

Análisis y evaluación de las ecuaciones de lluvias intensas generalizadas

Abel Maia Genovez

Universidad Estatal de Campinas (Unicamp), Brasil

Rita de Cássia Fugagnolli Pegoraro

CAPES-Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, Brasil

En muchas partes del mundo, los datos de precipitaciones disponibles no son suficientes para permitir una estimación razonable de las lluvias de alta intensidad en los proyectos de ingeniería. Este trabajo presenta una validación y adecuación de las ecuaciones de lluvias intensas generalizadas propuestas por Bell y Chen, y también de las adaptaciones de Uehara y Hernández. Los parámetros de la ecuación usados en el método de Chen fueron recalculados y usados en el propio método y en su adaptación de acuerdo con la sugerencia de Hernández. Los seis métodos se aplicaron tomando en cuenta los datos de 23 estaciones pluviométricas localizadas en ciudades diferentes del estado de São Paulo, Brasil. Las estaciones se eligieron considerando las que tenían la mayor cantidad de datos pluviométricos registrados (la mayoría de las estaciones tienen de 17 a 19 años de datos observados, una 31 y otra cuarenta años de datos observados). Las alturas pluviométricas calculadas se compararon con los valores observados. La ecuación de lluvia intensa generalizada de Chen, con los nuevos coeficientes calculados, presentó buenos resultados para las alturas de lluvia y superó los otros métodos que se analizaron.

Palabras clave: Lluvias intensas, ecuaciones de lluvias intensas generalizadas.

Introducción

En países en desarrollo, muchos proyectos de ingeniería usan datos de lluvias intensas para estimar caudales máximos y otros parámetros. En diversos casos, los únicos datos disponibles de lluvia son los totales diarios precipitados, medidos a través de los pluviómetros. De esta manera se hace necesaria la validación y adecuación de metodologías para obtener, a partir de los totales de lluvia disponibles, una estimación de las alturas de lluvias intensas de corta duración asociadas con los periodos de retorno.

En este trabajo se analizan y evalúan ecuaciones de lluvias intensas generalizadas, también conocidas como ecuaciones de intensidad-duración-frecuencia generalizadas (IDF). Específicamente, se consideraron las siguientes ecuaciones: Bell, Bell adaptada por Uehara, Chen y Chen adaptada por Hernández. Para las ecuaciones de Chen y Chen adaptada por Hernández se usaron nuevos coeficientes logrados a través de optimización. Para este estudio se disponía de los da-

tos de 23 pluviómetros del estado de São Paulo, Brasil, que está localizado entre los 20 y 25° de latitud sur. De esta forma se realizó un estudio comparando las seis ecuaciones y calculando las alturas de lluvias, posteriormente los resultados obtenidos se confrontaron con los valores observados.

Ecuaciones de lluvias intensas generalizadas

Bell (1969) propuso la ecuación altura de precipitación-duración-frecuencia general dada por:

$$P_t^{Tp} = (0.21 \cdot \ln Tp + 0.52)(0.54 \cdot t^{0.25} - 0.50) P_1^{10} \quad (1)$$

para: $2 \leq Tp \leq 100$ (años) y $5 \leq t \leq 120$ (minutos)

donde: P_t^{Tp} es la altura de lluvia para la duración t en horas y el periodo de retorno de la serie parcial Tp ; t es la duración de la lluvia en minutos.

Según Reich, mencionado por Bell (1969), las relaciones IDF generalizadas, con parámetros estimados

para los Estados Unidos pueden ser válidas para el mundo entero. Bell observa que existen algunas variaciones de estas relaciones según la ubicación, pero llegó a la conclusión de que estas variaciones son pequeñas, comparadas con los errores de muestreo y otras fuentes de incertidumbre. Una explicación física posible para este fenómeno podrían ser probablemente las dimensiones y propiedades comunes a los mecanismos de lluvias convectivas, que son responsables por las lluvias de alta intensidad y corta duración en muchas partes del mundo. De esta manera, la ecuación 1 puede ser útil a todos los países en desarrollo donde los datos de los pluviógrafos no están apropiadamente disponibles. Conviene destacar que Bell usó en su estudio series parciales, o sea, series compuestas de valores superiores a un límite inferior.

Uehara *et al.* (1980) estudiaron las lluvias intensas y empleando una metodología idéntica a la usada por Bell (1969) obtuvieron para Brasil la siguiente ecuación:

$$P_i^{Tp} = (0.5800 + 0.1824 \cdot \ln Tp) \cdot (0.4966 \cdot t^{0.27} - 0.5000) P_1^{10} \quad (2)$$

para: $2 \leq Tp \leq 100$ (años) y $5 \leq t \leq 120$ (minutos)

En el estudio usaron datos de 26 estaciones obtenidas de Pfafstetter (1957).

Uehara *et al.* también propusieron una ecuación de lluvias intensas generalizadas para el estado de São Paulo, Brasil, a partir de los datos de lluvias de estaciones localizadas en Agua Funda, Avaré, Bauru, Bom Fim, Lins, São Simão, Santos y Ubatuba. Los autores usaron series anuales y obtuvieron la siguiente expresión:

$$P_i^T = (0.22 \cdot \ln T + 0.50) \cdot (0.38 \cdot t^{0.31} - 0.39) P_1^{10} \quad (3)$$

Como también en este caso se empleó una metodología idéntica a la de Bell (1969), se consideraron los mismos intervalos de aplicación de la ecuación 2 para la ecuación 3.

