

Estudios en honor de
Francisco Javier Domínguez
ACh, 5ª Serie, N° 8 (1985): 655-668

INFLUENCIA DEL HIETOGRAMA DE UNA TORMENTA EN LA CRECIDA RESULTANTE

EDUARDO VARAS C.
Universidad Católica de Chile

I. INTRODUCCIÓN

La distribución en el tiempo de la lluvia caída, durante una tormenta, es un factor primordial en el diseño de redes de aguas lluvias, en el proyecto de sistemas de drenaje de carreteras y aeropuertos, en la predicción de la erosión de un suelo, en la definición de los planes de manejo de cuencas, en los procedimientos de estimación de gastos sólidos y en otros problemas hidrológicos. Sin embargo, aun cuando en principio es conocida la influencia de la forma del hietograma en la onda de una crecida, y se sabe que este factor debe ser considerado, es usual que en muchos problemas de la práctica profesional se opte por un enfoque simplificado que implique suposiciones, tales como la hipótesis de considerar una distribución uniforme para la lluvia en el tiempo. El ingeniero, en este caso, implícitamente supone que los resultados corresponderán a una estimación conservadora de la realidad, o bien, confía en que el enfoque sea suficientemente realista.

Este artículo pretende aportar antecedentes adicionales a este problema, ilustrando las diferencias que pueden ocurrir en el hidrograma de una crecida al variar el hietograma o la forma de distribución en el tiempo de la lluvia durante una tormenta, sin que cambien otras propiedades de ella. Es decir, manteniendo constante la duración total y la magnitud de la tormenta. Se pretende con ello evaluar la importancia que tiene el estudio de los hietogramas y las ventajas e incidencia que tiene la utilización y

el desarrollo del concepto de tormenta de diseño, para las situaciones que enfrenta el proyectista en su labor profesional.

2. METODOLOGÍA

Para ilustrar la influencia del hietograma sobre las características de la onda de crecida que genera una tormenta, se utilizó un modelo determinístico del ciclo de escorrentía, al cual se entrega como dato de entrada, varias tormentas de distinta distribución temporal, pero de igual magnitud y duración, obteniéndose como resultado, un hidrograma de crecida para cada caso. Por consiguiente, en la metodología usada, se distinguen dos componentes principales: primero, el método empleado para definir las tormentas de diseño y, segundo, el modelo utilizado para determinar el escurrimiento producido por las tormentas de diseño. A continuación, se describen los aspectos esenciales de cada uno de estos componentes.

2.1. Modelo de Tormentas

Huff (1967)¹ estudió la distribución en el tiempo de las tormentas observadas en una red de 49 estaciones pluviográficas ubicadas en una área de 400 millas cuadradas en el Estado de Illinois. El autor empleó las observaciones registradas entre los años 1955 y 1966, lapso durante el cual se registraron 261 tormentas con duraciones entre 3 y 48 horas.

El autor encontró que la mejor representación se conseguía cuando se relacionaba el porcentaje de lluvia acumulada, en función del porcentaje de tiempo acumulado para tormentas clasificadas en 4 grupos de características similares. Concluyó que la magnitud de la tormenta, su duración, su constitución por chubascos aislados y otros factores tenían una influencia menor y no eran significativos estadísticamente. Uno de los resultados del estudio fue detectar la importancia de clasificar las tormentas según el momento en que cae la mayor precipitación, ya que ésta se concentra normalmente, en un lapso relativamente corto, comparado con la duración total de la tormenta, independientemente de otras características, tales como la duración, homogeneidad espacial, número de chubascos y magnitud. Esta consideración llevó a Huff a proponer una clasificación de las tormentas en cuatro grupos, dependiendo si la mayor precipitación se observaba en el primer, segundo, tercer o último cuarto de la duración total de la tormenta.

