

**INCIDENCIA DE LA ESCALA DE LA TORMENTA EN LOS COEFICIENTES DE DECAIMIENTO AREAL DE LA LLUVIA**Flavia Marcela Bazzano<sup>1,2</sup> y Gabriel Eduardo Caamaño Nelli<sup>3</sup><sup>1</sup>Laboratorio de Construcciones Hidráulicas, FACEyT, UNT.<sup>2</sup>Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, CONICET<sup>3</sup>Ex - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, CONICET

(Manuscrito recibido el 11 de julio de 2017, en su versión final el 18 de octubre de 2017)

**RESUMEN**

La Precipitación Media Areal, necesaria para la modelación hidrológica de la cuenca de aporte, se deriva de un valor puntual atenuado mediante un Coeficiente de Decaimiento Areal (CDA). Los CDA son función de la duración de la lluvia y el área de interés, y se encuentran sujetos a las condiciones locales por lo que su extrapolación a sitios alejados debe estudiarse en cada caso.

En el presente artículo se estudia el decaimiento areal de la lluvia en el Gran San Miguel de Tucumán a partir del registro de una densa red de 18 estaciones meteorológicas. Para el análisis se seleccionan aquellas tormentas que superan la lluvia de 5 años de período de retorno, recurrencia utilizada en el diseño de desagües urbanos. Luego, se aplica la metodología CoDA (García et al, 2000) a los intervalos de tiempo de máxima intensidad de dichas tormentas, según duraciones preestablecidas. Se analiza la incidencia de la escala espacial y temporal de las tormentas en los CDA, dado que fenómenos extensos y prolongados en el tiempo presentan menor decaimiento al alejarse del núcleo de la tormenta que aquellos intensos episodios locales.

Finalmente, la calibración del modelo genera una expresión analítica de los CDA como función de la duración y área de aporte. Este resultado representa una herramienta fundamental para la estimación de la distribución espacial de la lluvia de diseño en la región.

*Palabras clave: Coeficiente de Decaimiento Areal, Escala de la tormenta, Lluvia de diseño*

**INCIDENCE OF THE STORM SCALE IN THE AREAL REDUCTION FACTORS FOR RAINFALL****ABSTRACT**

The Areal Rainfall Depth, necessary for the hydrological modelling of the basin, is derived from a punctual value attenuated by an Areal Reduction Factor (ARF). ARFs are a function of the rainfall duration and area of interest, and are subject to local aspects, so their extrapolation to remote sites should be studied in each case. In this paper, the areal decay of rainfall depth is studied in the Great San Miguel de Tucumán by the record of a dense network of 18 meteorological stations. For

this analysis, we select the storms that go beyond the maximum rainfall estimated for 5 -years return period, recurrence used in the design of urban sewage. Then, the CoDA methodology (García et al, 2000) is applied to the maximum intensity time intervals of these storms, according to pre-established durations. The incidence of the spatial and time scale of the storms in the ARFs is analysed, since extensive and prolonged phenomena present less decay when moving away from the nucleus of the storm than intense local episodes.

Finally, the calibrated model generates an analytical expression of the ARF as a function of the duration and area. This result represents a fundamental tool for estimating the spatial distribution of design rainfall in the region.

*Keywords: Areal Reduction Factor, Storm-scale, Design rainfall*

## 1. INTRODUCCIÓN

La lluvia de diseño es un evento hipotético crítico con el que se obtiene la crecida de proyecto a partir de modelos de transformación Precipitación – Escorrentía. El uso de dichos modelos surge ante la habitual escasez de series históricas de caudales para estimar la crecida de diseño en forma directa, con lo cual la determinación del supuesto evento causal adquiere fundamental importancia.

La precipitación crítica se valora estadísticamente a partir de registros pluviométricos, y se define a partir de la máxima intensidad media,  $i$ , esperable para un tiempo de retorno,  $T$ , y duración,  $d$ . Estas variables se vinculan a través de la función  $i - d - T$  de donde se extrae la lluvia futura estimada escogiendo la duración en función de las características de la cuenca y el período de retorno según la envergadura del proyecto. Para una correcta modelación se requiere analizar la variación de la intensidad de lluvia en el tiempo, definida según una distribución temporal característica expresada gráficamente por un Hietograma Tipo. A su vez, la variación espacial del evento debe ser contemplada mediante el cálculo de la Precipitación Media Areal (PMA).

El procedimiento corriente para evaluar la PMA de una recurrencia dada es afectar la precipitación puntual con un Coeficiente de Decaimiento Areal (CDA), que representa un porcentaje de la lluvia local a tomar como

promedio superficial. Esto es así porque el valor futuro estimado de carácter puntual sólo será representativo en pequeñas superficies, para mayores coberturas se reduce el monto estimado, dado que difícilmente este valor máximo se produzca en forma simultánea en todo el sistema. Las metodologías para determinar el CDA se diferencian en aquellas que consideran áreas fijas y las centradas en el núcleo de la tormenta (Hershfield, 1962). Las fijadas geográficamente pueden estar limitadas por una cuenca o poligonal y se utilizan, generalmente, para diseño de drenajes urbanos, mientras que las otras se usan para la determinación de la Precipitación Máxima Probable. Las técnicas con área fija abarcan métodos empíricos (Bell, 1976; NERC, 1975; U.S. Weather Bureau, 1958), métodos basados en la correlación espacial de la tormenta (Rodríguez Iturbe y Mejía, 1974; Sivapalan y Blöschl, 1998) o en distribuciones de probabilidad de eventos extremos (Allen y De Gaetano, 2005a; Chulsang et al., 2007), entre otros.

