

XIX CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA

CURVAS DE REDUCCIÓN AREAL DE LLUVIAS DE DISEÑO EFECTOS DE LA TOPOGRAFÍA Y EL CLIMA SOBRE SU FORMA

Carlos Gastón Catalini ¹, Gabriel Caamaño Nelli ², Carlos Marcelo García ²

^{1 y 2} Centro de la Región Semiárida del Instituto Nacional del Agua

² Consejo Nac. de Investigaciones Científicas y Técnicas - Universidad Nac. de Córdoba
Medrano 235, (5152) Villa Carlos Paz, Argentina. E-mail: cgcatalini@hotmail.com

RESUMEN

La mayoría de las obras hidráulicas se dimensiona en función del evento crítico que deberán soportar, denominado **creciente de proyecto**. Si los registros de caudal son insuficientes para deducirla, se la estima con modelos de transformación lluvia-escorrentía, alimentados con un patrón sintético local de precipitación, que se extrapola a toda la cuenca.

La extrapolación areal de la lámina, para obtener la **lluvia de diseño** entrante, implica reducir el valor dado por la relación intensidad-duración-recurrencia de una estación de referencia, ya que el máximo estimado no se producirá simultáneamente en todo el sistema.

Dicha corrección se efectúa mediante funciones del área de aporte y la duración de lluvia, deducidas de tormentas intensas. Aunque se sabe que tales funciones no tienen validez universal, es común transponerlas de zonas muy diferentes, causando errores importantes.

Este trabajo compara familias de curvas de distintos lugares, para inferir cómo afectan, a grandes rasgos, la estructura de las gráficas las características orográficas o climáticas. Evidencia que, en líneas generales, el decaimiento aumenta con la altitud y disminuye con la precipitación anual del sistema, pero estas variables son interdependientes y no alcanzan para predecir la reducción a aplicar al transponer espacialmente las curvas.

ABSTRACT

The majority of the hydraulic works dimensioned, depending on the critical event that they will have to tolerate, named **runoff of project**. If the records of wealth are insufficient to deduce it, are estimates with models of transformation rain-runoff, fed on a synthetic local patron of rainfall, which extrapolate to the whole basin.

The extrapolation in the area of the sheet, to obtain the rain for design, implies reducing the value given by the relation intensity-duration-frequency of a station of reference, since the estimated maximum will not take place simultaneously in the whole system.

The correction mentioned effected by means of functions of the area of contribution and the duration of rain, deduced of intense storms. Though it is know that such functions do not have universal validity, it is common translate of very different zones, causing important mistakes.

This work compares families of curves of different places, stops to infer how they affect, to big features, the structure of the graphs the orographical or climatic characteristics. Evidence that, in general lines, the decay increases with the altitude and

diminishes with the annual rainfall of the system, but these variables are interdependent and do not reach to predict the reduction to applying the curves to the translate spatially.

1. INTRODUCCIÓN

La mayoría de las obras hidráulicas se dimensiona en función de la magnitud del evento crítico que deberán soportar, expresado por el pico de una avenida hipotética, denominada **creciente de proyecto**.

Cuando, como es habitual, los registros históricos de descarga son insuficientes para deducir estadísticamente ese caudal, se lo estima a través de modelos de transformación lluvia-escorrentía y de tránsito, alimentados con un patrón sintético local de precipitación, extrapolado a toda la cuenca.

Esta entrada al sistema hidrológico, denominada **lluvia de diseño**, consta de tres elementos: a) la lámina local, b) su distribución temporal, según un hietograma tipo, y c) su reducción espacial, que toma en cuenta que el máximo estimado no se producirá simultáneamente en todo el sistema.

La lámina local de diseño es la que ocurriría en el punto adoptado como epicentro del fenómeno, según el análisis estadístico de lluvias máximas anuales. Puede ser un valor extraído de la relación intensidad-duración-recurrencia (**i-d-T**) o bien la Precipitación Máxima Probable (**PMP**). En ambos casos, la lámina corresponde a un **intervalo de máxima anual (IMA)** de intensidad de lluvia.