Las distribuciones resultantes se presentaron en gráficos que indican el porcentaje acumulado de lluvia caída en función del porcentaje de tiem-

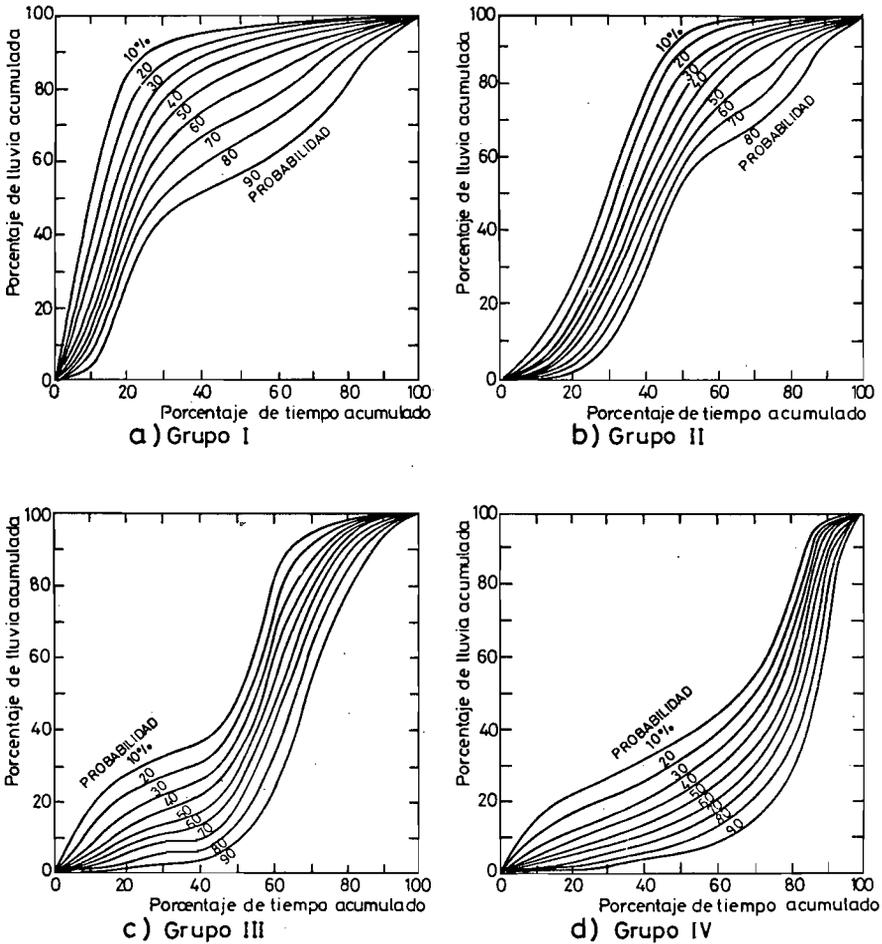


Figura 1

Distribuciones propuestas por Huff.

po acumulado. Adicionalmente, se incluyó un análisis de frecuencia de todas las tormentas registradas, con el fin de poder asociar a cada una de las curvas de distribución una probabilidad de ocurrencia. La Figura 1 resume los resultados logrados para cada uno de los cuatro grupos de tormentas. En el caso estudiado, fueron más frecuentes las tormentas del grupo I (30%) y II (36%) que las tormentas de los grupos III (19%) y IV (15%).

El estudio de Huff permite al hidrólogo distribuir una tormenta, cuya duración y magnitud total se conoce, en intervalos de tiempo más cortos, teniendo al mismo tiempo, una idea de la probabilidad de ocurrencia de dicha tormenta. Se obtiene así, una tormenta de diseño que puede ser utilizada en diferentes procedimientos hidrológicos para estimar crecidas, como son, hidrogramas unitarios, sintéticos o modelos más elaborados del ciclo de escurrimiento.

En este trabajo se utilizaron los resultados propuestos por Huff para generar distintas tormentas de diseño, dado que las características de las tormentas ocurridas en Chile no han sido estudiadas con la misma extensión y, por lo tanto, los resultados que se conocen son sólo parciales. (Espíldora y Echavarría, 1979)².

2.2 Modelo Lluvia-Escurrecimiento

Para analizar la sensibilidad de la transformación lluvia-escurrecimiento, es necesario contar con un procedimiento de transformación de amplia aplicación práctica, con una estructura de eventos aislados, suficientemente simple y con pequeño número de parámetros. Las opciones disponibles son las metodologías de hidrograma unitario y los modelos matemáticos digitales más generales del ciclo hidrológico.