En vista de que la lámina precipitada decae al alejarse del núcleo de la tormenta, se espera que los CDA tomen valores decrecientes a partir de cierta área (2,5 a 25 km<sup>2</sup> según las condiciones locales), dentro de la cual puede considerarse que la precipitación es constante. Por el contrario, los CDA aumentan con la duración, puesto que tormentas más largas tienden a solaparse con otras provocando una mayor uniformidad espacial del suceso (Catalini y Caamaño Nelli, 2003). La dependencia de los CDA con la recurrencia también ha sido demostrada (Allen

y De Gaetano, 2005b; Pavlovic et al., 2016), aunque para realizar el análisis de frecuencia areal necesario se requieren largas series de registros simultáneos.

La incidencia de la escala de la tormenta en los CDA ha sido materia de estudios antecedentes (Skaugen, 1997), donde se evidencia un decaimiento más pronunciado para tormentas de menor escala. Dicho análisis involucra tanto la magnitud temporal como espacial de un episodio lluvioso, dado que ambas definen el volumen de agua arrojado sobre la cuenca. Es así como una intensa tormenta que abarca sólo unos pocos kilómetros cuadrados no tendrá la misma relevancia que una que abarque por completo la cuenca de aporte y aún más, supere el área de la misma. De forma análoga, si una tormenta sólo dura algunos minutos por alta que sea su intensidad no arroja sobre la cuenca una cantidad de agua considerable.

Es frecuente la extrapolación de curvas de abatimiento areal a sitios alejados (Omolayo, 1993), dado que su determinación demanda un laborioso proceso estadístico aplicado sobre registros de alta frecuencia simultáneos en la cuenca. En un primer momento, los resultados obtenidos al este de Estados Unidos (U.S. Bureau, 1958) se utilizaban en distintas partes del mundo sin mayor verificación. Veinte años más tarde, se publicaron resultados análogos generados en el Reino Unido (NERC, 1975). Actualmente, las mediciones indirectas con radares meteorológicos, mediciones satelitales y el uso de modelos numéricos de circulación global impulsaron el estudio del decaimiento espacial de la precipitación (Allen y De Gaetano, 2005a; Pavlovic et al., 2016). En Argentina, se destacan algunas experiencias realizadas: en la provincia de Córdoba, ubicada en la zona central del país, se desarrolló el modelo CoDA que expresa los CDA como una función continua de la duración y el área (García et al., 2000); en el Gran Mendoza, Fernández et al. (1999) estudiaron la distribución espacial de tormentas convectivas a través de una densa red de 24 pluviómetros; en la zona sur de Santa Fe se dedujeron curvas de abatimiento

espacial de la lluvia mediante la correlación espacial de valores puntuales (Zimmermann et al., 2000), mientras que en el Gran San Miguel de Tucumán dichas curvas fueron obtenidas empíricamente al ajustar a una función racional los coeficientes calculados mediante el registro de 11 pluviómetros sincronizados durante 3 años hidrológicos (Lazarte Sfer, 2005).

El presente trabajo emplea la metodología CoDA para estudiar el decaimiento areal con un período de estudio más extenso que el evaluado en el antecedente mencionado para Tucumán, abarcando dieciséis años hidrológicos comprendidos desde 2000 a 2016. Los eventos pluviales extremos de la región se caracterizan por su variada tipología, donde ocurren intensas precipitaciones de origen convectivo con alta intensidad de lluvia y escaso desarrollo espacial y episodios frontales que con menores intensidades abarcan extensas superficies. En el presente artículo se realiza una calibración diferenciada del algoritmo según la escala de los episodios lluviosos a fin de estudiar su incidencia. A partir de dicho análisis se obtienen curvas de abatimiento de carácter general a utilizarse en el diseño de obras hidráulicas en la región.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 SISTEMA EXPERIMENTAL

El sistema experimental involucra la ciudad capital de la provincia argentina de Tucumán (26°49'59"S; 65°13'00"W) y ciudades satélites, incluyendo parcialmente los departamentos de Tafí Viejo, Yerba Buena, Lules y Cruz Alta (Figura 1).

