

VALIDEZ DE LA TÉCNICA DE INTENSIDAD INSTANTÁNEA PARA LA EXTRACCIÓN DE HIETOGRAMAS DE DISEÑO TÍPICOS

Gabriel Caamaño Nelli ^{1,2}, Clarita M. Dasso ^{1,2,3}, Carlos M. García ^{1,3} y Ezequiel Mascuka ⁴

¹ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas

² Instituto Nacional del Agua-Centro de la Región Semiárida

³ Universidad Nacional de Córdoba

⁴ Universidad Católica de Córdoba

Ambrosio Olmos 1142-1er Piso - (X 5016 GCA) Córdoba, Argentina. Tel.:+54 (0) 351-4682781.
e_mail: claridasso@yahoo.com.ar

RESUMEN

La ausencia de registros históricos de caudales aptos hace necesario evaluar indirectamente las crecidas de proyecto, mediante transformación de lluvias de diseño, precipitaciones críticas que hipotéticamente ocurrirían en el futuro con determinada frecuencia. La predicción de tales lluvias incluye su distribución temporal característica o hietograma tipo. Una técnica para estimarla es extraer datos de la relación intensidad-duración-recurrencia (i-d-T) de las lluvias máximas, alternando con aumentos de duración, como el método de Intensidad Instantánea. Esta técnica produce un hietograma continuo, automáticamente compatible con la relación i-d-T pues de ella se extrae y es factible explicitarlo analíticamente, como es el caso del Modelo DIT (Caamaño Nelli y García, 1999). Los objetivos del presente trabajo son: verificar la ecuación del hietograma tipo de intensidad instantánea que produce el modelo DIT con tres parámetros (Caamaño Nelli et al., 2012), aplicarla con datos de Ceres (Santa Fe) para duraciones breves y comparar los resultados con los de métodos de síntesis (Huff, 1967; Pilgrim y Cordery, 1975). Como resultados, la ecuación del hietograma no varía con la recurrencia, la pérdida de volumen se corrige y la altura del pico se muestra mucho más verosímil. Esto respalda el procedimiento ensayado y lo hace recomendable en ausencia de hietogramas históricos.

Palabras clave: lluvias de diseño, hietogramas tipo, método de intensidad instantánea, modelo DIT.

ABSTRACT

The absence of suitable historical flow discharge records makes it necessary to evaluate design floods indirectly, by transforming design storm which are critical rainfall event that are likely to occur with a certain probability. The prediction of such rainfall events includes the definition of its typical temporal distribution or typical hyetograph. A technique to estimate that temporal distribution is extracting data from the rainfall intensity–duration–recurrence (i-d-T) curves through the instantaneous intensity method. This technique produces a continuous hyetograph that is automatically compatible with the use of i-d-T models from where the data is extracted such as the DIT Model (Caamaño Nelli and García, 1999). The objectives of this work are: a) to evaluate typical hyetograph distribution generated using the instantaneous intensity method implemented with the DIT model with three parameters (Caamaño Nelli et al, 2012); and b) to apply this distribution using data from Ceres (Santa Fe) for short durations and to compare the results with the typical hyetograph distribution estimated using methods proposed by Huff (1967) and Pilgrim and Cordery (1975). As a result, the hyetograph equation does not change with the recurrence, the loss of volume is corrected and the peak height is much more plausible. This supports the procedure tested and does it recommendable in the absence of historical hyetographs.

Keywords: design storm, typical hyetograph, instantaneous intensity method, DIT model.

INTRODUCCIÓN

Las obras hidráulicas o emplazadas en zonas ribereñas, así como los planes de uso de estas áreas, deben dimensionarse de modo que soporten, sin fallar, el mayor caudal previsible para cierto período de años venideros. Tal caudal de proyecto, por su hipotética ocurrencia futura, sólo se puede valorar estadísticamente, lo cual supone disponer de una serie extensa de registros históricos.

Esta presunción, no es real en la mayor parte del mundo, obligando a recorrer un camino indirecto: evaluar la mayor lluvia en dicho período y derivar de ella el correspondiente caudal mediante un modelo de transformación. La predicción de esa lluvia de diseño es estadística también y, por igual razón, requiere datos del pasado, felizmente más comunes para precipitación.

El cálculo de lluvia de diseño es mucho más arduo que el de caudal de proyecto, pues debe reflejar la estructura temporal y geográfica del fenómeno, no un valor puntual en espacio y tiempo.

La estimación comienza por modelar la relación *i-d-T*, entre la intensidad *i*, la duración *d* y la recurrencia *T*, de las máximas lluvias anuales históricas. De ella se desprende la cantidad de lluvia precipitada. Las siguientes etapas son ajustar un algoritmo para convertir la lluvia local en media areal y deducir el hietograma tipo (HT) para repartirla en el tiempo. El orden en que éstas se efectúen es irrelevante. En la práctica, la secuencia atenuación-partición se usa en estudios específicos, cuando se conoce la cuenca de aporte al punto de interés. Las investigaciones genéricas, como la presente, al carecer de un área de aplicación, se ocupan únicamente de inferir la variación temporal.

La cantidad de agua caída y las variables que exponen su dosificación, como la intensidad pico, son aleatorias e interdependientes. Por lo tanto, la verdadera recurrencia de una precipitación, con todos sus atributos, debe provenir de una función de densidad de probabilidad conjunta. Sin embargo, dado que la aproximación univariada es simple y la disponibilidad de datos es rara, sólo la intensidad media de una lluvia predicha es usualmente estadística (Grimaldi y Serinaldi, 2006). Como la distribución se deriva de manera independiente de la magnitud, corresponde buscar el prototipo más probable, aquel que desvirtúe menos la recurrencia instituida.