Sea al distribuir la lámina local en el tiempo o al atenuarla en el espacio, es común basarse en rasgos de tormentas históricas severas, asumiendo una equivalencia infundada entre eventos de distinta índole. En efecto, no hay razón para que los IMA coincidan en duración con tormentas reales, pudiendo cubrir una pequeña porción de ellas, englobarlas junto a un período sin lluvia o agrupar más de una, y se han comprobado marcadas diferencias en los patrones espacio-temporales respectivos [2].

No obstante, aunque sea objetable para diseño, la distribución espacial de tormentas intensas es valiosa para interpretar el fenómeno natural. Además, su uso generalizado permite comparar el comportamiento de las lluvias entre regiones.

La corrección espacial de la lámina local se efectúa mediante un **coeficiente de decaimiento areal (CDA)**, función del área de aporte y de la duración de lluvia. La transposición indiscriminada de tales relaciones, pese a saberse hace tiempo que no son universales, sigue siendo un método corriente, que conlleva errores de consideración.

El presente trabajo compara 8 familias de curvas de decaimiento areal de distintas partes del mundo, con el objeto de resaltar la invalidez de esta práctica y, sobre todo, detectar tendencias asociables a características climáticas y fisiográficas regionales.

2. FUNCIONES DE REDUCCIÓN AREAL Y SISTEMAS DE ORIGEN

En este título se describen las familias de curvas seleccionadas de la literatura especializada, en su mayoría propuestas para representar regiones más amplias, y las zonas de donde provienen.

a) Sur de la Provincia de Santa Fe: Zimmermann [11] dedujo estos ábacos en la Universidad de Rosario, para un área de llanura situada al sur de la ciudad homónima, en el centro-este de Argentina.

b) Malaysia peninsular: Las curvas fueron planteadas por la River Engineering División [8] y se utilizan para todo el país. Del norte al centro, la península malaya está dominada por cadenas montañosas, con picos de 2200-4000 m snm. Las tierras costeras que las bordean están densamente pobladas al oeste; al este son más estrechas, cubiertas por vegetación y al sur, relativamente llanas. El clima es ecuatorial, con zonas afectadas por el monzón del noreste, donde las lluvias alcanzan 5080 mm al año.

c) Este del río Mississippi: Este río de USA tiene más de 3800 km de longitud; nace en el Lago Itasca, a 512 m snm, y desemboca en el Golfo de México. Las curvas de abatimiento areal, desarrolladas para cuencas de 260 a 1100 km², localizadas en su mayoría al este del río, son las recomendadas por la Organización Meteorológica Mundial [5], que suelen tomarse como de uso general. En este caso, se partió del ajuste polinómico de Leclerc y Scaaaake a las familias de curvas publicadas [9].

d) Sierra Nevada: Cordillera del estado de California (una pequeña parte llega a Nevada, cerca del lago Tahoe), en el oeste de USA. Se extiende de noroeste a sureste por 640 km, con una anchura de 65 a 130 km. Su pico más alto alcanza 4.418 m snm. Las curvas de abatimiento fueron planteadas por Corrigan, Fenn, Kluck y Vogel [4].

e) Reino Unido: El suelo es llano en gran parte y su elevación oscila entre 100 y 1343 m snm, en el pico máximo. Las relaciones (en forma gráfica y tabulada) abarcan la mayor área considerada en este análisis (30.000 km²), sin discriminación orográfica.

f) Cuenca del río San Antonio: Este curso, ubicado al suroeste de la ciudad de Córdoba, en la República Argentina, tributa al embalse San Roque, del que nace el Suquía, uno de los mayores ríos de la provincia homónima. Las funciones obtenidas para esta cuenca [7] se basan en información de una red telemétrica de 10 *pluviómetros de alta frecuencia (PAF)* operada por el Centro de la Región Semiárida del Instituto Nacional del Agua. Corresponden a duraciones menores o iguales a 180' y mayores a 180'.

g) Central Valley: Valle central del estado de California, Estados Unidos de Norteamérica. Es una cuenca de fértiles y profundos suelos aluviales, delimitada por cadenas montañosas al este (Sierra Nevada), al norte (de las Cascadas y montes Klamath) y al oeste (cordillera Costera); al sureste se hallan los desiertos de Mohave y Colorado. Las curvas de decaimiento son similares a las dadas para la Sierra Nevada por los autores citados en el apartado correspondiente.

h) Mendoza: Fernández, Fattorelli, Rodríguez y Fornero [6] llevaron a cabo un estudio detallado de tormentas intensas, a fin de obtener la precipitación de proyecto (con su distribución espacial). El análisis se realizó al oeste de la ciudad de Mendoza, República Argentina, contando con una red de 24 PAF, dependiente del Centro Regional Andino, del Instituto Nacional del Agua. Proponen coeficientes de atenuación para tormentas convectivas, con duración de hasta 90 minutos.