La expansión demográfica de la ciudad capital conformó este gran conglomerado urbano, que ya en el año 2010 contabilizó una población cercana a 800.000 habitantes. Producto del intenso proceso de urbanización se modificaron las condiciones hidrológicas del territorio, mediante la impermeabilización de grandes superficies por pavimentación de calles y otras obras; lo cual no sólo aumenta los caudales de escorrentía al disminuir la infiltración, si no que disminuye el

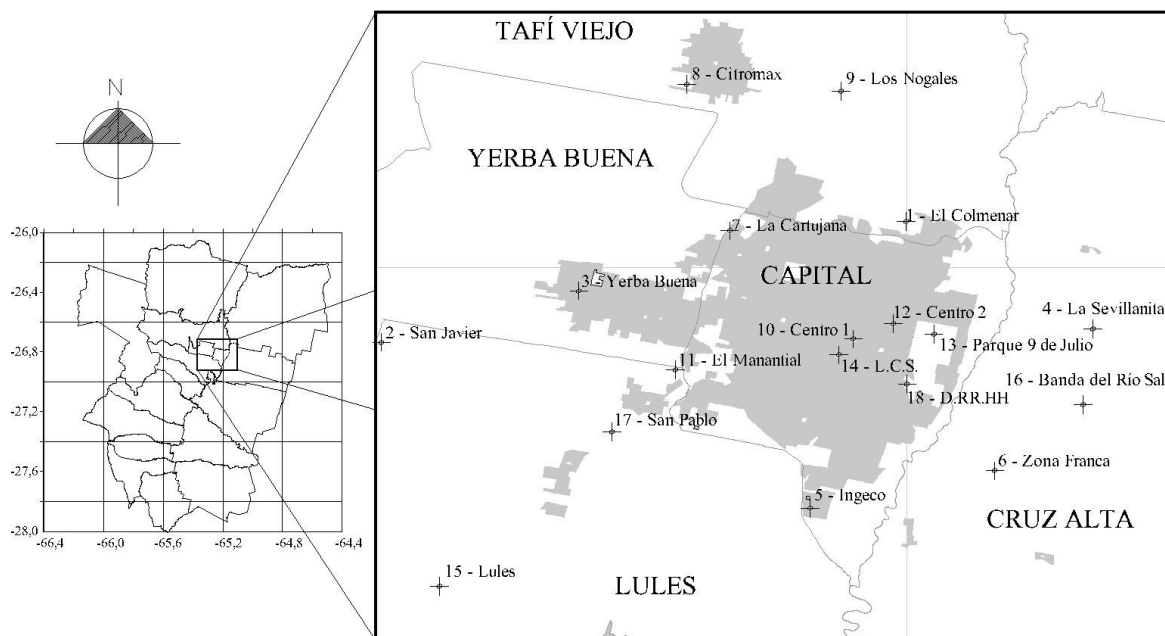


Figura 1: Localización de las estaciones de medición en la zona del Gran San Miguel de Tucumán.

tiempo de respuesta de la cuenca. El desordenado crecimiento de la ciudad no estuvo acompañado de un planeamiento de los desagües pluviales necesarios, lo que se tradujo en un aumento de las inundaciones urbanas con el consecuente deterioro de la calidad de vida que ocasionan a la población local.

El régimen de precipitación es subtropical (Prohaska, 1976), con una alta concentración estival de la precipitación, ocurriendo entre noviembre y marzo entre el 50 % y el 80 % de las lluvias anuales, seguidas de una estación invernal seca. La variabilidad espacial de la precipitación se encuentra fuertemente influenciada por el importante cordón montañoso al oeste y las sierras del norte que, aunque son de menor altura, inciden en la conformación de las intensas lluvias.

La base de datos utilizada se origina en octubre del año 2000 al disponer el Laboratorio de Construcciones Hidráulicas (LCH) de la Universidad Nacional de Tucumán (UNT) de 7 estaciones meteorológicas automáticas en la zona del Gran San Miguel de Tucumán (Figura 1). Las mismas fueron complementadas con otras operadas por el Instituto de Estudios Geográficos (IEG) y la Facultad de Agronomía y Zootecnia (FAZ) de la misma Universidad, el Laboratorio Climatológico Sudamericano (LCS), la Dirección de Recursos Hídricos de Tucumán (DRRH) y varias provistas por la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC), cuyo registro en las cercanías de la ciudad capital abarca todo el período analizado y constituye una referencia para el estudio. La ubicación de cada una de las estaciones se presenta en la Tabla I

junto con el intervalo de medición y la institución que la opera.

## 2.2 ELECCIÓN DE LOS EVENTOS

La corta longitud de las series temporales registradas y el hecho de que ciertos años presenten varios episodios lluviosos superiores al máximo encontrado en otros años derivó en la utilización de series parciales, estableciendo como umbral la lámina estimada de precipitación para un periodo de retorno de 5 años, recurrencia utilizada en el diseño de desagües urbanos. Se extraen dichos montos de la relación  $i - d - T$  local (Bazzano et al., 2015), correspondientes a las duraciones 15, 30, 60, 120, 180, 360, 720 y 1440 minutos (Tabla II), y se seleccionan del registro de cada estación aquellos episodios lluviosos que superan dicho umbral para alguna de las duraciones.

La calibración de los modelos de predicción de lluvias máximas se realiza sobre los Intervalos de Máxima intensidad Anual de lluvia (IMA) (Caamaño Nelli y García, 1999). Bajo este supuesto, la lluvia estimada a partir de dichos modelos corresponde también a un intervalo de máxima intensidad y su atenuación debe ser estudiada a partir de eventos similares, y no mediante las tormentas intensas utilizadas tradicionalmente.