Los procedimientos para adjudicar un hietograma representativo a las precipitaciones futuras se basan en criterios disímiles de abordaje del problema y brindan una amplia gama de alternativas (Mascuka et al., 2009). No obstante, aquellos que se valen de registros reales deben ser aplicados a intervalos de máxima anual (IMA) de lluvia de determinada duración (Caamaño Nelli y Dasso, 2003). Esto es así porque la *i-d-T* surge de este tipo de eventos y, por lo tanto, la lámina que aporta corresponde a uno de ellos. De modo que seguir la distribución de los IMA (no la de tormentas, que suele ser muy diferente) es la única manera coherente de proceder (García et al., 2000).

Los métodos comunes para arribar al HT consisten en sintetizar eventos anteriores, extraerlo de la función *i-d-T*, tomar como patrón un evento particular o una forma geométrica. Adoptar un suceso aislado carece del respaldo estadístico para suponerlo típico y usar una geometría prefijada es obviamente arbitrario. La síntesis (de eventos anteriores) y la extracción (de datos de curvas *i-d-T*) son entonces las soluciones razonables.

Los métodos de síntesis, como los de Huff (1967) y Pilgrim et al. (1969), son preferidos por los usuarios por emplear secuencias de valores medidos. Esto les confiere un importante respaldo teórico. Pero dicho aval no se puede ratificar experimentalmente, porque el suceso a estimar es la crecida de proyecto, un hecho hipotético, por lo que no hay con qué cotejar los resultados.

Sintetizar conlleva también inconvenientes operativos, empezando por la elección del procedimiento. Los hietogramas sintéticos difieren mucho entre sí, dependiendo de la opción de derivación que se escoja (Caamaño Nelli et al., 2009c). Esta decisión es subjetiva, porque no hay argumentos rotundos para preferir un mecanismo determinado (Caamaño Nelli et al., 2009a).

Además, siendo asistemáticos los mecanismos de síntesis, la laboriosidad y el riesgo de errores crecen a medida que lo hace el número de percentiles en que se divide la precipitación. Esto restringe la cantidad de bloques a utilizar y, por lo tanto, las duraciones que se pueden considerar o bien la precisión con que se representa el fenómeno continuo (Caamaño Nelli et al., 2009b). No obstante, el condicionamiento crítico es la exigencia de datos, pues requieren contar con un conjunto considerable de hietogramas reales a sintetizar, que muchas veces no está disponible.

Extraer la distribución temporal de la lluvia de diseño de la función *i-d-T*, como en la táctica de Bloques Alternos (Chow et al., 1994), evita esa demanda y garantiza coherencia entre ambas relaciones. En particular, la técnica de Intensidad Instantánea (Keifer y Chu, 1957) origina un traza continua, resolviendo la cuestión de la precisión. Y, cuando se conoce la ecuación de la *i-d-T*, permite arribar a una expresión analítica del hietograma tipo, que simplifica su predicción.

Pese a sus ventajas, los HT extraídos son fuertemente cuestionados (Mascuka et al., 2009). El argumento en su contra es que la lluvia de diseño derivada de relaciones duración-frecuencia no suele representar una tormenta entera, sino extractos de tormentas (Pilgrim y Cordery, 1975) los que, al tomar promedios de las intensidades sobre una duración dada, no imitan las series históricas de las tormentas (Prodanovic y Simonovic, 2004). Por ende, dicha lluvia no encarnaría la naturaleza del fenómeno.

La respuesta a este planteo radica, en parte, en que los sucesos tipificados en la *i-d-T*, y por extensión en el hietograma que de ella proviene, no son tormentas severas, sino intervalos de máxima intensidad anual de lluvia, cuya distribución es muy diferente (García et al., 2000).

Otra objeción, en términos de Vašková y Francés García (2004), es que "... la forma clásica de obtención de las curvas IDF no tiene en cuenta la dependencia temporal, al asumir que las intensidades máximas anuales para los distintos intervalos de tiempo son independientes...". Por lo tanto, el hietograma derivado de una curva IDF clásica quedará siempre del lado de la seguridad. Esto explica la suspicacia ante estas técnicas, por entender que exageran la altura del pico del HT. No obstante la legitimidad de la objeción, la sobre estimación no siempre existe, dependiendo del mecanismo de extracción y del paso de cálculo elegido (Caamaño Nelli et al., 2009a).

Entendiendo ilógico descartar a priori la opción extractiva, Caamaño Nelli et al. (2007) derivaron hietogramas de funciones *i-d-T* del modelo DIT (Caamaño Nelli y García, 1999), usando el método de Intensidad Instantánea II (Keifer y Chu, 1957), con paso de cálculo variable, y compararon los resultados con los de bloques alternos.

Desde entonces (2007), se eliminó un parámetro superfluo del modelo DIT, se advirtió la ventaja de

operar con paso fijo y se detectó una merma de volumen en los hietogramas. Ello aconsejó repetir la experiencia bajo las nuevas condiciones. La aplicación utiliza iguales duraciones de IMA, adecuadas para pequeñas cuencas urbanas o rurales, y los mismos datos de la estación pluviográfica Ceres, del SMN, emplazada a 29° 53' S, 61° 57' W y 88 m snm, en la llanura santafesina. Pero el estudio va más allá que en esa ocasión, ya que la hipótesis a constatar es que los hietogramas de II no difieren de los sintéticos más de lo que éstos discrepan entre sí, como indican estudios anteriores (Caamaño Nelli et al., 2009a, 2009b), lo cual implica que unos y otros son igualmente válidos para representar la distribución típica de las lluvias máximas.

DEDUCCIÓN DE HIETOGRAMAS TÍPICOS

Las numerosas explicaciones, en la literatura especializada, de las técnicas de derivación que aquí se utilizan eximen de ir más allá de una breve reseña de sus planteos.