Chen (1983) presentó una nueva ecuación IDF general. La ecuación propuesta por Bell (1969) necesita solamente el conocimiento de la altura de lluvia P_1^{10} , mientras que la ecuación de Chen usa P_1^{10} , P_{24}^{10} , y P_1^{100} . La ecuación es dada por:

$$i_t^T = \frac{a_1 \cdot i_1^{10} \cdot \log(10^{(2-x)} \cdot Tp^{(x-1)})}{(t+b)^c} \quad (4)$$

para: $Tp \geq 1$ año y $5 \text{ min} \leq t \leq 24$ horas

donde: a_1 , b y c son parámetros logrados de un gráfico presentado en Chen, en función de la relación, P_1^T / P_{24}^T ; i_t^T es la intensidad de una lluvia de duración t en horas y periodo de retorno T ; y

$$X = P_1^{100} / P_1^{10} \quad (5)$$

Como en la ecuación 1, la ecuación 4 también se dedujo para el intervalo de recurrencia de la serie parcial Tp . Para obtener la ecuación 4 con el periodo de retorno de la serie anual T (es decir, para la serie compuesta solamente con el valor anual máximo), Chen propuso la siguiente ecuación:

$$i_t^T = \frac{a_1 \cdot i_1^{10} \cdot \log \left\{ 10^{(2-x)} \cdot \left[\ln \left(\frac{Tp}{Tp-1} \right) \right]^{-(x-1)} \right\}}{(t+b)^c} \quad (6)$$

para: $T \geq 1$ año y $5 \text{ min} \leq t \leq 24$ horas

Las ecuaciones 4 y 6 pueden ser aplicadas para valores mayores de duración de la lluvia (hasta 24 horas), mientras la ecuación 1 sólo puede aplicarse para duraciones de hasta dos horas, pero esas ecuaciones exigen para su empleo del conocimiento de tres valores de alturas de lluvia, que son P_1^{10} , P_{24}^{10} , y P_1^{100} , mientras la ecuación 1 sólo necesita del valor P_1^{10} . La mayor dificultad es tener que conocer la altura de lluvia con duración de una hora y periodo de retorno de cien años, cuando se tiene una serie pequeña de datos observados.

En países en desarrollo como Brasil, en general hay una gran limitación de datos pluviográficos, particularmente en relación con el periodo de observación, lo que torna más difícil la estimación de lluvias de corta duración para grandes periodos de retorno. De esta forma, Hernández (1991) propone sustituir X por W , en las ecuaciones 4 y 6, y que es dado por:

$$W = \frac{P_{24}^{100}}{P_{24}^{10}} \quad (7)$$

De esta manera, para las lluvias de 24 horas se pueden obtener mejores estimaciones, frente a la red más densa y con mayores periodos de registro de las estaciones pluviométricas disponibles. Como muchos autores están de acuerdo en que se puede admitir una relación constante entre las alturas de lluvias de 24 horas y las de un día de duración, la ecuación 7 puede ser sustituida por la relación $P_{1\text{día}}^{100} / P_{1\text{día}}^{10}$. De esta mane-

ra, el único dato de pluviógrafo necesario para la aplicación de la fórmula es la altura de lluvia con periodo de retorno de diez años y duración de una hora, es decir P_1^{10} . Hernández (1991) usó los mismos parámetros a_1 , b y c conseguidos por Chen (1983).

Para 98 estaciones pluviográficas del Brasil, obtenidas de la publicación de Pfafstetter (1957), se calcularon las desviaciones (D) entre el valor calculado y el valor observado en la estación. El promedio de las desviaciones D para las duraciones pequeñas, cinco y quince minutos, con los métodos de Bell (B), Chen (C) y Hernández (H) resultaron altos, positivos en general, y tienden a crecer con el periodo de retorno (T). De esta forma, para $T = 10$ años y $t = 5$ minutos, las desviaciones para cada método son: $B = 25\%$, $C = H = 18\%$. Para $T = 100$ años y $t = 5$ minutos se tiene: $B = 45\%$, $C = 35\%$ y $H = 39\%$. Para estas diferencias, Hernández (1991) elaboró la hipótesis de imprecisión en los datos básicos, porque para estas duraciones es más difícil la lectura en los registros de los pluviógrafos. Para las duraciones de una hora o más, y para todos los T , las desviaciones son pequeñas, menores de 5%. Para el grupo de las 98 estaciones, los promedios globales (sin considerar t y T) de las desviaciones son: $B = 11\%$, $C = 5\%$ y $H = 6\%$. Los valores máximos de la serie son: $B = 34\%$, $C = 19\%$ y $H = 20\%$. En cuanto a la desviación estándar, los promedios de la serie son: $B = 15\%$, $C = 12\%$ y $H = 12\%$, y los máximos son $B = 39\%$, $C = 32\%$ y $H = 32\%$.