Al utilizar series parciales se altera la condición de máxima anual y se consideran los Intervalos de Máxima de cada Tormenta seleccionada (IMT), según las duraciones mencionadas anteriormente. Las lluvias caídas en estos lapsos, sobre toda la superficie del sistema, constituyen los eventos bajo estudio. La mínima persistencia se justifica por tratarse de una cuenca urbana, con altas pendientes y, por lo tanto, breves tiempos de concentración. El límite superior viene dado por el tamaño de la cuenca y porque los fenómenos pluviales en la región no prevalecen, por lo general, para duraciones mayores, con lo que un intervalo más largo no aportaría información al algoritmo. La elección de la estación núcleo se realiza para cada IMT, de forma que el

decaimiento areal de la precipitación resulta siempre decreciente desde el núcleo asumido.

Se impone un mínimo de 6 registros simultáneos para que la tasa de decaimiento areal estimada sea confiable, en vista de su distribución y de las configuraciones de sus polígonos de Thiessen para incorporar un evento al estudio.

## 2.3 CLASIFICACIÓN DE LAS TORMENTAS SEGÚN SU ESCALA

Las escalas espacial y temporal de los sucesos pluviales se encuentran estrechamente relacionadas, hecho que se manifiesta con el gran desarrollo espacial de los fenómenos meteorológicos prolongados y viceversa (Markowski y Richardson, 2010). La calibración del algoritmo de atenuación sin mediar análisis de dichas escalas puede derivar en un excesivo decaimiento, al considerar cortos episodios lluviosos locales sin gran desarrollo espacial.

Los frentes fríos y la actividad prefrontal, son los mecanismos generadores de las precipitaciones de mayor volumen en el noroeste argentino (Minetti y Vargas, 2005). Los mismos se encuentran asociados a fenómenos de meso escala, abarcando longitudes horizontales mayores a 20km y duraciones superiores a 1 hora (Orlanski, 1975). Estos intensos episodios pluviales son producto de una fuerte advección de aire húmedo desde el océano Atlántico. Al llegar al interior continental, el aire cálido converge, asciende y descarga su humedad, participando la topografía como factor geográfico. Según Minetti y Vargas (2005) el proceso mencionado resulta, por una parte, de la profundización de la depresión termo-orográfica ubicada en el noroeste argentino, que aumenta el gradiente de presión atmosférica con el borde anticiclónico del océano Atlántico, y, por otra, al calentamiento continental de verano que provoca un gradiente térmico en dirección Norte - Sur (baroclinicidad). La incidencia de la temperatura local, así como de la diferencia de temperaturas con respecto al sur del país en las tormentas severas ha sido demostrada a través del siguiente índice de baroclinicidad (IB) propuesto por los

N	Estación	Latitud	Longitud	Cota (msnm)	Intervalo (Min)	Fuente
1	EAAOC	-26° 47' 16"	- 65° 11' 41"	462	30 / 15	EAAOC
2	San Javier	-26° 49' 39"	- 65° 22' 16"	1363	5	IEG.
3	Yerba Buena	-26° 48' 37"	- 65° 18' 18"	531	5	LCH
4	La Sevillanita	-26° 49' 23"	- 65° 07' 58"	482	5	LCH
5	Ingeco	-26° 53' 0"	- 65° 13' 39"	433	5	LCH
6	Zona Franca	-26° 52' 14"	- 65° 09' 56"	430	5	LCH
7	La Cartujana	-26° 47' 25"	- 65° 15' 16"	556	15	LCH
8	Citromax	-26° 44' 29"	- 65° 16' 8"	681	5	LCH
9	Los Nogales	-26° 44' 37"	- 65° 13' 2"	574	5	LCH
10	Centro 1	-26° 49' 36"	- 65° 12' 47"	436	5	LCH
11	El Manantial	-26° 50' 13"	- 65° 16' 21"	451	30	FAZ
12	Parque 9 de Julio	-26° 49' 30"	- 65° 11' 10"	471	15	I.E.G.
13	Centro 2	-26° 49' 17"	- 65° 11' 59"	460	30	LCH
14	Lab. Climatológico Sudamericano	26°49'55"S	65°13'5"W	430	30	LCS
15	Lules (La Bomba)	26°54'34"S	65°21'7"W	440	15	EAAOC
16	Banda del Río Salí	26°50'59"S	65° 8'10"W	439	30	EAAOC
17	San Pablo	26°51' 27"S	65°17' 39"W	423	60	EAAOC
18	Dirección de Recursos Hídricos	26° 50' 30"S	65°11' 46"W	426	60	DRH

Tabla I: Estaciones meteorológicas utilizadas en el área de estudio: ubicación geográfica, altitud, resolución temporal y fuente de los datos.