Síntesis de eventos históricos

En la síntesis se parte de dividir los IMA medidos en una cantidad fija de intervalos y calcular el porcentaje de lámina por percentil, en cada evento. Se arriba a imágenes adimensionales, constituidas por una sucesión de bloques, de intensidades constantes.

La técnica de Distribución Acumulada (Huff, 1967), DA, es de uso generalizado en Estados Unidos. Se aplica a cada percentil por separado, para delinear distribuciones empíricas de frecuencia de porcentaje de lámina (porción de los sucesos que no supera determinado límite de clase). Requiere instaurar un valor de no excedencia, para elaborar la curva de porcentajes acumulados hasta cada bloque, que se desagrega para obtener el hietograma de diseño con esa probabilidad de ocurrir. Este valor se establece normalmente en 0.5 (mediana de la muestra), que es el que menos altera la probabilidad instituida por la relación *i-d-T* para la lámina total.

El método de Ordenamiento de Intervalos, OI, es el estándar para diseño hidrológico en Australia. Desarrollado por Pilgrim et al. (1969) consiste en categorizar, en cada IMA, las proporciones de lluvia por bloque y promediarlas según su jerarquía. Sus ubicaciones promedio en los gráficos permiten adjudicar el orden cronológico de los percentiles en el hietograma tipo.

Hietograma de Intensidad Instantánea del modelo DIT

El método de Intensidad Instantánea II o de Chicago, ideado por Keifer y Chu (1957), genera hietogramas dimensionales (mm/hora) continuos, donde las intensidades en la rama ascendente, i_a , y en la descendente, i_b , son funciones de las duraciones respectivas, d_a y d_b , medidas desde el pico de intensidad, cuya suma es la duración d de la precipitación.

La ecuación (1) de II provee sólo dos resultados iguales, uno para cada rama de la curva. Esto hace necesario resolverla para duraciones crecientes, hasta alcanzar la base del hietograma, y situar en el tiempo cada par de puntos respetando el coeficiente de avance establecido.

$$\frac{dh}{dd} = i_a = i_b = i + d \cdot \frac{di}{dd} \quad (1)$$

Para arribar a la formulación algebraica del hietograma de diseño hay que explicar la intensidad de lluvia en función de las variables que la definen, recurrencia y duración, tornándose ineludible contar con una versión analítica local de la i-d-T. En este trabajo, la i-d-T de la estación Ceres responde al modelo DIT (Caamaño Nelli y García, 1999).

DIT es un modelo conceptual que plantea el logaritmo natural de la intensidad como función lineal del factor de frecuencia, Φ (Chow, 1951), y de un factor de persistencia, δ , relacionados a través de dos parámetros locales, propios del punto de medición, A y C, y uno zonal, B, según la relación (2):

$$\ln i = A \cdot \Phi - B \cdot \delta + C \quad (2)$$

Con base en la hipótesis de distribución lognormal de los máximos de lluvia anual, el factor de frecuencia tiene una relación biunívoca con el período de retorno, T, indicada en (3):

$$\Phi = 2.584458 \cdot (\ln T)^{3/8} - 2.252573 \quad (3)$$

En la versión original del DIT, δ depende de la duración de la lluvia, mediante un cuarto parámetro q, pero estudios recientes (Caamaño Nelli et al., 2012) revelan que es lícito adoptar $q = 5/3$ sin pérdida sensible de representatividad. Fijar el valor no altera la derivación posterior, ya que siempre q es constante en función de la variable independiente,

d. El factor se expresa entonces según (4):

$$\delta = (\ln d)^{5/3} \quad (4)$$

Si la forma explícita de i en la expresión (2), presentada en (5):

$$i = c \cdot a^\Phi / b^\delta \quad (5)$$

se sustituye en la relación (1), se llega al hietograma de Intensidad Instantánea extraído del modelo DIT (Caamaño Nelli et al., 2007), que en adelante se simbolizará como II-DIT.

$$i_a = i_b = i \cdot \left[1 - \frac{5}{3} \cdot B \cdot (\ln d)^{2/3} \right] \quad (6)$$

En (6), la intensidad instantánea es proporcional a la intensidad media aportada por la i-d-T. El factor vinculante depende de la duración usada en cada paso de cálculo y del parámetro zonal B del DIT, asociados justamente a la duración por la función principal (2) del modelo.

METODOLOGÍA

El estudio constó de dos partes. La primera examinó los efectos de variar el paso de cálculo sobre hietogramas extraídos según el procedimiento II-DIT, evaluó la conveniencia de rectificarlos y planteó la forma de hacerlo. En la segunda parte los experimentos consistieron en deducir hietogramas tipo de IMA con las rutinas de Distribución Acumulada y Ordenamiento de Intervalos, cotejar sus resultados, entre sí y con los de II-DIT, y discutir la representatividad de estos últimos.

En estudios anteriores (Caamaño Nelli et al., 2007, 2009a, 2009b, 2010) la ecuación (6) se utilizó con paso de tiempo variable por considerar que la precisión requerida para delinear la moda de la distribución se torna irrelevante al alejarse de ésta, a medida que la curva se suaviza. En esta ocasión, el criterio fue prolongar la duración en sucesivos intervalos fijos en cada ensayo, para precisar la influencia del paso de cálculo en la forma, la superficie y la talla de los HT. Por igual motivo se eligieron incrementos pequeños: 1, 2, 3, 5 y 6 minutos, que brindan un buen grado de detalle y dividen los IMA contemplados en una cantidad entera de intervalos.

El cómputo de la intensidad media de la lluvia, i , con la ecuación (2), requiere un valor del factor de frecuencia Φ , y, por lo tanto, según (3), de la recurrencia, T . Pero no es la intensidad en sí lo que se analiza, sino su evolución temporal, así que T actúa sólo como factor de escala, sin alterar la forma de los hietogramas. Es decir que, al ser independientes la recurrencia y la duración, las inferencias sobre ésta serán válidas al variar el valor de aquella. Por ende, se estableció $T = 20$ años.