Genovez *et al.* (1994) hacen una evaluación de cinco ecuaciones IDF generalizadas: a) la propuesta por Bell (1969), ecuación 1; b) la ecuación de Bell adaptada por Uehara *et al.* (1980) para Brasil, ecuación 2; c) la ecuación de Bell adaptada por Uehara *et al.* (1980) para el estado de São Paulo, ecuación 3; d) la ecuación propuesta por Chen (1983), ecuación 6; e) la ecuación de Chen con la modificación de Hernández (1991), ecuación 6, sustituyendo X de la ecuación 5 por W de la ecuación 7. Para esa evaluación usaron los datos de nueve estaciones pluviográficas del estado de São Paulo, con periodo de observación de 15 a veinte años. Se calcularon las desviaciones absolutas adimensionales entre las alturas de lluvia calculadas con las ecuaciones generalizadas y las observadas, medidas en relación con los valores observados. Los autores concluyeron que las ecuaciones IDF generalizadas analizadas presentaron resultados similares. También percibieron que, de una manera general, las desviaciones absolutas fueron inferiores a 15%, aunque para algunas estaciones y determinados valores de duración y periodo de retorno, la desviación absoluta llegó a 45%. De acuerdo con esto y por la manera en que se usaron las ecuaciones IDF generalizadas,

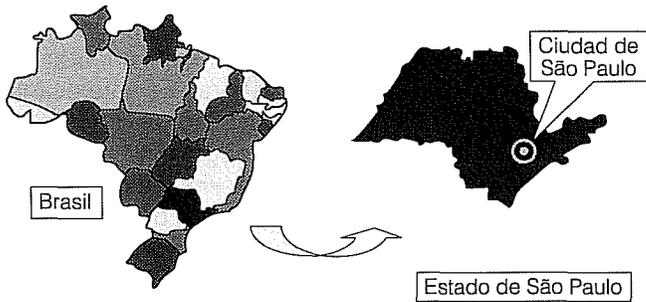
concluyeron que estas ecuaciones sólo deben usarse cuando faltan datos observados o para estimaciones preliminares. Las desviaciones de los valores calculados, usando las ecuaciones IDF, crecen cuando las duraciones se desvían de una hora. Es interesante destacar que cuando se hizo el cambio de X por W se usaron los mismos coeficientes logrados por Chen (1983), esto es, no se estimaron nuevos valores de a_1 , b y c . Los autores también recomiendan que el estudio se realice de nuevo, con un número mayor de estaciones pluviográficas y si fuera posible, con más series observadas.

La ecuación de Bell (1969) ya había sido probada en otros lugares (África del Sur y Australia), y también, al conocer las dimensiones y propiedades comunes a los mecanismos de lluvias convectivas, Bell propone el uso de su ecuación en otras partes del mundo que no dispongan de datos adecuados de estaciones pluviográficas. El empleo de las ecuaciones propuestas por los diversos autores, con parámetros estimados para otras partes del mundo, así como las ecuaciones con parámetros locales, según los estudios de Genovez *et al.* (1994) presentaron desviaciones menores de 15%. En el promedio, esta desviación puede considerarse satisfactoria, principalmente si se tiene en cuenta que se está tratando de obtener una intensidad de lluvia en un lugar sin una serie adecuada de datos pluviográficos. Lo que preocupa es que para ciertos locales, duraciones y periodo de retorno, la desviación ha llegado a 45%. Por otro lado, no se pueden desmerecer estas ecuaciones IDF generalizadas debido a que: a) se usaron las ecuaciones de Bell y Chen con los coeficientes estimados para otras partes del mundo; b) las ecuaciones de Bell con coeficientes estimados para Brasil y para São Paulo se basaron en los datos disponibles en la época en que fueron obtenidas, esto significa pocos datos locales (se emplearon ocho estaciones para obtener la ecuación para el estado de São Paulo y 26 estaciones en el caso del Brasil, de las cuales 11 se localizan en el estado de Río de Janeiro); c) la ecuación de Chen con el uso del factor W en el lugar de X no tuvo parámetros estimados para esta nueva situación, se mantuvieron los mismos parámetros anteriores a la modificación. La utilización de un mayor número de estaciones pluviográficas, con series observadas extensas, y la estimación de los parámetros de la ecuación utilizando datos locales debe mejorar los resultados.

Metodología

Para desarrollar el trabajo propuesto se seleccionaron estaciones pluviográficas pertenecientes al Departamento

Ilustración 1. Localización de la zona en estudio.



mento de Água e Energia Elétrica do Estado de São Paulo (DAEE-SP) y al Instituto Agronômico de Campinas (IAC), localizadas en el estado de São Paulo (ilustración 1). Las estaciones se eligieron tomando en cuenta las que tienen el mayor número de datos disponibles, pluviométricos o pluviográficos.

De esta manera, del DAEE-SP se usaron las estaciones C5-017, C5-043, C5-055, C5-106, C6-003, E3-085, E3-032, E3-034, F4-025, E3-068, D5-062, D4-036, F5-031, D3-063, E2-112, D9-005, F4-040, F5-022, F5-007, F4-045, F4-026, que tienen de 17 a 19 años de datos observados. Del IAC se usaron los datos de las estaciones Mococa y Pindorama, con series de cuarenta y 31 años, respectivamente.