H (mm)	DURACIÓN (min)							
	15	30	60	120	180	360	720	1440
	31,3	43,9	58,5	74,2	83,5	98,6	111,4	120,9

Tabla II: Lámina máxima estimada (H) en San Miguel de Tucumán para un período de retorno de 5 años según la duración.

autores citados anteriormente:

$$IB = T_{min_{SMT}} + (T_{min_{SMT}} - T_{min_{CR}}) \quad (1)$$

donde  $T_{mín_{SMT}}$  y  $T_{mín_{CR}}$  corresponden a la temperatura mínima en San Miguel de Tucumán y Comodoro Rivadavia, respectivamente.

El análisis histórico de dicho índice en la capital provincial, indica un valor de 26 como mínimo

durante tormentas severas, siendo extremas las que superan 34. Se utiliza dicho índice para verificar la magnitud de las tormentas seleccionadas anteriormente. Luego, para inferir su escala se analiza su duración y cobertura espacial. Para lo último, se trazan isohietas de la precipitación acumulada en los días correspondientes a partir de la red pluviométrica provincial. Se considera el área delimitada por la isohieta de 50 mm/día como la zona receptora de una precipitación de gran volumen. La clasificación de las tormentas distingue aquellas consideradas de Gran Escala (GE), por su extensa cobertura y persistencia, de otras de Pequeña Escala (PE), evidenciadas como núcleos de precipitación aislados de corta duración.

Esta distinción entre categorías será detallada posteriormente en los resultados. La calibración del modelo se realiza para ambos tipos en forma diferenciada, a fin de estudiar su incidencia en el decaimiento areal de la lluvia.

## 2.4 DELIMITACIÓN DEL SISTEMA Y CÁLCULO DEL CDA

La red de pluviómetros de alta frecuencia sufrió modificaciones a lo largo del período de estudio: mientras algunos dejaron de funcionar se incorporaron otros que permitieron analizar eventos recientes. Asimismo, los faltantes de información durante las tormentas escogidas provocaron variaciones aún en el período de funcionamiento de algunas estaciones. En vista de que el área cubierta por la red de medición no corresponde a una cuenca de aporte específica, se traza el límite externo del sistema mediante la unión de las estaciones exteriores con una línea poligonal, que luego se extrapola en cada segmento, conservando su forma original, a una distancia igual a la máxima entre una estación exterior y la frontera del polígono propio a su estación vecina. Este criterio asume que, si la estación es representativa hacia adentro en una dada distancia, de igual forma lo será para su recíproca distancia exterior. Se elige adoptar la máxima distancia de forma de abarcar la mayor superficie razonable.

Para cada evento, se define una serie de círculos centrados en la estación núcleo, con un radio incremental de 3 km hasta abarcar por completo la línea poligonal definida anteriormente. Esta disposición permite analizar la variación espacial mediante incrementos sucesivos de área. El cálculo de la PMA se realiza, para las superficies progresivas, ponderando las mediciones mediante polígonos de Thiessen definidos según la configuración que generan las estaciones activas. En la Figura 2 se observa un esquema del sistema correspondiente a la tormenta del 25 de febrero de 2001.

Si llamamos  $P_0$  a la precipitación en la estación núcleo, el CDA para cada IMT, se calcula como

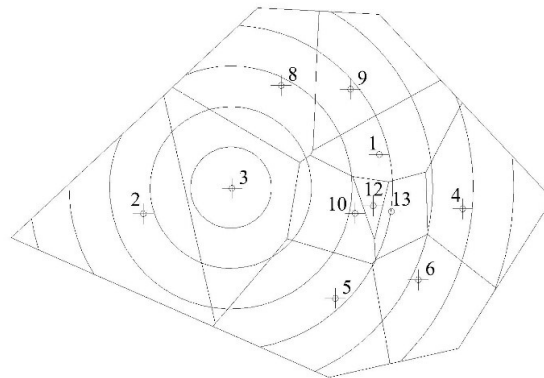


Figura 2: Esquema de análisis correspondiente a la tormenta del día 25/02/2001 según las estaciones activas.

el cociente de la ecuación (2).

$$CDA = \frac{PMA}{P_0} \quad (2)$$

Los cocientes calculados se grafican para duraciones fijas en vista de su diferente comportamiento para cada duración.

## 2.5 CALIBRACIÓN DEL MODELO CODA

Investigaciones previas sugieren que el CDA es una función del área,  $A$ . Se utiliza en el presente artículo la expresión obtenida por García et al.(2000):

$$CDA = 25^{-k} A^k \quad (3)$$

Siendo la expresión válida cuando  $A > 25 \text{ km}^2$  y  $k < 0$ . La expresión así planteada asume que la lámina de lluvia puntual estimada es representativa en áreas menores o iguales a  $25 \text{ km}^2$ , por lo que el CDA es unitario. Para mayores valores de área, este coeficiente decae en forma potencial.

Una vez obtenidas las curvas para cada duración, se condensan las funciones definiendo analíticamente la variación de  $k$  con la duración (d) según una función potencial, de la forma:

$$-k = a \times d^{-b} \quad (4)$$

donde  $a$  y  $b$  son parámetros de ajuste.

