

La Tabla 7 muestra las intensidades de precipitación calculadas por las ecuaciones (7) y (10), para períodos de retorno de 2, 5, 10, 25 y 50 años y una duración de 60 minutos, para la ciudad de Xalapa.

Al analizar la Tabla 7 se encontró que, para la duración de una hora, la ecuación de Bell subestima la precipitación para períodos de retorno de 2 a 25 años, mientras que la de Chen sobrestima para períodos de retorno de 2 a 5 años y subestima para períodos de 10 a 50 años. En el caso de diseño hidráulico, se debe utilizar la ecuación que sobrestima la precipitación para hacer obras que desalojen una mayor cantidad de escurrimiento para prevenir las inundaciones.

Los resultados obtenidos para una duración de una hora difieren de los obtenidos por Campos (1990) para la República Mexicana, quien afirma que la ecuación de Bell es más útil para duraciones pequeñas (del orden de minutos) y períodos de retorno de 2 a 10 años, y la de Chen es más funcional para períodos de retorno mayores o iguales a 10 años. Esta diferencia se puede deber a que en este estudio se consideró como duración una hora y no minutos.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen, al Servicio Meteorológico Nacional por haber proporcionado los pluviogramas de las tormentas más intensas, registradas en el Observatorio Climatológico de la ciudad de Xalapa, Veracruz; a la DEPFI-UNAM por haber permitido el acceso a su biblioteca para realizar la investigación bibliográfica. También, agradecen a los árbitros que contribuyeron con sus comentarios para mejorar el artículo.

## REFERENCIAS

- Bando, U., Pereyra, D. y Natividad, M. A., 2002, Curvas intensidad de la lluvia-duración-período de retorno para tres localidades del estado de Quintana Roo, En *Mem. XII Congreso Nacional de Meteorología*, Cancún Quintana Roo, Octubre 23-26.
- Bell, F. C., 1969, Generalized rainfall duration-frequency relationships, *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, vol. 95, p. 311-327.
- Campos, A. D., 1987, Procesos del ciclo hidrológico. *Editorial Universitaria Potosina*, San Luis Potosí, 1ª reimpresión, 600 pp.
- Campos, A. D., 1990, Procedimiento para obtener curvas I-D-T a partir de registros pluviométricos, *Ingeniería Hidráulica en México*, vol. 5, núm. 2, p.39-52.
- Campos, A. D., 1998, Procesos del Ciclo Hidrológico, *Editorial Universitaria Potosina*, San Luis Potosí, México, 3ª impresión, 600 pp.
- Chen, C., 1983, Rainfall intensity-duration-frequency formulas, *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, vol. 109, núm. 12, p.1603-1621.
- Chow, V.T., Maidment, D.R. y Mays, L.W.,1994, Hidrología Aplicada, *McGraw Hill, Interamericana S.A.*, Colombia, 584 pp.
- CNA, 2004. Base de datos de precipitación de Xalapa, *Unidad de Hidrometeorología*. Comisión Nacional del Agua.
- Domínguez, M. R. y Franco, D. C., 2002, Análisis regional para la obtención de precipitaciones de diseño asociadas a duraciones menores que 2h, *Mem. del XX Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, La Habana, Cuba. 2002.
- Froehlich, D.C., 1993, Shout-duration-rainfall intensity equations for drainage design, *Journal Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 119, núm. 5, p. 814-828.
- Froehlich, D.C., 1995, Intermediate-duration-rainfall intensity equations, *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 121, núm. 10, p.751-756.
- Genovez A. M. y Pegogaro, R de C. F., 2001, Análisis y Evaluación de Ecuaciones de Lluvia Intensa Generalizada, *Ingeniería Hidráulica en México*, vol. XVI, núm. 3, pp.15-25.
- Haber, A. y Runyon, R. P., 1973, Estadística General, *Fondo Educativo Interamericano*, S.A., USA, 371 pp.

- Koutsoyannis, D., Kozonis, D. y Manetas, A., 1998, A mathematical framework for studying Rainfall Intensity-Duration-Frequency relationships, *Journal of Hydrology*, vol. 206, p.118-135.
- Maidment D.R., 1993, *Handbook of hydrology*, capítulo 3; Precipitation, McGraw-Hill, Inc. Primera edición, USA, p.3.1-3.47.
- Pereyra, D., Pérez, J.A., Natividad, M.A., Gómez, L., 2000, Influencia de la Niña y el Niño sobre la canícula de la región Xalapa, Veracruz, México, *Universidad y Ciencia*, vol. 16, núm. 32, p. 71-79.
- Pereyra, D., Bando, U. y Gómez, L., 2002, Aplicación de tres ecuaciones para estimar las curvas intensidad de la lluvia-duración-período de retorno de la ciudad de Xalapa, Veracruz, En *Mem. XII Congreso Nacional de Meteorología*, Cancún Quintana Roo, Octubre 23-26.
- Pereyra-Díaz, D., Pères-Sesma, J.A.A. y Gómez-Romero, L., 2004, Ecuaciones que estiman las curvas intensidad-duración-período de retorno de la lluvia, *GEOS*, vol. 24, núm.1, p. 46-56.
- Sherman, C.W., 1931, Frequency and intensity of excessive rainfall at Boston, Mass. *Trans. ASCE*, vol. 95, p. 951-960.
- Stedinger, J. R., Vogel, R. M. and Foufoula-Georgiou, E., 1993, *Handbook of hydrology*, cap. 18, Frequency analysis of extreme events, McGraw-Hill, Inc. Primera edición, USA, p.18.1-18.66.
- Raudkivi, A.J., 1979, *Hydrology. An Advanced Introduction to Hydrological Processes and Modelling*, Pergamon Press Ltd., England, 479 pp.
- Statsoft, Inc., 2003, *Statistica for windows*, computer program manual, 03 edition, Tulsa Ok., USA.
- Zapata, A. J., 1998, Análisis de métodos alternativos para la obtención de las relaciones intensidad-duración-frecuencia en el sur de España. *Departamento de Ingeniería Rural*. Universidad de Almería, España, p.1-10.

Manuscrito recibido: 16 de marzo de 2005.

Manuscrito corregido recibido: 2 de junio de 2005.

Manuscrito aceptado: 24 de noviembre de 2005.