La distribución de extremos tipo I (Gumbel) se ajustó a las series pluviográficas anuales con duraciones de 10, 20, 30 y 60 minutos, 2, 3, 6, 12, 18 y 24 horas. De esta forma se determinaron los valores de las alturas de lluvia para los periodos de retorno $T = 5, 10, 15, 20, 25, 50$ y 100 años.

Después, se aplicaron las ecuaciones de BELL; Bell adaptado por Uehara *et al.* (1980) para el estado de São Paulo (UEHARA-SP); CHEN, y Chen adaptada por Hernández (1991) (CHEN-A). De ahora en adelante, los métodos se identificarán por los nombres en letras mayúsculas.

Para averiguar la validez de los parámetros a , b y c calculados por Chen, se estimaron nuevamente, usando los datos de las estaciones seleccionadas y sustituyendo el parámetro X de la ecuación 5 por W de la ecuación 7. La metodología usada para obtener los nuevos parámetros es igual a la que utilizó Chen, empleando el método de optimización llamado Quasi-Newton. De esta manera se obtuvieron los nuevos valores a , b y c para utilizar en la ecuación de Chen (CHEN-N) y también en la ecuación de Chen con la adaptación propuesta por Hernández (CHEN NUEVO). En la ilustración 2 se presenta la gráfica de los nuevos valores a , b y c contra el valor de la relación P_1^T/P_{24}^T . Esta gráfica se comparó con la que obtuvo Chen.

Las alturas de lluvia obtenidas con las ecuaciones generalizadas han sido comparadas con los valores observados. También han sido estimadas las desviaciones absolutas adimensionales, es decir, el módulo de la diferencia entre los valores calculados y los observados, dividido por los valores observados.

Resultados y discusión

A partir de los datos observados se determinaron las relaciones entre los promedios de las alturas precipitadas con 24 horas de duración, obtenidos del pluviógrafo, y los promedios de las alturas precipitadas en un día, dados por el pluviómetro, o sea $\bar{P}_{24}^T/\bar{P}_{1\text{día}}^T$. El resultado que se logró fue, en promedio, de 1.110; los valores máximos y mínimos alcanzados fueron 1.170 y 1.031, respectivamente. Lobo y Magni (1987) afirmaron que $\bar{P}_{24}^T/\bar{P}_{1\text{día}}^T$, o sea, que el promedio de las alturas de lluvias de un día de duración máximas anuales son una buena estimación del promedio de las alturas de lluvia de 24 horas máximas anuales. Occhipinti y Santos (1965) obtuvieron 1.22 para la ciudad de São Paulo. Ya Torrico (1974) llegó al valor 1.095 para el Brasil y Weiss (1964) obtuvo 1.14.

Las alturas pluviométricas máximas anuales para las duraciones de 10, 20, 30 y 60 minutos y 2, 3, 6, 12, 18 y 24 horas de cada estación se ajustaron a la ley de Gumbel y se determinaron las alturas pluviométricas máximas para los periodos de retorno T de 5, 10, 15, 20, 25, 50 y 100 años. Con esos valores de las alturas pluviométricas se obtuvieron las relaciones entre las intensidades de lluvia de una hora y las de 24 horas de duración para el mismo periodo de retorno, es decir, P_1^T/P_{24}^T , en porcentaje, para cada estación. Puede decirse que se encontraron coincidencias con relación a los valores de los porcentajes promedios de P_1^T/P_{24}^T ; para siete estaciones se obtuvo aproximadamente el valor de 46.3%; para seis estaciones, el valor de 59.5%; para cuatro estaciones, el valor de 52.1%, y para tres estaciones, el valor de 69.4%. Los valores de la relación P_1^T/P_{24}^T iguales a 32.1%, 34.7% y 38% sólo se obtuvieron en tres estaciones, teniendo un valor en cada estación.

En un mapa del estado de São Paulo se colocó el valor de la relación P_1^T/P_{24}^T en el lugar de cada estación para estudiar si ocurría algún tipo de tendencia en función de la ubicación de las estaciones, pero hubo un posicionamiento aleatorio. Pudo observarse que las estaciones que presentaron los porcentajes de 32.1%, 34.7% y 38% (que son, respectivamente, F4-026, F4-040 y F4-045) se localizan cerca de la Sierra del Mar y, por consiguiente, bajo la influencia de los efectos orográficos. Comparando los valores del cuadro 1

Cuadro 1. Relación entre las intensidades de lluvia i_t^T/i_1^T en función de la duración t y de la relación P_1^T/P_{24}^T .

Duración (minutos)	P_1^T/P_{24}^T (%)						
	32.1	34.7	38.0	46.3	52.1	59.5	69.4
10	1.89	1.48	1.74	2.37	2.15	2.15	2.21
20	1.48	1.27	1.54	1.86	1.75	1.77	1.76
30	1.25	1.21	1.37	1.56	1.50	1.47	1.54
60	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
120	0.76	0.76	0.67	0.62	0.59	0.60	0.59
180	0.61	0.59	0.48	0.47	0.42	0.45	0.41
360	0.40	0.36	0.29	0.28	0.23	0.23	0.23
720	0.23	0.21	0.18	0.16	0.13	0.13	0.13
1,080	0.16	0.15	0.14	0.11	0.10	0.09	0.09
1,440	0.13	0.12	0.11	0.09	0.08	0.07	0.06

con los obtenidos por Chen, puede observarse que los valores de la relación P_1^T/P_{24}^T para Chen varían de 10 a 60%, mientras que para las estaciones estudiadas en este trabajo, la variación fue de 32.1 a 69.4%. Puede notarse que los valores más grandes logrados aquí superaron el valor del máximo observado por Chen, que era de sesenta por ciento.