Como los mecanismos de síntesis no son aplicables con lapso menor que el de los datos de partida, 5 minutos en este caso, se adoptó tal intervalo al recurrir a dichas técnicas en la segunda parte del trabajo. Las duraciones de lluvia tratadas fueron 30, 60, 90 y 120 minutos, expresadas por 6 a 24 bloques, números razonables porque un grado de partición menor engendra una gráfica tosca, mientras que uno mayor acrecienta la laboriosidad y el riesgo de error al ordenar los percentiles.

Para DA se adoptó probabilidad de no excedencia $P = 0.5$ (mediana de la distribución). Huff (1967) dividió previamente cada hietograma en 4 bloques y los agrupó por posición del pico. Aquí no se dieron esos pasos (aparte del criterio de partición apuntado) por la escasez de eventos en algunos grupos, pero sobre todo porque, cuando el IMA no coincide con un número entero de horas, la duración de los bloques no es múltiplo de 5 minutos y no hay registros para ella.

La semejanza entre los hietogramas se evaluó con tres índices: el coeficiente de pico, C_p , llamando así al cociente entre los montos de lámina en la moda, con el menor como numerador; el coeficiente de determinación, R^2 , y una función objetivo, FO, producto de los dos anteriores. Estos índices expresan la analogía de las configuraciones en cuanto al tamaño relativo del pico, a la distribución en general y a su valoración conjunta, respectivamente. Debido a cómo fue definido cada índice, dichos atributos resultan medidos de cero a uno, siendo la unidad el valor óptimo.

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

La variación del intervalo de cómputo o paso de cálculo, t , afectó sustancialmente las lluvias predichas por el método extractivo, en su intensidad máxima, la distribución temporal y la lámina precipitada. La Figura 1 ilustra como influyó t sobre dichas características para IMA de 30 minutos.

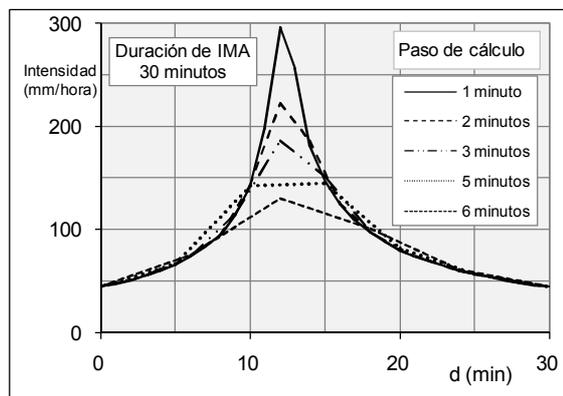


Figura 1. Alteración de las características del hietograma de Intensidad Instantánea al cambiar del paso de cálculo.

La modificación de la distribución se hace ostensible para el paso de cálculo $t = 5$ minutos, con la que el HT presenta una forma de meseta, mientras que para los demás intervalos resulta empinado. Este hecho es circunstancial y de explicación sencilla: si algún punto computado coincide con el tiempo al pico ($\cong 12$ minutos en este ejemplo) reflejará plenamente su valor, como acontece con la mayoría de las duraciones probadas; en cambio, si los puntos que flanquean al máximo (10 y 15 minutos en el caso anómalo) distan de éste, expondrán sólo valores intermedios de ambas ramas de la curva. Este efecto es propio de cualquier interpolación en la que la función presenta un máximo relativo en un intervalo y suele darse también en hietogramas sintéticos.

Otro tanto ocurre con la depresión de la altura del gráfico al aumentar la extensión de los incrementos de tiempo. Acorde a la naturaleza del fenómeno y a lo que cuantifica la i - d - T , la intensidad cae al crecer la duración, ya que su máximo en 1 minuto se promedia con datos menores. Este efecto no es inocuo como el anterior porque, si bien todos los hietogramas se abaten al hacer una partición más gruesa, no todos lo hacen en igual medida. Dos HT extraídos de la misma relación i - d - T con paso de 1 minuto, uno por el método de Bloques Alternos y otro por II-DIT, coinciden exactamente en altura. Pero Caamaño Nelli et al. (2010) probaron que, si t se agranda, el segundo decae mucho más y para incrementos de 5 minutos su pico no llega al 65% del de bloques.

La causa del eso radica en la ecuación (6), donde la intensidad instantánea ($i_a = i_b$) es igual a la media i , por una diferencia. Lo único que altera a esta última es la duración d , que en el primer cálculo, correspondiente al pico, equivale al paso t . Cuando $d = 1$, $\ln d = 0$ y el sustraendo se anula, dando un factor

unitario. Un paso mayor implica un logaritmo no nulo y un factor menor que uno. Tal comportamiento implica que los hietogramas de II-DIT no necesariamente sobrevaloran el pico de intensidad (como ocurre con Bloques Alternos), lo cual significa un hecho positivo para su representatividad.

La Figura 2 muestra en qué proporción decae la intensidad máxima al pasar de 1 a 6 minutos. Sin embargo la incidencia más relevante de la frecuencia de cómputo la sufre el área del HT, cuya merma no sólo depende del paso t , sino también de la duración de la lluvia, tendiendo a ser menor para los eventos más prolongados.

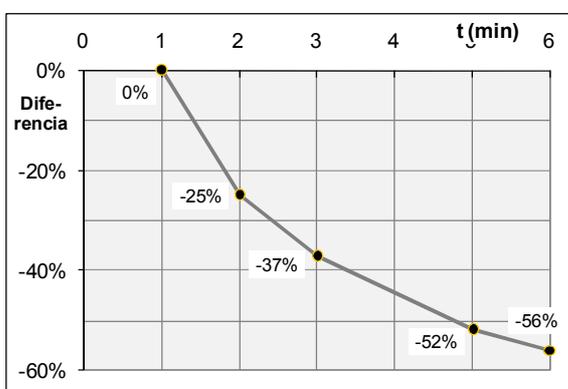


Figura 2. Reducción relativa del pico del hietograma de Intensidad Instantánea con el aumento del paso de cálculo.