Los esfuerzos previos realizados por distintos investigadores para estimar el escurrimiento proveniente de cuencas sin registros, han destacado las ventajas de los modelos de propagación de escorrentías o escurrimientos. La atenuación o propagación de la escorrentía puede definirse como el proceso mediante el cual un hietograma de lluvia efectiva se propaga a través del almacenamiento o embalse que representa la cuenca para dar origen al hidrograma de escorrentía. El concepto es similar al de propagación de crecidas, con la diferencia que el aporte al embalse no es un hidrograma, sino que un hietograma de lluvia efectiva.

El procedimiento seleccionado fue el modelo *RORB* (Versión 3) propuesto por Laurenson y Mein (1983)³, el cual es un programa interactivo que calcula el efecto de atenuación y de propagación de un hietograma de lluvia efectiva o de otras formas de aporte de agua, a través de una cuenca, y/o a través de un sistema hidrográfico que puede incluir embalses. El método permite estimar los hidrogramas de crecidas, dimensionar embalses de regulación y estudiar la propagación de crecidas a lo largo de un curso de agua.

El modelo, cuyo diagrama de flujo se muestra esquemáticamente en la Figura 2, se formula sobre la base de representar la cuenca por un conjunto de embalses no lineales en serie.

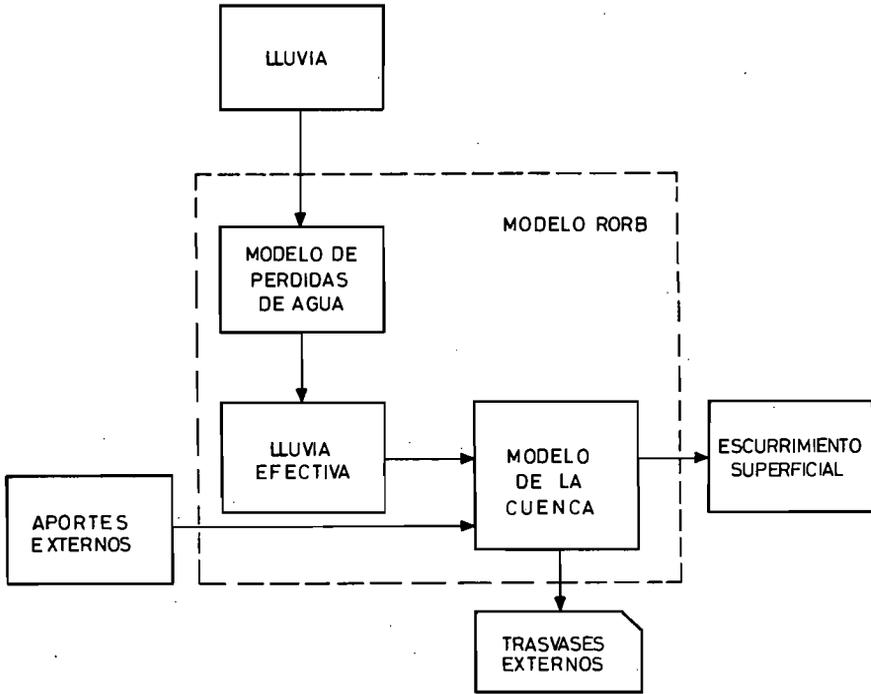


Figura 2

Diagrama de Flujo Modelo Rorb.

La precipitación de entrada se ve afectada por un modelo de pérdidas que entrega como resultado un hietograma de lluvia efectiva. El modelo contempla 2 alternativas de pérdidas, un valor inicial seguido de una pérdida con tasa constante, o bien, una razón de pérdida proporcional al escurrimiento. La lluvia efectiva se propaga, posteriormente, a través de un conjunto de embalses no lineales que representa la cuenca, para dar origen al hidrograma de escurrimiento.

El sistema hidrográfico también puede recibir aportes de otras fuentes, o bien, entregar recursos a canales de trasvase hacia el exterior de la cuenca. Estas entradas y salidas pueden presentarse concentradas en un punto, o bien, distribuidas a lo largo de un tramo del río.