La Tabla 1 provee las referencias bibliográficas de donde provienen las funciones para obtener el *coeficiente de decaimiento areal* en las zonas antedichas, los rangos de superficie, duración de lluvia e invariancia de la lámina (CDA = 1), así como mayores precisiones sobre la captura de datos, la forma de presentación publicada y las características topográficas y climáticas de los sistemas.

Tabla 1: Ficha de las curvas de decaimiento areal seleccionadas

Zona y país de origen	Referencia Bibliográfica	Área km ² (mi ²)	Información original			Orografía y altitud media (m sobre el nivel del mar)	Régimen climático y lluvia media anual	
			Duraciones	CDA=1	Observaciones			
				P				
a) Sur de Santa Fe, Argentina	Zimmermann, Ricardi, Pieroni, Arraigada, 2001	1000	30', 60', 180', 360', 1440'	Puntual	≈ 45 pluviógrafos	N E	Llanura sedimentaria de muy baja pendiente (≈ 15 m)	Templado, dominio de tormentas frontales (1100mm)
b) Peninsular, Malaysia	River Engineer. Division Malaysia, 2001	200	30', 60', 180', 360', 1440'	Rango de 0 a 10 km ²	No especifica	T G	Cadenas montañosas (promedio 750 m)	Monzónico. Mayores lluvias de noviembre a marzo (2540 mm)
c) Este del río Mississippi, USA	Valdés, 1981	1000	30', 60', 180', 360', 1440'	Puntual	6 puestos (en prom.); series de 7 a 15 años	E	Llanuras (700 m)	Sin estación seca (1100 mm)
d) Sierra Nevada, California, USA	US National Weather Service, 1998	25900 (10000)	60', 360', 720', 1440', 2880', 4320'	Rango de 0 a 26 km ²	No especifica	T G	Zona E abrupta y W desgastada (1830 a 3660 m)	Semi tropical, con estación lluviosa discontinua (165mm)
e) Reino Unido de Gran Bretaña e Irlanda del N.	Wanielista, Kersten y Eaglin, 1997	30000	5', 10', 15', 30', 60', 120', 180', 360', 1440', 2880'	Rango de 0 a 1 km ²	radios medios en torno a un máximo	T G	Llanura sedimentaria dominante; montañas bajas antiguas (700 m)	Templado. Marítimo atlántico. Lluvias en invierno (760 mm)
f) Cuenca del Río San Antonio, Córdoba, RA	Catalini, 2001; García, Catalini y Caamaño Nelli, 2000	500	d ≤ 180', d > 180'	Rango de 0 a 25 km ²	10 PAF	N E G	Sierra, pedemonte y valle, 675-2400 m de altitud (1500 m)	Templado (900 mm)
g) Valle Central (San Joaquín), California, USA	US National Weather Service, 1998	25900 (10000)	60', 360', 720', 1440', 2880', 4320'	Rango de 0 a 26 km ²	No especifica	T G	Valle de 650 km de largo (50 a 200 m)	Norte húmedo (425 mm). Sureste desértico (58 mm)
h) Mendoza (oeste de la	Fernández, Fattorelli, Rodríguez	1000	d ≤ 90'	Rango de 0 a	24 PAF	T	Precordillera	Tormentas convectivas de

ciudad), RA	y Fornero, 1999			0,9 km ²		E	(1000-3000 m)	verano (\approx 250 mm)
Referencias: P = Presentación original; N = Datos numéricos; T = Tabla de valores de la función; E = Ecuaciones; G = Gráficos								

3. METODOLOGIA

La **precipitación media areal (PMA)**, es definida como el producto entre la precipitación en el puesto base, $\hat{P}_0 = f(d, T)$, por el coeficiente de decaimiento areal, $\hat{CDA} = f'(d, A)$, siendo **d** la duración de la lluvia, **T** su recurrencia y **A** el área a la que se extrapolará la lámina local

$$PMA = \hat{P}_0 \cdot \hat{CDA} \quad (1)$$

El coeficiente de decaimiento areal puede ser obtenido a través de tablas, gráficos o ecuaciones, que lo vinculan con la duración del evento y el área de la cuenca.