La Figura 3 muestra que la proporción en que decae la superficie bajo la curva puede exceder 15% en el peor de los casos ($d = 30$ minutos, $t = 6$ minutos). La importancia de tal achicamiento es que la superficie bajo la curva representa la lámina precipitada, dada por la función intensidad-duración-recurrencia para la duración del hietograma.

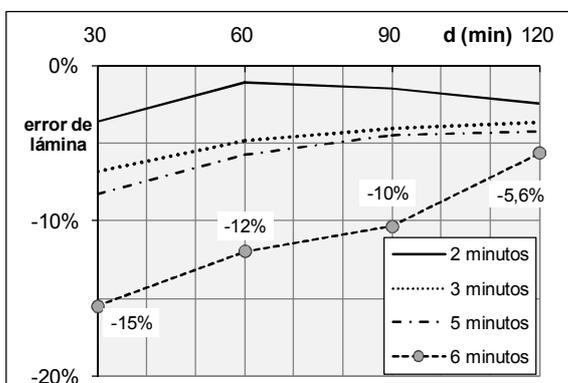


Figura 3. Errores relativos producidos en la lámina precipitada a medida que crece el intervalo de cálculo de hietogramas de II.

Es decir que se ha perdido parte del monto preestablecido de agua, cuando únicamente había que distribuirlo. Esto obviamente constituye un error, no una mera disminución de la precisión. El efecto en cuestión es producto del mecanismo operativo de Intensidad Instantánea, no del modelo i - d - T que se utilice. Al incrementar el paso, lo que se está haciendo es eliminar puntos de la contabilidad en la zona más sensible, lo cual genera un cercenamiento de la cresta, sin que esa área sea compensada en el resto del hietograma, como se puede observar en la Figura 1.

Este corte no ocurre al trabajar con distribuciones discretas, sean de síntesis o no, porque el acomodo de los bloques reparte la lámina sustraída en el pico y restituye el total.

Explicado el error, cabe buscarle una solución. En primera instancia, hay que descartar la reconstrucción de la cúspide del hietograma, no por perder la conveniente atenuación de la altura, sino porque habría que volver a operar con paso de 1 minuto, muy inferior a los empleados en la práctica, lo cual, como se vio, provoca necesariamente una sobre valoración del máximo. Prorratear en todos los puntos de cálculo el déficit creado, como otros métodos de reparto, parece ser la opción lógica.

La Figura 4 exhibe el efecto de tal rectificación: aunque la altura disminuyó en un tercio, respecto al paso de 1 minuto, la superficie está ahora compensada en ambas ramas. Así, el hietograma tipo de II-DIT resulta de área correcta y presuntamente no sobre elevado.

Constatar esa presunción, que es en esencia la hipótesis propuesta, fue el objetivo de la segunda parte del presente trabajo. En ella, para que los hietogramas tipo de IMA fuesen comparables, se impuso total paridad a la información de partida. Los HT de Ordenamiento de Intervalos (OI, Pilgrim et al., 1969) y de Distribución Acumulada (DA; Huff, 1967) sintetizaron justamente los mismos eventos usados para calibrar el modelo DIT (ecuación (2)). La función i - d - T resultante se empleó tanto para dimensionar los hietogramas sintéticos, como para extraer los de Intensidad Instantánea (II, Keifer y Chu, 1957). Éstos se calcularon con paso equivalente al de los sintéticos ($t = 5$ minutos), su área fue corregida como se indicó y se discretizaron en bloques de igual intervalo.

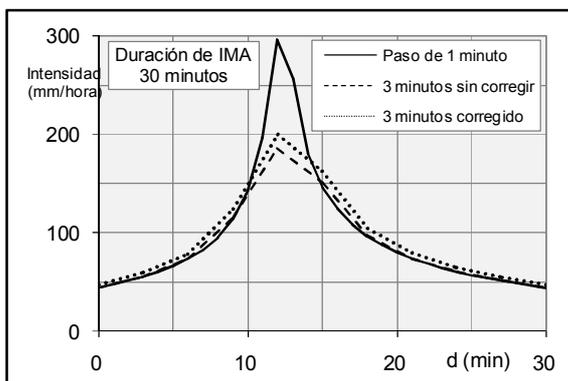


Figura 4. Contraste de hietogramas de II computados cada 1 y 3 minutos y con la versión de este último rectificada en cuanto a la lámina precipitada.

La Tabla 1 exhibe y contrasta las intensidades máximas de las distribuciones deducidas mediante las técnicas precipitadas. Cualquiera sea la duración que se considere, se puede apreciar que los hietogramas de OI presentan el mayor pico de intensidad y los de DA, el menor, quedando los de II entre ambos. Con respecto a éstos, los HT sintetizados según Pilgrim et al. están entre un 11 y un 15% por encima y los de Huff entre un 15 y un 42% por debajo. Es decir que, en cuanto a su empinamiento, los hietogramas extraídos se asemejan mucho más a los de OI que a los de DA.

La última columna de la Tabla 1 permite constatar la veracidad de la hipótesis explorada, en cuanto a la talla de los hietogramas: que los de II distan menos de los sintéticos que lo que éstos se apartan entre sí. Los valores del coeficiente de pico en la Tabla 2 confirman lo antedicho.

En cuanto a la analogía de forma de las distribuciones, el coeficiente de determinación es mayor en las regresiones entre los HT extraídos y los de Pilgrim et al. que entre éstos y los de Huff, salvo para 30 minutos.

Se ve también que, cuando mayores son ambas correlaciones, mas rezagado resulta el R^2 para Huff.