El flujo subterráneo no está explícitamente incluido en el modelo, pero la concepción de éste es lo suficientemente general para poder incorporarlo dentro de su esquema de representación. El programa se ha ideado en forma general, es capaz de representar cualquier cuenca y constituye un método espacialmente distribuido, no lineal, basado en los procedimientos de propagación de crecidas.

Típicamente, la cuenca se subdivide en áreas parciales definidas, tomando en consideración la red hidrográfica, y se calcula la precipitación correspondiente a cada sub-área, concentrándola en un punto cercano al centroide de dicha área parcial. En general, los efectos de almacenamiento de la sub-área y del tramo de río se representan por un embalse ubicado entre el centroide y la salida.

Una vez que la lluvia efectiva que cae sobre la primera sub-área se ha propagado a través del primer embalse, se agrega a ella la lluvia efectiva de la segunda sub-área y se calcula el efecto de atenuación del segundo elemento de embalse sobre el hidrograma total. Se continúa de esta manera, hasta que el hidrograma ha pasado a través de todos los embalses.

La relación no-lineal entre el volumen almacenado (S_i) y el caudal (Q_i), para la sub-área i se representa por una ecuación del tipo siguiente, en la cual intervienen dos parámetros del modelo (K_i , m):

$$S_i = K_i Q_i^m$$

El parámetro K_i es igual al producto de un parámetro K_c y de un coeficiente adimensional Kr_i que es función de la longitud y/o pendiente del tramo en cuestión y de un factor que depende de la longitud ponderada de todos los otros tramos de la red hidrográfica.

$$Kr_i = F \cdot L_i / d_{Av}$$

$$d_{av} = l_i A_i / \sum A_i$$

siendo:

d_{Av} = distancia promedio de escurrimiento de los aportes de las sub-áreas.

l_i = longitud entre el centroide y la salida en cada sub-área.

A_i = superficie de la sub-área.

F = factor función del tipo de sección y del revestimiento del tramo.

El efecto de propagación de crecidas se obtiene, entonces, por la solución simultánea de las ecuaciones de almacenamiento y de continuidad en cada uno de los tramos definidos para representar la red.

Como el sistema de ecuaciones que resulta no es lineal, su solución se obtiene por aproximaciones sucesivas, empleando el método de Newton. En comparación a los métodos tradicionales de hidrograma unitario, este procedimiento es bastante general, pues no tiene limitaciones intrínsecas de homogeneidad espacial ni de linealidad.

El modelo tiene sólo 2 parámetros que son m y K_c , los cuales se pueden optimizar al aplicar el método a una cuenca cualquiera. Las demás variables de entrada representan características geomorfológicas de la hoya que pueden obtenerse de mapas topográficos.

Este modelo es bastante simple de utilizar y representa adecuadamente características hidrológicas de una amplia gama de situaciones, según se ha demostrado en aplicaciones anteriores informadas en la literatura técnica. (Laurenson y Mein, 1983).

2.3 Cuenca seleccionada

Para lograr el objetivo de este trabajo, se seleccionó la cuenca del río Thomson en la estación fluviográfica The Narrows, (Australia). La cuenca se dividió en 11 sub-áreas y la red hidrográfica se representó por 18 embalses no lineales, según se muestra en la Figura 3. Las longitudes representativas de cada tramo y las superficies de las sub-áreas se resumen en la misma figura.

El modelo *RORB* fue aplicado y calibrado para esta cuenca con buenos resultados, llegándose a la conclusión de que los parámetros más adecuados para representarla son 0,8 para el exponente m y 65 para el coeficiente K_c (Laurenson y Mein, 1983). La comparación de los caudales simulados y observados para diferentes tormentas en la localidad de The Narrows confirma la bondad del comportamiento del modelo en este caso y los valores de los parámetros. Ello se muestra en la Figura 4, que resume los resultados de la calibración efectuada por los autores mencionados para la crecida ocurrida el 6 de noviembre de 1971.