Para cada estación se calcularon las relaciones entre las intensidades de lluvia de duración t y periodo de retorno T con la intensidad de lluvia de una hora de duración y el mismo periodo de retorno T , es decir, i_t^T/i_1^T . Los resultados mostraron que estas relaciones son independientes del periodo de retorno T , de acuerdo con lo que ya había sido observado por Chen. Además, para cada estación y para una misma duración t , se hizo el promedio de los valores de la relación i_t^T/i_1^T . Como ya se había comentado anteriormente, para algunas estaciones se había logrado el mismo valor de P_1^T/P_{24}^T . Para las estaciones cuyos valores de P_1^T/P_{24}^T resultaron iguales, los valores de i_t^T/i_1^T para cada duración también resultaron muy próximos. Entonces, para cada grupo de estaciones donde los valores de P_1^T/P_{24}^T fueron iguales, se calculó para cada duración el valor promedio de i_t^T/i_1^T . De esta manera se notó que las 23 estaciones en estudio se redujeron a siete grupos.

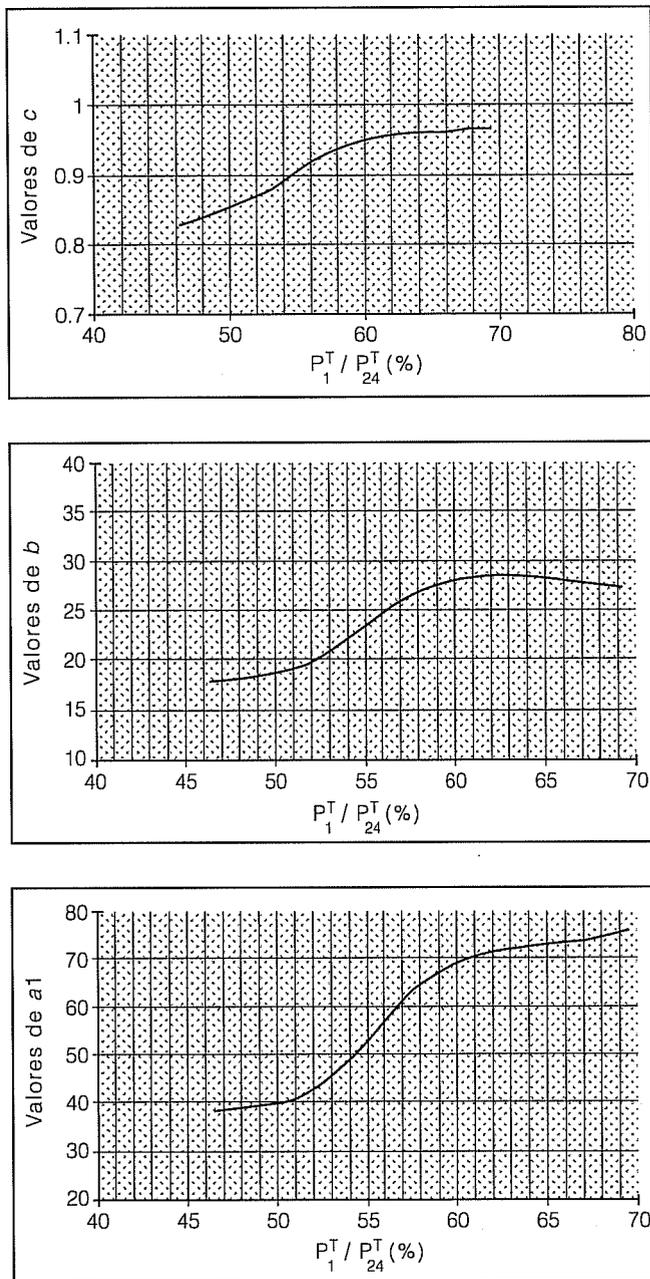
Comparando los resultados presentados en el cuadro 1 con los valores alcanzados por Chen, pueden observarse las siguientes diferencias: a) para las duraciones entre diez y treinta minutos, los valores calculados no pueden ser considerados independientes de la relación P_1^T/P_{24}^T , como lo obtuvo Chen; b) los valores de la relación i_t^T/i_1^T para las duraciones de 120 hasta 1,440 minutos resultaron muy diferentes de los observados por Chen.

En todas las estaciones estudiadas se calcularon las alturas pluviométricas, con las mismas duraciones y periodos de retorno para los cuales se dispone de datos observados, ya mencionadas anteriormente, usando los métodos de BELL, UEHARA-SP, CHEN y CHEN-A. Se calcularon las desviaciones relativas expresadas en valores absolutos, es decir, el módulo de la diferencia entre el valor calculado y el observado, dividido por el valor observado. Como las ecuaciones de BELL y UEHARA se limitan a duraciones inferiores o iguales a 120 minutos, se calcularon las intensidades pluviométricas, usando estas ecuaciones, hasta esa duración solamente.