Como cabe esperar por los valores de C_p y R^2 , la función objetivo, producto de ambos, resulta claramente favorable a los resultados de Intensidad Instantánea, lo cual significa que éstos se asemejan bastante más a los hietogramas tipo de Ordenamiento de Intervalos que los de Distribución Acumulada, al evaluar conjuntamente el tamaño del pico y la morfología completa.

Las Figuras 5 a 8, que confrontan los tres tipos de HT considerados, ratifican lo señalado.

Tabla 1. Picos de intensidad de HT y diferencias porcentuales entre ellos, en relación con el correspondiente de II.

| DURACIÓN DEL IMA | INTENSIDAD MÁXIMA DEL HIETOGRAMA (mm/hora) | | | DIFERENCIA RELATIVA DEL PICO CON RESPECTO A II | | |
|------------------|--------------------------------------------|-------|-------|------------------------------------------------|------------|------------|
| | OI | DA | II | (OI-II)/II | (DA-II)/II | (DA-OI)/II |
| 30 min. | 174.5 | 118.7 | 156.3 | 11.65 % | -24.06 % | -35.71 % |
| 60 min. | 173.1 | 128.0 | 151.3 | 14.41 % | -15.44 % | -29.85 % |
| 90 min. | 170.5 | 105.9 | 148.6 | 14.74 % | -28.68 % | -43.42 % |
| 120 min. | 169.0 | 87.4 | 149.7 | 12.87 % | -41.63 % | -54.50 % |

Tabla 2. Índices de semejanza entre los hietogramas tipo de Ordenamiento de Intervalos, Distribución Acumulada e Intensidad Instantánea.

| DURACIÓN DEL IMA | COEFICIENTE DE PICO, CP | | COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN | | FUNCIÓN OBJETIVO, FO | |
|------------------|-------------------------|---------|------------------------------|-----------|----------------------|-----------|
| | II / OI | DA / OI | II vs. OI | DA vs. OI | II vs. OI | DA vs. OI |
| 30 min. | 0.896 | 0.680 | 0.414 | 0.480 | 0.371 | 0.326 |
| 60 min. | 0.874 | 0.739 | 0.981 | 0.700 | 0.858 | 0.518 |
| 90 min. | 0.872 | 0.622 | 0.651 | 0.593 | 0.567 | 0.369 |
| 120 min. | 0.886 | 0.517 | 0.821 | 0.693 | 0.727 | 0.358 |

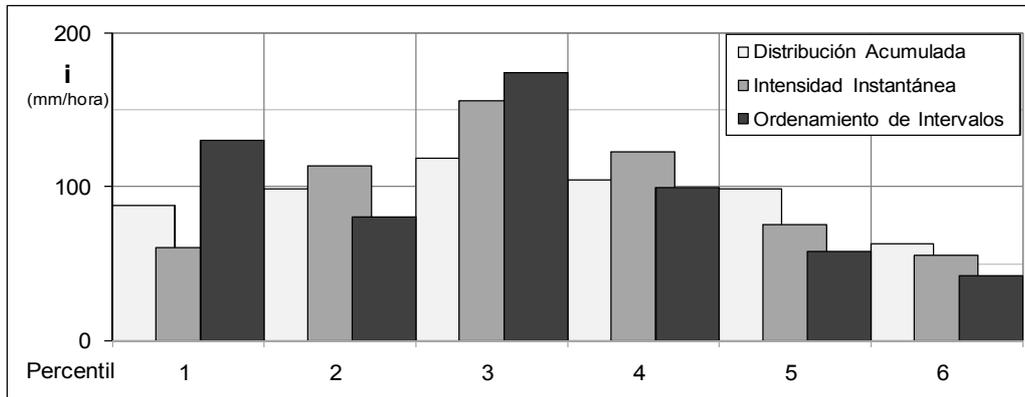


Figura 5. Hietogramas tipo sintéticos y de Intensidad Instantánea extraídos de la función i-d-T del DIT, Estación Ceres SMN, duración del IMA d = 30 minutos, paso de cálculo t = 5 minutos.

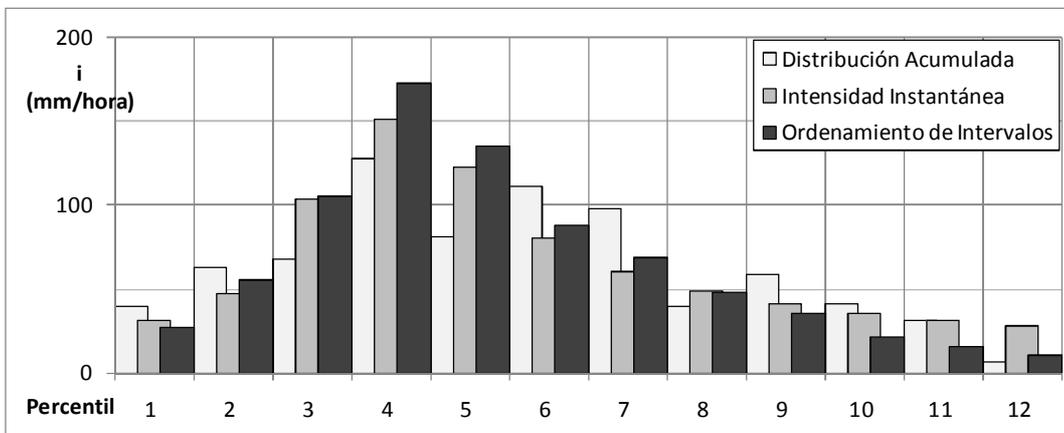


Figura 6. Hietogramas tipo sintéticos y de Intensidad Instantánea extraídos de la función i-d-T del DIT, Estación Ceres SMN, duración del IMA d = 60 minutos, paso de cálculo t = 5 minutos.