3. RESULTADOS

Se utilizó el modelo *RORB*, previamente calibrado para el río Thomson, para estudiar la sensibilidad del hidrograma resultante frente a cambios en el hietograma de la tormenta. Como datos de entrada se empleó dos conjuntos de tormentas, todas ellas de magnitud total igual a 270 mm y

Sub-Área	Superficie km ²	Sub-Área	Superficie km ²
A	62	G	44
B	42	H	21
C	44	I	80
D	59	J	67
E	41	K	28
F	31		

Tramo	Longitud (km)
1	6,5
2	2,5
3	2,5
4	5,5
5	5,0
6	5,0
7	4,0
8	4,0
9	5,0
10	5,0
11	2,5
12	7,0
13	4,0
14	7,5
15	3,0
16	3,0
17	5,0
18	2,5

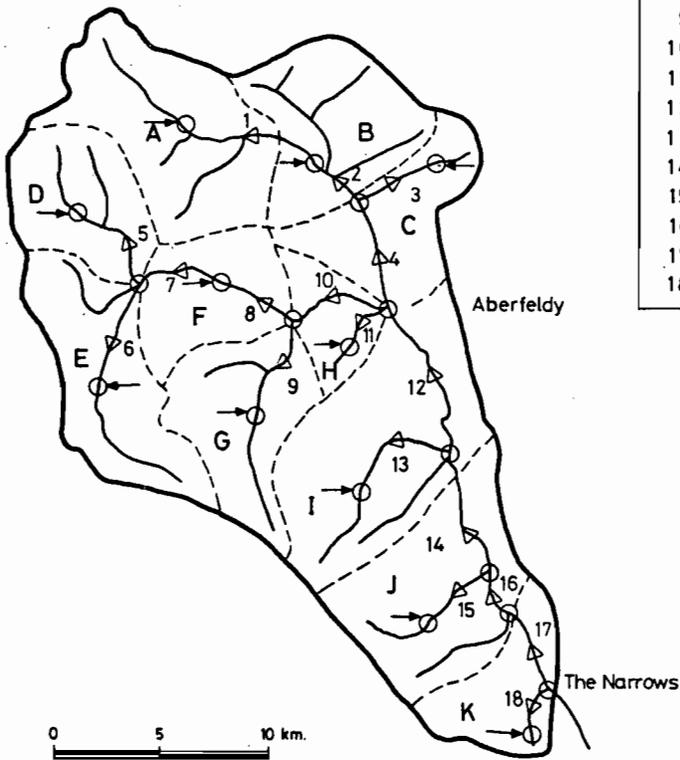


Figura 3. Cuenca del Río Thomson.