Se completa así la calibración del modelo CoDA (Catalini y Caamaño Nelli, 2003) que representa una función continua del área y la duración a partir de la cual es posible valorar el CDA, aún para duraciones no analizadas.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las tormentas que superaron el umbral impuesto resultaron 25 de las cuales 7 fueron descartadas, por no contar con un mínimo de 6 estaciones con registro simultáneo (Tabla III). Se trazaron isohietas de precipitación acumulada diaria de las 18 restantes, para evaluar su área de cobertura. Es posible apreciar que aquellas tormentas que persisten más de 10 horas abarcan siempre longitudes horizontales (LH) mayores que 70 km con excedencia de 50 mm de precipitación diaria. Dichas tormentas, fueron designadas cualitativamente como de Gran Escala y se diferenciaron de aquellas que se presentan como núcleos aislados de tormentas intensas, con duraciones que oscilan entre 3 a 8 horas, clasificadas como de Pequeña Escala. La clasificación propuesta atiende sólo a verificar la influencia del volumen de la tormenta en el decaimiento areal de la lámina de precipitación, aunque podría tener relación con su mecanismo generador, análisis que excede el presente trabajo. Se incluye en la Tabla IV el índice de baroclinicidad húmeda, donde se verifica que en todos los casos supera el valor de 26, mínimo observado en tormentas intensas.

La Figura 3 presenta la distribución espacial observada en ejemplos de cada categoría de tormenta. Por un lado, se encuentra el episodio lluvioso correspondiente al día 2 de enero de 2006, que se extiende en la zona serrana y el piedemonte del oeste y abarca gran parte de la región llana del este. La extensión de la zona con mayor precipitación se encuentra limitada hacia el oeste por la divisoria de aguas representada por las sierras del Aconquija y hacia el norte por las sierras de La Ramada y Medina, lo que denota la influencia del factor orográfico en la precipitación,

ya evidenciado en trabajos antecedentes (Minetti y Vargas, 2005). Por otro lado, el campo de isohietas correspondiente a la tormenta del día 4 de enero de 2001 representa, a diferencia de la anterior, una tormenta de escala reducida sobre la capital provincial, en coincidencia con una de mayor escala ubicada en la región suroeste de la provincia.

El ajuste de los CDA observados, diferenciados según la escala de la tormenta se hizo para duraciones de 15, 180 y 1440 minutos (Figura 4). El resultado obtenido para 15 minutos es idéntico en ambos casos indicando que para duraciones cortas el decaimiento no se altera por la escala de la tormenta. Por el contrario, la diferencia es notable para 1440 minutos. La lluvia caída se presenta más uniforme en mayores escalas de tormenta, alcanzando un valor de 0,70 para un área de 250 km<sup>2</sup> que supera al 0,54 obtenido para las tormentas de escala reducida. En el caso de los intervalos de 180 minutos se evidencia la disparidad de resultados entre ambas tipologías y el hecho de que las tormentas de gran escala presentan menor decaimiento para esta duración que las de pequeña escala con la máxima persistencia. Este resultado pone de manifiesto la importancia de estudiar la escala de las tormentas, principalmente cuando son de interés las lluvias prolongadas.

Sin embargo, modelar la reducción areal considerando solo tormentas de gran escala implica asumir la situación más desfavorable, donde el volumen de agua arrojado sobre el territorio es mayor en vista de su reducido abatimiento. El análisis ha puesto en evidencia que las intensas tormentas de pequeña escala, de breve persistencia y pronunciado decaimiento espacial, también son frecuentes en la región y se las debe incluir en la modelación. Esto es así porque considerar la situación más crítica alteraría la probabilidad de ocurrencia de la lluvia puntual que se define mediante la función  $i - d - T$ , asumiendo un determinado riesgo relacionado con los posibles daños asociados al colapso de la obra proyectada. Por lo tanto, lo que se pretende representar es la condición de