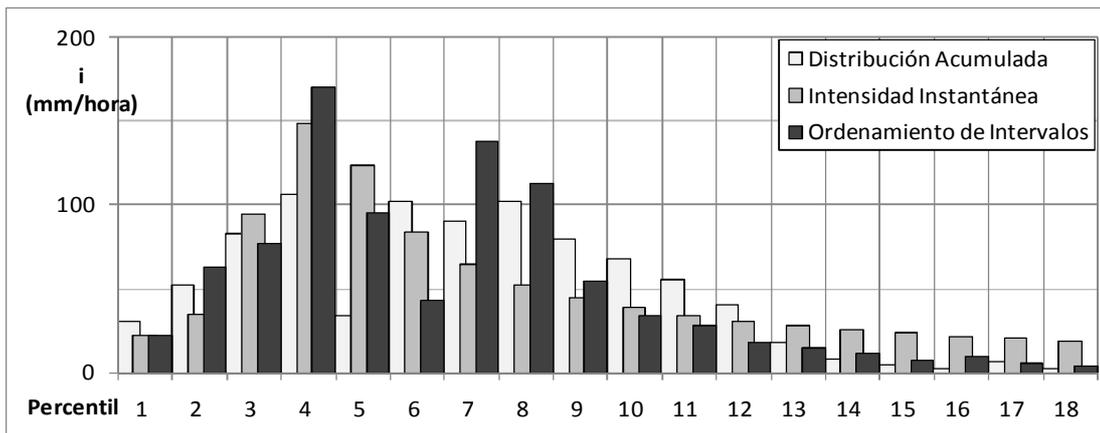


Figura 7. Hietogramas tipo sintéticos y de Intensidad Instantánea extraídos de la función i-d-T del DIT, Estación Ceres SMN, duración del IMA d = 90 minutos, paso de cálculo t = 5 minutos.

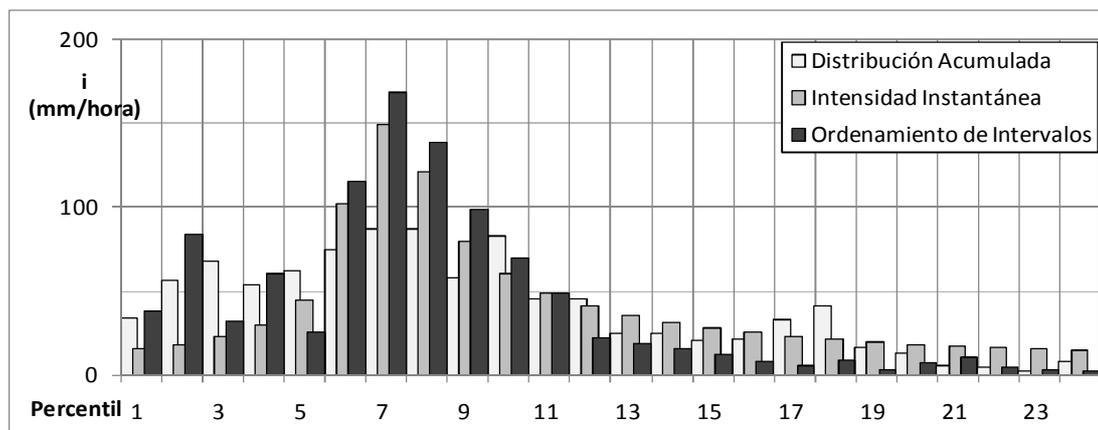


Figura 8. Hietogramas tipo sintéticos y de Intensidad Instantánea extraídos de la función i-d-T del DIT, Estación Ceres SMN, duración del IMA $d = 120$ minutos, paso de cálculo $t = 5$ minutos.

CONCLUSIONES

Cuando el hietograma tipo se extrae de una función intensidad-duración-recurrencia a través del método de Intensidad Instantánea, al ampliar el paso de cálculo dicha técnica excluye valores de la distribución. Esto provoca una amputación del pico no restituida en el resto de la gráfica. Variar el intervalo afecta notoriamente el reparto estimado, en su configuración, en su altura y en su área.

La alteración de la forma es incidental, habitual al interpolar en el entorno de un máximo relativo. Depende de en qué medida algún valor ponderado se aproxima a dicho máximo y suele darse también en hietogramas sintéticos.

El abatimiento de la figura, al aumentar el paso de cálculo, responde a una característica del fenómeno natural, reflejada por la función i-d-T: al crecer la duración de la lluvia la intensidad cae. Pero el hietograma tipo de Intensidad Instantánea se deprime mucho más que otros al espaciar la discretización, de modo que la sobreestimación del pico de intensidad se disipa rápidamente.

El principal efecto de la frecuencia de cómputo es la reducción del área del hietograma, pues implica una pérdida parcial de la lámina provista por la función intensidad-duración-recurrencia, que sólo había que repartir temporalmente. La opción razonable para restituir el total es prorratear en todos los puntos del hietograma el déficit causado, como hacen implícitamente otros métodos.

Obtenido el hietograma tipo de Intensidad Instantánea

de área correcta, fue posible evaluar la hipótesis de que no sobrevalúa el pico de intensidad. Para ello, se lo comparó con los resultantes de las técnicas de síntesis de Pilgrim et al. y de Huff, con total paridad en la información de partida.

Se constató, con cualquier duración considerada, que los máximos de Intensidad Instantánea se sitúan entre los de las dos variantes de síntesis, siendo los de Huff los menores. Con respecto a su altura, los hietogramas extraídos se asemejan mucho más a los de Pilgrim et al. Algo similar ocurre en cuanto a la analogía de forma de las distribuciones y a la valoración conjunta de ambos aspectos.

Aceptando que la síntesis es el mecanismo ideal para deducir la distribución característica de las lluvias máximas, que los hietogramas tipo sintéticos difieran entre sí más de lo que lo hacen de los de Intensidad Instantánea implica que éstos son tan representativos como aquellos para tal fin.