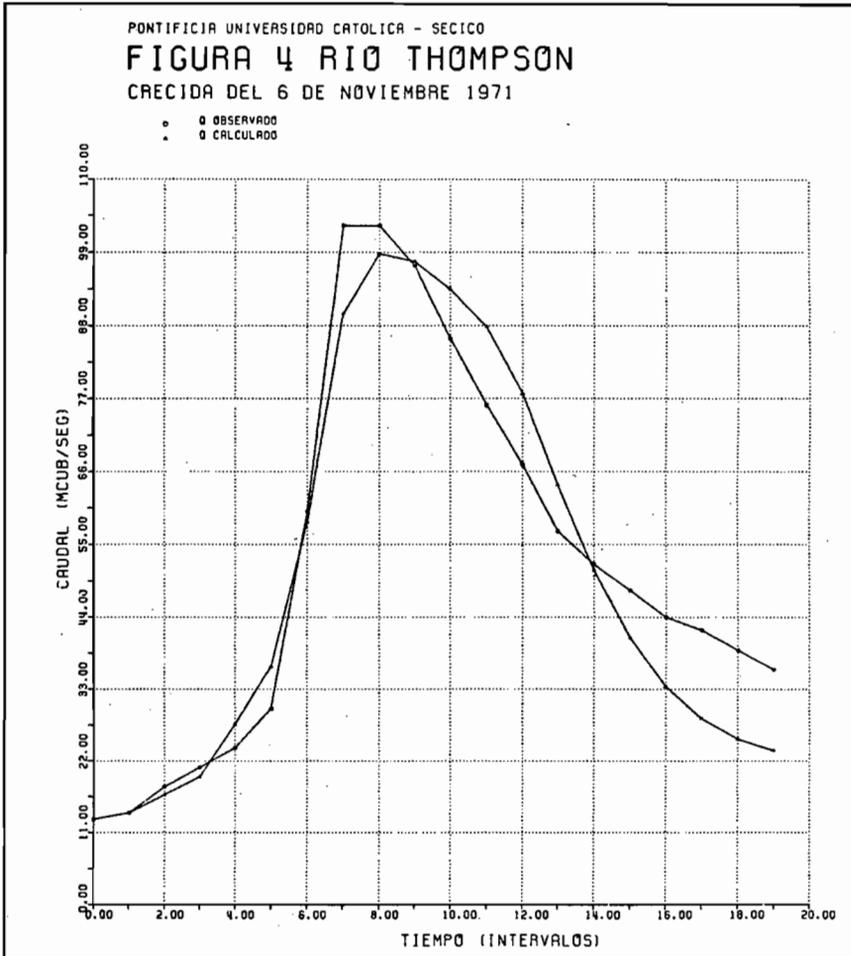


Fig. 4

una duración de 60 horas, valores idénticos a los utilizados en el ejemplo de diseño informado por Laurenson y Mein (1983).

El volumen de la crecida producida en todos los casos fue de 148 millones de metros cúbicos, ya que para eliminar el efecto del modelo de pérdidas de agua, las tormentas se supusieron efectivas.

3.1. Caso A.

En el primer caso, la lluvia total se distribuyó en forma uniforme, (siguiendo una práctica usual de diseño) y también, de acuerdo a los gráficos de distribución propuestos por Huff para tormentas de cada uno de los grupos y con probabilidades de excedencia del 10%, 50% y 90%. Se obtuvo así un conjunto de 13 tormentas diferentes.

Los resultados del caso A se resumen en la tabla 1, donde se incluyen varias características del hidrograma de salida de la cuenca. Se muestra el caudal máximo producido por cada tormenta, el tiempo de ascenso del hidrograma, el tiempo hasta el centroide de la crecida, la diferencia de tiempo entre el centro de gravedad de la tormenta y de la crecida y el desfase entre el centroide de la tormenta y el máximo de la crecida.

TABLA 1
CARACTERÍSTICAS DEL HIDROGRAMA USANDO LAS
TORMENTAS DEL CASO A.

Lluvia	QMAX	TMAX	TCM	DCM	DMAX
Uniforme	662	60	56	29	33
Grupo I					
10%	1331	24	33	28	19
50%	1062	30	41	28	17
90%	702	36	52	29	12
Grupo II					
10%	1184	36	42	28	22
50%	1055	42	49	28	21
90%	855	48	57	28	19
Grupo III					
10%	945	48	50	28	27
50%	1098	54	58	27	24
90%	1196	60	64	27	22
Grupo IV					
10%	857	60	58	28	31
50%	1105	66	66	27	28
90%	1277	66	72	26	20

QMAX Gasto máximo en mcub/seg.

TMAX Tiempo al máximo en hrs.

TCM Tiempo al centroide en hrs.

DCM Desfase entre centroides del hietograma e hidrograma (hrs.)

DMAX Desfase al máximo en hrs.

Puede apreciarse que los caudales máximos de crecida varían entre $662 \text{ m}^3/\text{s}$ y $1331 \text{ m}^3/\text{s}$, obteniéndose el menor valor bajo la suposición de una tormenta con distribución uniforme. Se observa en los valores consignados, una importante variación del caudal máximo, en función de la distribución de la tormenta en el tiempo. Ello es incluso notorio, dentro de cada uno de los grupos en que están clasificadas las tormentas. Igualmente, es apreciable y previsible la variación que presentan los parámetros que dependen propiamente del tiempo. Es interesante destacar, también la independencia presentada por la diferencia de tiempo existente entre los centroides del hietograma y de la crecida, desfase que en todos los casos es del orden de 28 horas, lo cual confirma que este factor es una propiedad de la cuenca, que sólo depende de su rapidez de respuesta y es, por lo tanto, independiente de las variaciones entre distintas tormentas.