De una manera similar a Chen, y a partir de los datos del cuadro 1 se obtuvieron los nuevos valores de a_1 , b y c para las estaciones en estudio, cuyos valores se presentan en la ilustración 2, en función de los valores de la relación P_1^T/P_{24}^T . Es importante destacar que el programa de computadora usado se probó antes de obtener los nuevos valores de los parámetros a_1 , b y c , para las estaciones estudiadas. La prueba consistió en usar como datos de entrada del programa los valores de Chen y luego comparar los valores de los parámetros a_1 , b y c para cada valor de la relación P_1^T/P_{24}^T , obteniéndose los mismos valores de los parámetros a_1 , b y c del trabajo de Chen.

De la comparación de la ilustración 2 con la obtenida por Chen, se observó que los resultados alcanzados son muy diferentes. Debe destacarse que los valores de Chen no superan el de 60% para la relación P_1^T/P_{24}^T . También debe observarse que los valores de los parámetros a_1 , b y c para los valores de la relación P_1^T/P_{24}^T de 32.1, 34.7 y 38%, que representan las estaciones de F4-026, F4-040 y F4-045, respectivamente, presentaron resultados muy diferentes de los otros,

Ilustración 2. Gráficos de a_1 , b y c en función de P_1^T/P_{24}^T (%). (Genovez y Pegoraro, 1998).



probablemente debido a efectos orográficos. Según Bell (1969), en cuyo estudio se basó Chen, esta metodología debe usarse para lluvias convectivas. Por esta razón, en la ilustración 2 esos valores no se consideran para el trazado de las curvas. Conviene resaltar que aunque se tenga la impresión de que la ilustración 2 ha sido hecha con los datos de siete estaciones pluviográficas, fue construida con los datos de 23 esta-

ciones. De la comparación de la ilustración 2 y la del estudio de Chen también puede observarse que en los trechos comunes las curvas presentan las mismas tendencias y también que se mantienen las relaciones entre el orden de grandeza de los parámetros.

Con los nuevos valores de a_1 , b y c , y usando los métodos de CHEN-N y CHEN-NUEVO también se calcularon las alturas pluviométricas y las desviaciones absolutas, para las mismas duraciones y periodos de retorno para los que se tenían datos observados.

Tomando en cuenta los valores de las desviaciones absolutas de los diferentes métodos, se hicieron coparaciones entre los métodos que se presentan adelante.

Comparando los resultados obtenidos, empleando los métodos designados como BELL y UEHARA-SP, puede decirse que UEHARA-SP presenta desviaciones D muy pequeñas en la mayoría de los casos analizados. El valor máximo de D para el método de BELL fue de 67% para las lluvias de diez minutos de duración (esto ocurrió una sola vez y para el periodo de retorno $T = 100$ años), cayendo a 40% para las otras duraciones. Con el método de UEHARA-SP, estos valores son de 43 y 28%, respectivamente. Puede observarse que para las duraciones extremas del intervalo analizadas en estos dos casos, 10 y 120 minutos, los valores de D crecen. Si no se consideran estas dos duraciones, puede decirse que el método UEHARA-SP generalmente presenta valores de D , en el promedio, menores de 10%. En este análisis no están incluidas las estaciones F4-026, F4-040 y F4-045, que estarían sujetas a la influencia de lluvias orográficas. Si estas tres estaciones se hubieran incluido, los valores de D serían superiores.

Las alturas pluviométricas calculadas por los métodos de CHEN, CHEN adaptado por Hernández (CHEN-A), CHEN con los nuevos valores de los parámetros a_1 , b y c (CHEN-N) y Chen adaptado por Hernández y con los nuevos valores de los parámetros a_1 , b y c (CHEN NUEVO), se compararon con los datos observados. Para estos cuatro métodos, las duraciones de lluvia calculadas van hasta los 1,440 minutos. De los cuatro métodos, el que presentó las menores desviaciones D , en promedio, fue el de CHEN-N, seguido muy de cerca por el método CHEN NUEVO. Los métodos de CHEN y CHEN-A dan resultados muy próximos, pero peores en relación con el que se obtuvo usando los nuevos valores de los parámetros a_1 , b y c . Las desviaciones D máximas encontradas para cada uno de los métodos, con duración de diez minutos y con las otras duraciones son, respectivamente: CHEN 60 y 37%; CHEN-A 69 y 45%; CHEN-N 27 y 21%, y finalmente, para CHEN NUEVO 34 y 28%. La

mayor ventaja del método de CHEN-N es que redujo los valores de las desviaciones D substancialmente, aunque algunos valores pequeños de D de este método han resultado ligeramente superiores a las desviaciones obtenidas con los otros métodos. La mayor parte de las estaciones analizadas, con excepción de tres, puede considerarse que tienen desviaciones D promedios inferiores. En la evaluación hecha para estos cuatro métodos no se incluyeron las estaciones F4-026 a 10%, F4-040 y F4-045. Considerando solamente estas tres estaciones, las desviaciones D máximas obtenidas para cada uno de los métodos, para la duración de 10 minutos y para las otras duraciones son, respectivamente: CHEN 97 y 62%; CHEN-A 93 y 58%; CHEN-N 10 y 10%, y finalmente para CHEN NUEVO 14 y 20%. Aunque para los métodos de CHEN-N y CHEN NUEVO los resultados para estas tres estaciones han sido muy buenos, porque en general resultaron desviaciones D inferiores de 10%, se sugiere rehacer las gráficas de la ilustración 2, que presentan los valores de los parámetros a_1 , b y c , en función de la relación P_1^T/P_{24}^T , utilizando un mayor número de estaciones para ser más representativas.