N°	FECHA	DURACIÓN (min)								Estaciones Activas
		15	30	60	120	180	360	720	1440	
1	28/11/2000	<b>40,40</b>	<b>52,40</b>	<b>60,60</b>	61,80	67,40	78,00	83,60	93,80	10
2	04/01/2001	<b>39,40</b>	<b>58,60</b>	<b>71,60</b>	<b>83,80</b>	<b>121,20</b>	<b>124,20</b>	<b>124,40</b>	<b>124,40</b>	8
3	11/02/2001	<b>39,80</b>	<b>64,00</b>	<b>114,40</b>	<b>175,80</b>	<b>198,20</b>	<b>218,20</b>	<b>238,00</b>	<b>238,40</b>	9
4	25/02/2001	<b>34,60</b>	<b>60,60</b>	<b>108,40</b>	<b>139,60</b>	<b>141,60</b>	<b>142,60</b>	<b>142,60</b>	<b>185,00</b>	11
5	04/03/2001	<b>42,20</b>	<b>72,20</b>	<b>91,60</b>	<b>101,20</b>	<b>101,80</b>	101,80	101,80	101,80	10
6	18/03/2001	<b>53,20</b>	<b>75,80</b>	<b>85,20</b>	<b>85,60</b>	<b>85,60</b>	92,80	93,80	95,60	8
7	14/04/2001	<b>48,60</b>	<b>67,60</b>	<b>87,40</b>	<b>88,20</b>	<b>88,20</b>	88,20	102,40	107,60	7
8	31/12/2004	<b>38,20</b>	<b>53,60</b>	<b>84,80</b>	<b>105,00</b>	<b>106,40</b>	<b>106,80</b>	106,80	106,80	7
9	02/01/2006	20,80	38,00	49,40	<b>76,40</b>	<b>78,80</b>	<b>97,60</b>	<b>114,60</b>	115,40	8
10	16/01/2006	23,40	<b>44,95</b>	57,40	<b>95,50</b>	<b>107,95</b>	<b>142,49</b>	<b>151,36</b>	<b>349,36</b>	6
11	05/01/2007	24,80	<b>45,40</b>	<b>77,00</b>	<b>101,00</b>	<b>118,60</b>	<b>136,40</b>	<b>138,20</b>	<b>138,20</b>	8
12	03/01/2008	<b>36,00</b>	<b>64,60</b>	<b>86,60</b>	<b>101,40</b>	<b>112,00</b>	<b>120,80</b>	<b>124,00</b>	<b>124,00</b>	8
13	18/02/2008	<b>43,80</b>	<b>62,60</b>	<b>74,60</b>	<b>85,40</b>	<b>90,80</b>	<b>102,80</b>	110,40	110,40	7
14	21/02/2008	26,40	<b>47,60</b>	<b>69,00</b>	<b>75,00</b>	75,20	75,20	75,20	75,20	8
15	11/01/2014	27,43	37,59	<b>60,19</b>	<b>81,53</b>	<b>93,98</b>	98,54	99,04	108,71	7
16	29/01/2015	29,97	<b>52,83</b>	<b>82,04</b>	<b>105,16</b>	<b>106,68</b>	<b>106,68</b>	106,68	113,00	6
17	15/02/2015	21,34	28,45	41,15	49,79	63,51	<b>99,57</b>	<b>120,63</b>	<b>143,70</b>	6
18	25/02/2015	23,64	33,17	44,20	71,60	<b>96,50</b>	<b>105,20</b>	<b>117,60</b>	119,60	6

Tabla III: Tormentas seleccionadas. Láminas de precipitación en mm por duración y número de estaciones activas. En negrita se destacan aquellas que superan el umbral impuesto para cada duración.

decaimiento típica, es decir la más probable, para afectar la recurrencia escogida lo menos posible.

Los eventos empleados para el ajuste del algoritmo son los IMT derivados de los episodios lluviosos escogidos. Se observa que al ser algunas tormentas breves no abarcan las mayores duraciones analizadas, quedando entonces los IMT conformados por una importante fracción sin lluvia. Para considerar la escala de los eventos en la modelación se utiliza para el ajuste de cada duración solo aquellos eventos donde la lluvia persiste en todo el intervalo y se descartan aquellos donde ocupa sólo una porción del mismo. De esta forma, las duraciones prolongadas se

calibran solo a partir de tormentas de gran escala, mientras que las más breves incorporan información de las tormentas de pequeña y gran escala presentes en la región.

Esta forma de proceder contempla la escala temporal de la tormenta e indirectamente la escala espacial, dado que ambas se encuentran relacionadas y se ha observado que aquellas con gran cobertura espacial presentan, a su vez, largas duraciones. Por otra parte, aquellas tormentas con intervalos de registro de 1 hora, sólo se utilizaron para los IMT de duraciones mayores o iguales a dicho lapso, por no poder inferir su distribución temporal para persistencias