Las curvas de atenuación de la lámina local anteriormente mencionadas, fueron elaboradas con diversas metodologías, para distintas duraciones y áreas de aplicación.

Para que el contraste permitiera inferir a grandes rasgos las características (de la orografía o del régimen de lluvias) que afectan la estructura de las gráficas y de qué modo lo hacen, las funciones debieron estandarizarse en cuanto a su presentación.

De algunas zonas se contó con una ecuación calibrada, sobre datos observados o familias de curvas publicadas, tal es el caso del este del Mississippi, región para la cual Leclerc y Scaaaake (Valdés, 1981) propusieron una ecuación exponencial. Adaptada para el presente trabajo en su nomenclatura, dividiendo el área por 2,59 (para emplear km² en vez de millas²) y multiplicando el resultado por 100 (para obtener porcentajes), responde a la siguiente expresión:

$$\hat{CDA} = 100 \times (1 - e^a + e^{(a-b \times A)}) \quad (2)$$

donde *a* y *b* simbolizan

$$a = -1.1 \times d^{0.25} \quad (3)$$

$$b = \frac{0.01}{2,59} \quad (4)$$

Pocas veces se partió de los datos de eventos históricos, como en la cuenca del San Antonio, donde se ajustaron dos funciones logarítmicas, para eventos de corta y larga duración [3], asumiendo precipitación homogénea en un área de 25 km² en torno a la estación base:

$$\hat{CDA} = 1 + k \cdot [\ln(A) - \ln(25)] \quad (5)$$

siendo *k* = -0,19479 para duraciones de hasta 180 minutos y *k* = -0,15616 para *d* mayor.

Zimmermann et al. [12] proponen diversos tipos de ecuación para el decaimiento areal en el sur de Santa Fe, pero la conveniencia de estandarizar las familias de curvas llevó a recalibrar el algoritmo (5) sobre los coeficientes de decaimiento, disponibles por gentileza del citado autor. El coeficiente *k* resultó, entonces, función de la duración

$$k = 0.0141 \cdot \ln(d) - 0.1221 \quad (6)$$

De Malaysia se contó con tablas de valores del coeficiente para varias duraciones. No obstante, dada la necesidad de extrapolar las curvas a un área mayor a la publicada, se procedió también a ajustar la ecuación (5), aunque suponiendo homogeneidad de precipitación en un área de 10 km². Como en el caso anterior, la elección correspondió a la mayor correlación, tras ensayar distintos tipos de funciones (exponenciales, potenciales y logarítmicas).

$$\hat{CDA} = 1 + k \cdot [\ln(A) - \ln(10)] \quad (7)$$

donde el coeficiente k adopta la siguiente expresión, en función de la duración

$$-k = 0,0787 \cdot d^{-0.4738} \quad (8)$$

Para homogeneizar la presentación referida a Mendoza, se ajustó una función que permite graficar los rangos de área dados por Fernández et al. [6]. Se asignó el valor del coeficiente de decaimiento al punto medio de cada rango. El mejor estimador de dicho conjunto de puntos fue:

$$\hat{CDA} = \frac{-10,094 \cdot \ln(A) + 101,37}{100} \quad (9)$$

Por último, para las curvas de decaimiento de Central Valley, Sierra Nevada e Inglaterra, los pares de puntos se extrajeron de tablas y gráficos dados por los autores, sin ningún tipo de ajuste.

Para el análisis, el rango de área representado se uniformó entre 0 y 600 km², extrapolando o truncando las curvas según el caso.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la Tabla 2 se presentan las porciones del valor local de precipitación que proponen, para 600 km², las funciones de variación areal descriptas.