Con el propósito de facilitar el uso de las ecuaciones intensidad, duración y frecuencia (IDF), Pegoraro (1996) construyó los mapas de isoyetas de P_{10}^1 , P_{24}^{10} , P_{10}^{100} , P_{24}^{100} para el estado de São Paulo. Estos mapas pueden ayudar en el cálculo de diferentes alturas de lluvia, duraciones y periodos de retorno para lugares sin datos de lluvia.

Los resultados que se lograron con el método CHEN-N pueden compararse con los alcanzados por Setzer (1973) en las ciudades de São Paulo y São Carlos. Como en este estudio no se contemplan esas dos ciudades, se hizo una comparación con las ciudades más próximas, así São Paulo se comparó con Cotia y São Carlos con Itirapina. Además, los resultados de Setzer coinciden con los del presente estudio solamente para las duraciones de treinta, sesenta y 120 minutos. A pesar de esto, los valores del cuadro 2 son semejantes.

La aplicación de la metodología de Bell o de Chen para áreas menores, en lugar de la obtención de los parámetros regionalizados para grandes áreas, debe proporcionar una mejora sensible de los resultados (Genovez *et al.*, 1994). Es importante también destacar que los métodos no deben usarse para regiones con efectos orográficos.

Lafragua y Aparicio (1996) estudiaron la aplicabilidad de las ecuaciones de lluvias intensas generalizadas de Bell y Chen para una área del Golfo de México. Analizaron datos de 32 estaciones pluviográficas, con registros iguales o superiores a 12 años. Observaron que la ecuación de Chen presentó errores menores, en el promedio, que la de Bell, y que el método de Chen presentó un error promedio inferior a 30% para las duraciones menores de treinta minutos e inferior de 10% para las duraciones entre sesenta y 120 minutos, así como para las duraciones de 24 horas cuando aplicaron el método para obtener las ecuaciones IDF locales. La gráfica de los valores de a_1 , b y c , en función de los valores de la relación P_1^{10}/P_{24}^{10} alcanzados para México, también resultaron muy diferentes a los logrados por Chen.

Recomendaciones para el uso de las ecuaciones

De acuerdo con los resultados obtenidos en el cuadro 2, las ecuaciones de lluvias intensas generalizadas pueden ser utilizadas para locales sin datos de pluviógrafos. Para estos locales deben obtenerse los valores de $P_{1día}^{100}$ y $P_{1día}^{10}$ a partir de los datos de pluviógrafos y calcular el valor de W usando la ecuación 7. Con base en los datos de la relación P_1^T/P_{24}^T para el local en estudio, se determinan los valores de a_1 , b y c , usando la gráfica de la ilustración 2. Si se tienen mapas de isoyetas de la región en estudio, la estimación de los valores de P_1^T y P_{24}^T se realiza fácilmente. Utilizando la ecuación 4 o la 6 pueden ser calculados los valores de i_1^T para locales sin datos de pluviógrafos. Los valores de a_1 , b y c de la ilustración 2 se obtuvieron para el estado de São Paulo. Para la aplicación de la metodolo-

Cuadro 2. Comparación de las alturas de lluvias (mm) entre São Paulo y Cotia, y entre São Carlos e Itirapina.

Duración (minutos)	São Paulo (S.P.) y Cotia						São Carlos (S.C.) e Itirapina (I)					
	T = 10 años		T = 25 años		T = 50 años		T = 10 años		T = 25 años		T = 50 años	
	S.P.	Cotia	S.P.	Cotia	S.P.	Cotia	S.C.	I	S.C.	I	S.C.	I
30	50.00	46.83	60.00	56.58	66.00	63.81	53.00	49.85	63.00	58.34	70.00	64.64
60	63.00	62.41	74.00	75.41	84.00	85.05	67.00	67.21	78.00	78.67	91.00	87.17
120	74.00	75.33	87.00	91.02	100.00	102.65	78.00	82.20	93.00	96.21	109.00	106.60
Desv.	3.02 %		4.08 %		3.42 %		3.88 %		3.90 %		4.69 %	

gía en otros locales es necesario contar con gráficos semejantes a los de la ilustración 2. Se recomienda utilizar la ecuación de Chen, substituyendo X de la ecuación 5 por W de la ecuación 7 y con los valores de a_1 , b y c de la ilustración 2 porque este método dio los mejores resultados.