3.2 *Caso B*

A fin de evitar que las lluvias parciales durante intervalos más cortos de tiempo puedan estar asociadas a períodos de retorno mayores que el de la tormenta completa, se generó un conjunto de 5 tormentas, utilizando los mismos valores numéricos de lluvia para cada intervalo que los ocurridos en la tormenta del grupo I con probabilidad de excedencia del 10%, siguiendo una alternativa de cálculo que recomienda el U.S. Geological Survey. En este caso, el modelo simula los escurrimientos que se detallan en la tabla 2, y aun cuando, las variaciones observadas son menores, ellas son todavía significativas. Se observa que el caudal máximo fluctúa entre $691 \text{ m}^3/\text{s}$ y $1402 \text{ m}^3/\text{s}$, rango similar al observado en el caso anterior. Las variaciones de los parámetros relacionados con las propiedades temporales de la crecida son un poco menores y nuevamente se aprecia la independencia del desfase entre los centroides de la crecida y de la tormenta. En la tabla se muestran también, los hietogramas utilizados para cada una de las lluvias.

Es preciso, sin embargo, hacer notar que en los hietogramas de las tormentas 5 y 6, se han separado los intervalos con mayor lluvia, por lo cual los intervalos mayores de 6 horas tienen intensidades medias menores que los casos anteriores. Aun así, los primeros cuatro casos entregan

4. CONCLUSIONES

Los resultados presentados indican que las características de la onda de crecida de una cuenca dependen esencialmente del hietograma de las

un caudal máximo que difiere marcadamente del obtenido con la suposición de lluvia uniforme.

TABLA 2

CARACTERÍSTICAS DE LAS CRECIDAS USANDO LAS
TORMENTAS DEL CASO B.

Tormenta	QMAX	TMAX	TCM	DCM	DMAX
1	1331	24	33	28	19
2	1392	72	74	25	22
3	1372	48	52	26	22
4	1402	48	54	26	20
5	996	48	54	27	21
6	691	30	50	28	8

HIETOGRAMAS EN INTERVALOS DE 6 HORAS. (MM)

1	135	95	22	10	2	2	1	1	1	1
2	1	1	1	1	2	2	10	22	95	135
3	1	1	2	22	135	95	10	2	1	1
4	1	1	2	10	95	135	22	2	1	1
5	1	1	2	135	10	2	95	1	22	1
6	1	135	1	2	10	2	95	1	1	22

QMAX Gasto máximo en mcub/seg.

TMAX Tiempo al máximo en hrs.

TCM Tiempo al centroide en hrs.

DCM Desfase entre centroides del hietograma y crecida en hrs.

DMAX Desfase entre centroide y máximo en hrs.

lluvias de diseño utilizadas en su cálculo. Dado que es usual que el Ingeniero sólo conozca el valor total de la lluvia de diseño y su duración y que no cuente con antecedentes para determinar su distribución en intervalos de tiempo más cortos, es imprescindible que en los procedimientos de estimación de crecidas se tomen en consideración los posibles hietogramas, realizándose un análisis de sensibilidad de los resultados.

Los valores calculados destacan la necesidad de realizar estudios similares a los hechos por Huff, a fin de contar con datos chilenos al respecto. Por ejemplo, cabe preguntarse si las distribuciones obtenidas por este investigador son generalizables o no, si ellas sufren variaciones importantes entre distintos lugares geográficos, y finalmente, si son comparables sus antecedentes a los escasos resultados preliminares que se tienen en Chile.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es parte del Proyecto de Investigación *DIUC 8/84, Modelos Matemático-Digitales para la Estimación de Crecidas en Cuencas Pequeñas*, el cual cuenta con financiamiento de la Dirección de Investigación de la Pontificia Universidad Católica de Chile.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ¹ HUFF, F A., (1967), *Time Distribution of Rainfall in Heavy Storms*, Water Resources Research, vol 3, n- 4, pp. 1007-1019.
- ² ESPÍLDORA, B. Y A. ECHAVARRÍA (1979), *Criterios para la Caracterización y Selección de Lluvias de Diseño*, IV Coloquio Nacional de Hidráulica, pp. 461-478.
- ³ LAURENSEN E.M. Y R.G. MEIN, (1983), *RORB Runoff Routing Program. User Manual*, Monash University, Department of Civil Engineering, Second ed.