Tabla 2: Porcentajes de la lámina local a emplear para A = 600 km ²									
Zona	Duración (min.)	30'	60'	90'	120'	180'	360'	720'	1440'
a) Sur de Santa Fe, RA		77,8	80,7	82,4	83,6	85,4	88,3	91,2	94,1
b) Peninsular, Malaysia		50,7	67,0			83,2	87,8		91,8
c) Este del Río Mississippi, USA		64,3	70,0			78,8	83,9		92,1
d) Sierra Nevada, California, USA		76,4					77,9	80,1	82,0
e) Reino Unido de G.Bretaña e Irlanda del N		57,3	67,1		76,4	80,9	85,3		90,7
f) Cuenca Río San Antonio, Córdoba, RA		38,1					50,4		
g) Central Valley, California, USA			68,9				73,5	77,0	80,1
h) Mendoza (al W de la ciudad), RA		36,8							

Las Figura 1 muestra las curvas de decaimiento. Para facilitar el análisis, sitúa a la izquierda las provenientes de zonas llanas y a la derecha las de morfología más abrupta; a cada lado, en orden descendente según la precipitación anual. Esto se hizo en la medida de lo posible, ya que algunas (principalmente las del Reino Unido) representan regiones muy amplias, con marcada variabilidad topográfica y climática. Así, no hay correspondencia de lluvia entre el par de gráficas de cada nivel.