Considerando que se analizan intervalos de máxima intensidad de lluvia anual, no tormentas severas, la afirmación previa es aplicable a eventos breves, de interés para hidrología urbana o para cuencas de hasta pocos centenares de km^2 , donde es coherente computar valores cada 5 minutos.

El corolario de este trabajo no es proponer la sustitución de los hietogramas sintéticos por los de Intensidad Instantánea, sino convalidar éstos para cuando se carezca de eventos históricos a sintetizar, en vez de tomar como patrón un suceso particular, sin respaldo estadístico para suponerlo típico, o adoptar arbitrariamente una forma geométrica.

La corrección aplicada a los hietogramas de Intensidad Instantánea no hace sino reforzar, en tal sentido, el aval de estudios anteriores, realizados sobre ésta y otras estaciones del centro del país.

REFERENCIAS

- Caamaño Nelli, G. y García, C. M. 1999. Relación Intensidad – Duración -Recurrencia de Lluvias Máximas: Enfoque a través del Factor de Frecuencia, Caso Lognormal. *Ingeniería Hidráulica en México*. Vol. XIV, N° 3, pp. 37-44. D. F. México.
- Caamaño Nelli, G. y Dasso, C. 2003. *Lluvias de Diseño: Conceptos, Técnicas y Experiencias*. Editorial Universita. 222 páginas. Córdoba, Argentina. ISBN: 987-9406-43-5.
- Caamaño Nelli, G.; Dasso, C.; Colladon, L. 2007. Patrones temporales de precipitación en Ceres, Santa Fe, extraídos de una función i-d-T Lognormal. Art. 182 en CD-Rom. XXI Congreso Nacional del Agua. CPCNA. Tucumán.
- Caamaño Nelli, G.; Dasso, C. y Colladon, L. 2009a. Evaluación de la distribución temporal interna de lluvias máximas para diseño hidrológico. *Ingeniería Hidráulica en México*. Vol. XXIV, N° 2, pp. 37-49. México.
- Caamaño Nelli, G.; Dasso, C. y Mascuka, E. 2009b. Predicción de hietogramas tipo en ausencia de registros históricos. XXII Congreso Nacional del Agua. CPCNA. Trelew.
- Caamaño Nelli, G.; Dasso, C. y Mascuka, E. 2009c. ¿Existe un prototipo de hietograma sintético para diseño hidrológico?. *Cuadernos del CURIHAM*, Vol. 15, pp. 1-12. UNR, Rosario, Argentina
- Caamaño Nelli, G.; Dasso, C. y Colladon, L. 2010. Hietogramas para Diseño con Distribución Lognormal de la Intensidad de Lluvia. *Ingeniería del Agua*. Vol. 17, N° 4. Universidad Politécnica de Córdoba. Córdoba, España. ISSN: 1134-2196.
- Caamaño Nelli, G.; Rico, A. y Dasso, C. 2012. El Modelo DIT 3p para Predicción de Lluvias Máximas. *Libro de Trabajos del III Taller sobre Regionalización de Precipitaciones Máximas*. (ISBN 978-950-673-953-9) pp 71-82. UNR Editora. Rosario, Argentina.
- Chow, V. T. 1951. A General Formula for Hydrologic Frequency Analysis. *Transactions American Geophysical Union*. Vol. 32, N° 2, pp. 231-237. USA.
- Chow, V. T.; Maidment, D. y Mays, L. 1994. Tormentas de Diseño. Libro: *Hidrología Aplicada*. Cap. 14; pág. 455 a 505. ISBN: 958-600-171-7, Mc Graw-Hill Interam. S.A. Santafé de Bogotá, Colombia.
- García, C.; Caamaño Nelly, G. y Dasso, C. 2000. Coherencia entre la Lámina y su Distribución en la Estimación del Hietograma Puntual de Diseño. *Usa y Pres. Rec. Hídr. Umbrales del S. XXI*, 25-26. S. del Estero, Argentina
- Grimaldi, S. y Serinaldi, F. 2006. Design hietograph analysis with 3-copula function. *Hydrological Sciences Journal*. Volume 51, Issue 2, 223-238.
- Huff, F. A. 1967. Time Distribution of Rainfall en Heavy Storms. *Water Res. Research*, Vol. 3, N° 4, 1007-1019. USA.
- Keifer, C. y Chu, H. 1957. Synthetic Storm Pattern for Drainage Design. *Journal of Hydraulics Division*. American Society of Civil Engineers, Vol. 83, N° 4, pp. 1-25. USA.
- Mascuka, E.; Caamaño Nelly, G. y Colladon, L. 2009. Clasificación y utilidad de hietogramas para diseño hidrológico. XXII Congreso Nacional del Agua. CPCNA. Trelew.
- Pilgrim, D. y Cordery, I. 1975. Rainfall temporal patterns for design floods Jr. *Hydr. Div. ASCE*, 101(HY1): 81-95.
- Pilgrim, D.; Cordery, I. y French, R. 1969. Temporal Patterns of Design Rainfall for Sydney. *Civil Engineering Transactions*, Vol. CE 11, N° 1. The Institution of Engineers. Sydney, Australia.
- Prodanovic, P. y Simonovic, S. 2004. Generation of synthtic design storms for the Upper Thames River basin. CFCAS Project: Assessment of Water Res. Risk and Vulnerability to Changing Climatic Conditions. Project Report V.
- Vašková, I. y Francés García, F. 2004. Cálculo de hietogramas de diseño con incorporación de las propiedades de escala y dependencia temporales de la precipitación. XXI Cong. Latinoamericano de Hidráulica. IAHR Res. p.74. São Pedro, Brasil

Artículo recibido el 05/2013 y aprobado para su publicación el 10/2013