Conclusiones

Para las estaciones estudiadas y para las condiciones de este trabajo puede concluirse que:

a) Algunos valores obtenidos de la relación P_1^T/P_{24}^T superaron el valor máximo de 60% que obtuvo Chen para otras áreas.

b) Para las duraciones de diez a treinta minutos, los valores calculados de la relación i_t^T/i_1^T no pueden ser considerados independientes de la relación P_1^T/P_{24}^T , como lo hizo Chen. Para las duraciones de 120 a 1,440 minutos, los valores de la relación i_t^T/i_1^T resultaron muy diferentes de los observados por ese autor.

c) Los valores de los parámetros a_1 , b y c , a partir de los datos de las estaciones disponibles en este trabajo, son diferentes de los valores observados por Chen y por lo tanto deben ser determinados con datos locales.

d) La ecuación de lluvia intensa generalizada de Chen, con los nuevos coeficientes a_1 , b y c calculados, presentó buenos resultados y supera los otros métodos analizados.

e) La falta de datos para la región noroeste del estado de São Paulo es un factor empobrecedor en la elaboración de los mapas de isoyetas de 24 horas. Serían enriquecedores nuevos datos para esta área, porque se consideraría todo ese territorio.

Se recomienda utilizar la ecuación de Chen usando el parámetro W en la ecuación y con los valores de a_1 , b y c obtenidos para la región de estudio, dado que este método dio los mejores resultados.

De esta manera podrán calcularse las alturas de lluvias intensas para las áreas sin datos, por lo menos en la etapa de anteproyecto, para diferentes duraciones t y periodos de retorno T .

Agradecimiento

Los autores manifiestan su agradecimiento más sincero a la CAPES-Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, por la beca de maestría otorgada a uno de los autores, y también al Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo (DAEE-SP)-Seção de Coleta e Análise de Dados y al Ins-

tituto Agronômico de Campinas (IAC) por la dedicación y esfuerzo en la colecta de los datos hidrológicos.

Recibido: 18/11/1999

Aprobado: 02/05/2000

Referencias

- Bell, F.C., "Generalized Rainfall-Duration-Frequency Relationships", *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, vol. 95, núm. HY1, 1969, pp. 311-27.
- Chen, C., "Rainfall Intensity-Duration-Frequency Formulas", *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, vol. 109, núm. 12, 1983, pp. 1603-21.
- Genovez, A.M. et al., *Relação entre chuvas intensas de diferentes durações e avaliação das equações de chuvas intensas generalizadas*, XVI Congresso Latinoamericano de Hidráulica, Santiago, Chile, 1994, pp. 279-290.
- Hernández, V., *Ainda as equações de chuvas intensas podem-se generalizar*, IX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Rio de Janeiro, Anais 3, 1991, pp. 193-203.
- Lafragua, C.J. y M.F. Aparicio, *Curvas intensidad-duración-periodo de retorno para la vertiente del Golfo de México*, XVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Quito, vol. 2, 1996, pp. 259-270.
- Lobo, G. de A. y N.L.G. Magni, *Estudo sobre as proporções entre as chuvas intensas de diferentes durações*, VII Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos e III Simpósio Luso-Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos, Salvador-Bahia, 1987, pp. 103-113.
- Occhipinti, A.G. y P.M. Santos, *Análise das máximas intensidades de chuva na cidade de São Paulo*, Instituto Agronômico e Geofísico, 1965, 41 pp.
- Pegoraro, R.C.F., *Análise e avaliação de equações de chuvas intensas generalizadas. Dissertação de mestrado*, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, 1996, 99 pp.
- Pfafstetter, O., *Chuvas intensas no Brasil*, Departamento Nacional de Obras e Saneamento (DNOS), Rio de Janeiro, MVOP, 1957.
- Setzer, J., "Chuvas de intensidade máxima do estado de São Paulo", *Revista DAE*, núm. 93, 1973, pp. 52-59.
- Torrice, J.J.T., *Práticas hidrológicas. Rio de Janeiro*, Transcon, Rio de Janeiro, 1974, 120 pp.
- Uehara, K. et al., *Pequenas bacias hidrográficas do Estado de São Paulo - Estudo de vazões médias e máximas*, FDTE/ Escola Politécnica da USP, São Paulo, S.P., vol. 2, 1980, 708pp.
- Weiss, L., *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, vol. 90, núm. HY1, 1964, pp. 77-82.

Abstract

Maia Genovez, A. & R. de C. Fugagnolli Pegoraro, "Analysis and Assessment of Generalized Equations of Intense Rainfalls", *Hydraulic Engineering in Mexico (in Spanish)*, vol. XVI, num. 3, pages 15-23, July-September, 2001.

In many parts of the world, the available data are not enough to provide reasonable estimations of high-intensity rainfalls for engineering design purpose. Generalized equations for intense precipitation are analyzed and adjusted, as proposed by Bell and Chen, considering, too, Uehara and Hernandez modifications. Six methods were applied using data from twenty three rain gauge stations, located in different cities of Sao Paulo State. The criterion to select the stations was the data volume: most of the stations host data from 17 to 19 years back, one station holds data 31 years old, and another station, from 40 years back. Estimated rainfall depths were compared to the registered values. Chen equation, with the new estimated coefficients, showed better results than other methods used to estimate rainfall intensity.

Key words: rainfall intensity, generalized equations for intense rainfalls.

Dirección institucional de los autores:

Abel Maia Genovez

Facultad de Ingeniería Civil
Universidad Estatal de Campinas - UNICAMP
C. Postal 6021, 13083-970-Campinas-SP
Facsímil (55 19) 788 2411, Brasil,
Correo electrónico: genovez@fec.unicamp.br

Rita de Cássia Fugagnolli Pegoraro

Becaria de Maestría de la CAPES-Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, Brasil