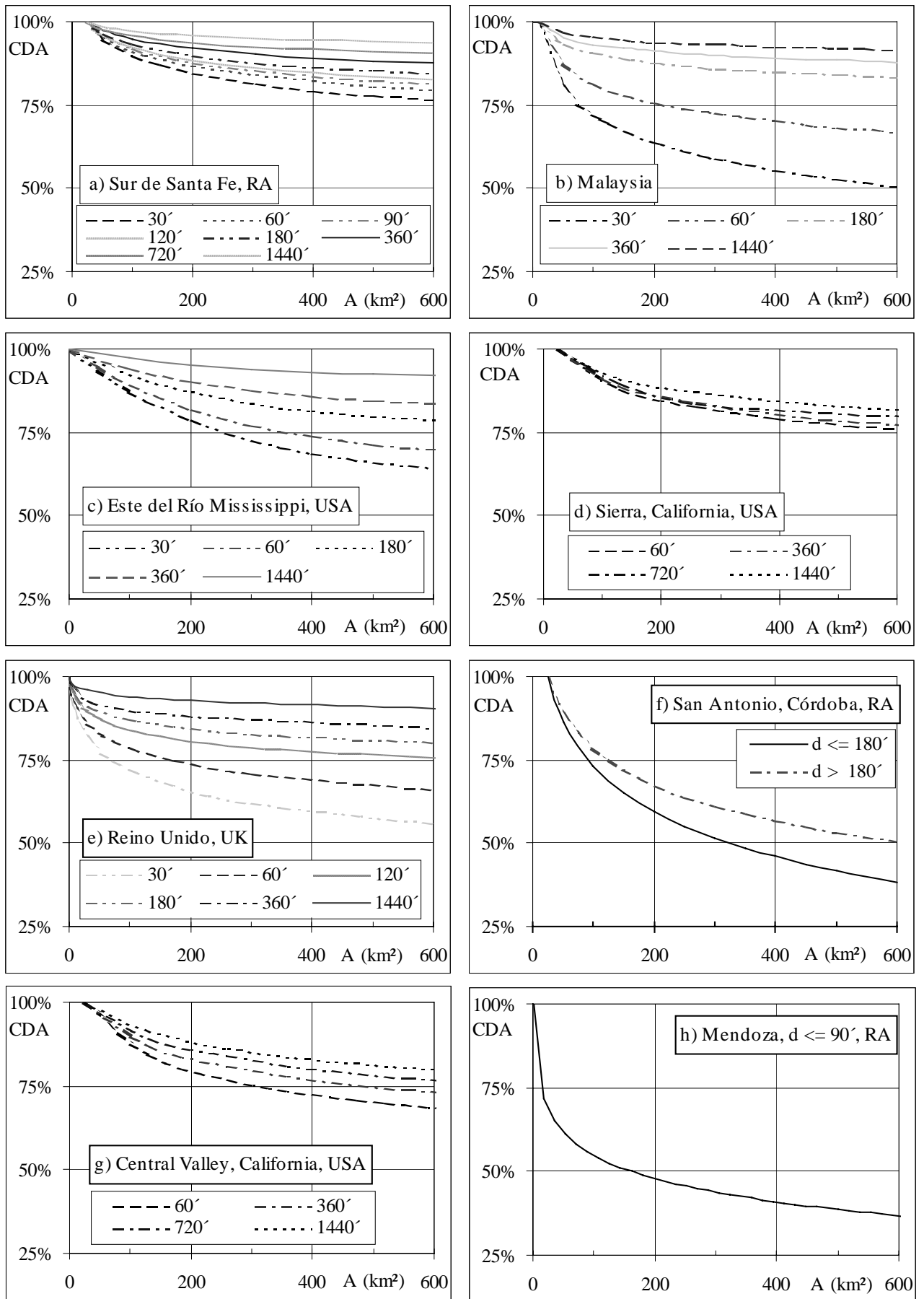


Figura 1: Curvas de decaimiento areal seleccionadas

El análisis comparativo de las familias de curvas indica que, tanto en llanura como en montaña, el decaimiento areal es proclive a ser más pronunciado a medida que la tasa anual de precipitación es menor. La gradación es más nítida para duraciones de lluvia elevadas. En este caso, la variación es más brusca en zonas montañosas y lo contrario sucede en sectores de baja pendiente.

Para regiones húmedas, es de esperar una preeminencia de procesos atmosféricos frontales, donde las tormentas abarquen grandes superficies con características homogéneas, conduciendo a coeficientes de decaimiento elevados. En otros términos, que la lámina local y la areal se asemejen numéricamente entre sí.

Por otra parte, se puede apreciar que la reducción de la lámina, a igual área de estimación, es más pronunciada en cuencas montañosas, de mayor altura. El ejemplo de Sierra Nevada es anómalo en este sentido, presuntamente porque las tormentas se concentran temporalmente, alcanzando una cobertura territorial considerable.

En ellas es previsible la influencia de eventos convectivos, territorialmente reducidos, con la consecuencia de una rápida disminución espacial de las lluvias y los CDA, lo cual genera trazas con mayor curvatura: Fuerte caída inicial y pronta estabilización al crecer la superficie considerada.

Como se evidenció en los estudios de altura areal de lluvia para diseño en la cuenca del río San Antonio ([7], [3], [1]) en estos sistemas la incidencia orográfica puede aumentar notoriamente la depresión de la lámina en torno a la estación de referencia, reforzando el efecto de los fenómenos convectivos.

Cada sistema físico presenta una amplia gama de propiedades, en lo que hace al clima como a la geomorfología, constituyendo conjuntos complejos de características que, además, interactúan entre sí. En consecuencia, cabe suponer que, aún cuando las tendencias generales de ambos orígenes siempre existan, la manera en que se combinen haga difícil predecir los resultados, basándose únicamente en los valores de altitud media y precipitación anual de unos pocos casos.

En Malaysia, por ejemplo, en duraciones mayores, los coeficientes de decaimiento areal se aproximan a los de zonas de llanura, presuntamente por una preeminencia del régimen de monzónico, con tormentas prolongadas homogéneamente distribuidas.

Para lapsos breves, en cambio, cuando la orografía puede predominar, las curvas muestran marcada concavidad al principio (para áreas reducidas) y se asemejan a las obtenidas en las Sierras de Córdoba para eventos de duración superior a 180 minutos.

5. CONCLUSIONES

1. La interacción de los complejos conjuntos de propiedades fisiográficas y climáticas de cada sistema natural es de tal magnitud que dificulta identificar sus efectos individuales sobre la atenuación espacial de la lámina de lluvia, sustentándose solamente en datos de altitud media y precipitación anual de unos pocos casos.
2. No obstante ello, el presente estudio permite detectar tendencias generales de ambos orígenes y da pie para asumir que, en la medida en que se precisen otros rasgos a tener en cuenta y se amplíe la casuística, será posible predecir los resultados de cada combinación morfoclimática sobre el decaimiento areal de las lluvias.

3. De este primer análisis surge que en la atenuación espacial influyen aspectos interdependientes del régimen de precipitaciones, como el total anual, la concentración temporal, el tipo (pluvial o nival) y la génesis de los eventos (convectiva, orográfica, frontal).
4. En líneas generales, el coeficiente de decaimiento areal disminuye marcadamente junto con la humedad, en una proporción que depende de la duración que se considere.
5. Aunque la topografía de la región, que se ha supuesto reflejada por la altitud media, incide en todos los casos, adquiere mayor relevancia en climas secos, con tormentas convectivas y orográficas territorialmente más reducidas, dando origen a mayores curvaturas de las trazas. Las diferencias se acentúan en las curvas CDA-área de menor duración.
6. El contraste de funciones decaimiento-área-duración de distintos lugares del mundo evidencia gran disparidad entre las distintas propuestas. Corresponde enfatizar, entonces, que *su carácter regional hace desaconsejable usar estas curvas en zonas con rasgos fisiográficos y/o climáticos diferentes a los de la empleada para deducirlas*, hasta tanto se establezcan relaciones funcionales firmes con tales características, que convaliden una transposición racional.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] Caamaño Nelli, G.; L.Colladon; C.Dasso, R.Pazos (2001) "*Predicción de Crecientes Severas en Villa Carlos Paz. Cuenca del Río San Antonio, Argentina*". Seminario Internac.sobre Manejo Integral de Ccas.Hidrográficas, T36 CD SIMICH. Rosario, RA
- [2] Caamaño Nelli, G.; C.M.García y C.M.Dasso (1999) "*Hietograma Puntual de Diseño: correspondencia entre la Estimación y la Distribución de la Altura de Lluvia*". XIV Congreso Chileno de Ing. Hidráulica. Memorias, Vol. Nº 1, 157-168. Santiago, Chile.
- [3] Catalini, C.G. (2001) *Altura areal de lluvia para diseño en la cuenca del río San Antonio*. Tesis de Grado de Ing. Civil, Univers. Católica de Córdoba. Córdoba, RA.
- [4] Corrigan, P.; D.Fenn; D.Kluck; J.Vogel (1998) *Probable Maximum Precipitation for California: Calculation Procedures*. US Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Weather Service. Silver Spring, MD, USA.
- [5] Chow, V. T.; D. Maidment; L. Mays (1995) *Hidrología Aplicada*. Editorial Mc Graw-Hill Interamericana S.A; ISBN 0-07-010810-2. Santafé de Bogotá, Colombia.
- [6] Fernández, P.; S. Fattorelli; S. Rodríguez; L. Fornero (1999) "*Regional Analysis of Convective Storm*" Journal of Hydr.Division. Amer.Soc.of Civil Eng., Vol 4, Nº 4. USA.
- [7] Garcia, C. M.; C. G. Catalini y G. Caamaño Nelli (2000) "*Distribución espacial de la lluvia de diseño en una cuenca de montaña*". Memorias del XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Córdoba 2000, pp 309-318. Córdoba, RA.
- [8] River Eng. Div., Dept. of Irrigation and Drainage Malaysia (2001) *Urban Stormwater for Malaysia Management Manual*. <http://agrolink.moa.my/did/river/stormwater>.
- [9] Valdés, J. B. (1981) *Distribución espacial y temporal de la precipitación*. Postgrado en Planif. e Ing. de los Recursos Hídricos. Universidad Simón Bolívar. Caracas, Venezuela.
- [10] Wanielista, M.; R. Kersten; R. Eaglin (1997) *Hydrology, Water quantity and quality control*. UK Meteorological Office. Pp 96. Ed John Wiley & Sons Inc. New York, USA.
- [11] Zimmermann, E. D. (2000) *Estimación de una función de entrada espacialmente distribuida*. Informe anual al CONICET. Rosario. Rep. Argentina.
- [12] Zimmermann, E. D.; G. Ricardi; H. Pieroni y M. Arraigada (2001) "*Curvas de Abatimiento Areal de Tormentas. Región Pampa Ondulada (Santa Fe, Argentina)*". Cuadernos del CURIHAM, Volumen 7, Nº 1, pp 24 - 37. Rosario, RA.