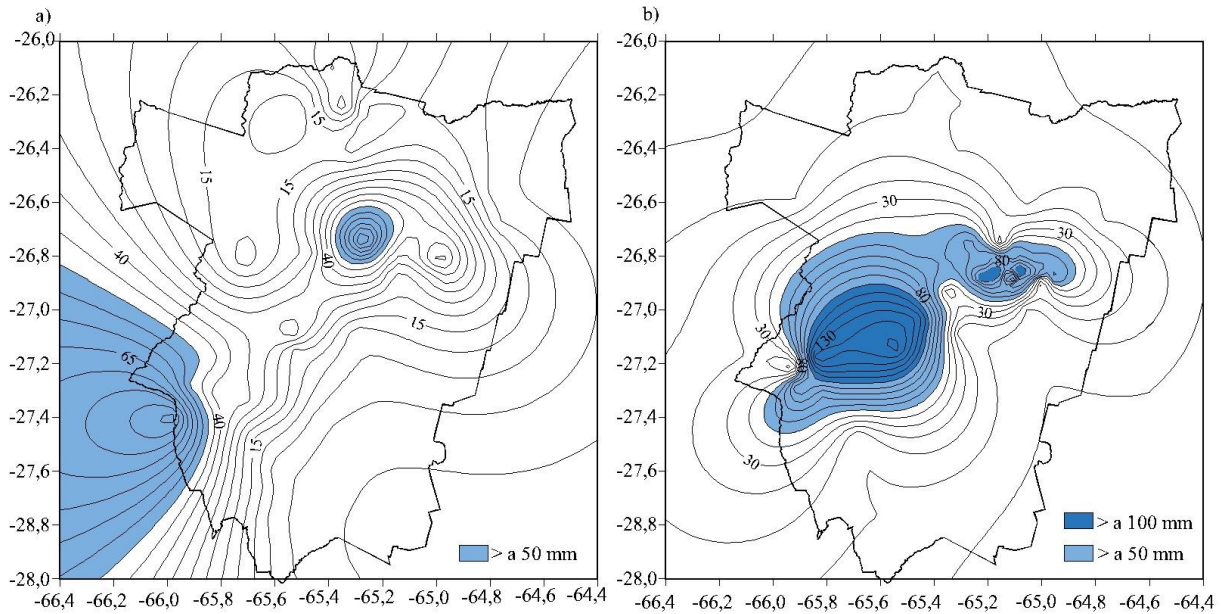


Figura 3: Isohietas diarias para los días (a) 4 de enero de 2001 y (b) 2 de enero de 2006.

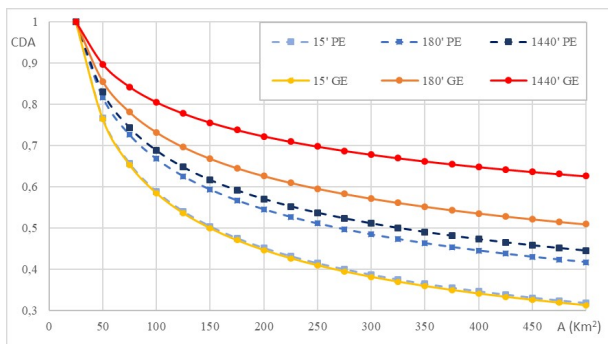


Figura 4: Curvas de los Coeficiente de Decaimiento Areal (CDA) obtenidos para tormentas de Pequeña Escala (PE) y de Gran Escala (GE) para las distintas duraciones indicadas en minutos.

duración resultó variable, con un mínimo de 8 eventos para 1440 minutos.

Al estudiar todos los eventos en forma conjunta, se evidencia la dispersión de los resultados, aún al considerar una duración fija. Se observan, en la Figura 5a, los CDA obtenidos para los eventos de 180 minutos de duración, que abarcan un amplio rango de valores, similar al observado en la Figura 5b, donde se presentan las curvas de atenuación resultantes de la calibración para cada duración de la función potencial (3). Estas curvas representan la tendencia media para cada duración separadamente, donde se aprecia que la curva para 1440 minutos es similar a la presentada anteriormente para tormentas de gran escala, resultado esperable en vista de que sólo éstas aportan información para dicha

menores. El número de eventos utilizados por

N°	FECHA DE INICIO	LONGITUD HORIZONTAL (km)	DURACIÓN (horas)	ÍNDICE DE BAROCLINICIDAD	TIPO
1	28/11/2000	123,9	21,7	29,3	GE
2	04/01/2001	26,4	7,25	27,6	PE
3	11/02/2001	144,14	14,3	39,9	GE
4	24/02/2001	6,74	6	35,5	PE
5	04/03/2001	54,5	4,6	34,3	PE
6	18/03/2001	161,0	34,17	40,4	GE
7	14/04/2001	157,3	17,25	34,3	GE
8	31/12/2004	45,1	4	35,1	PE
9	02/01/2006	145,9	14,58	33	GE
10	16/01/2006	155,6	11,42	32,7	GE
11	05/01/2007	72,6	25,42	36,8	GE
12	03/01/2008	52,6	8,42	36,6	GE
13	18/02/2008	107,0	10	33,3	GE
14	21/02/2008	23,0	4,5	26,7	PE
15	11/01/2014	63,5	29,08	33,2	GE
16	29/01/2015	18,0	3,33	28,8	PE
17	15/02/2015	74,0	21,67	32,7	GE
18	25/02/2015	159,8	42,83	35,8	GE

Tabla IV: Clasificación de las tormentas según sean de Pequeña Escala (PE) o Gran Escala (GE).

duración. La curva para 180 minutos presenta un valor intermedio entre las resultantes del análisis anterior.

Los resultados por duración fueron ajustados a una función continua de la persistencia de la lluvia y el área, que permite obtener los coeficientes para duraciones no ensayadas. Para ello se observa la variación del parámetro  $k$  según la duración del evento (Figura 6).

Finalmente, el modelo CoDA calibrado para el presente sistema experimental genera la familia de curvas presentada en la Figura 7, que responde a las expresiones (3) y (5):

$$k = -0,662d^{-0,191} \quad (5)$$

Comparando los resultados con los obtenidos en la cuenca del río San Antonio, en la provincia de Córdoba (García et. al, 2000), donde se utiliza el mismo modelo, se observa para 1440 minutos que el decaimiento es más pronunciado en la capital tucumana, siendo 0,85 el CDA obtenido en el ensayo anterior para 500 km<sup>2</sup>, superior a 0,61 obtenido en el presente trabajo. Sin embargo, para duraciones cortas los resultados

presentan mayor proximidad, alcanzando en ambos casos valores de 0,35 en igual extensión para 30 minutos. Si bien existen diferencias metodológicas en ambos estudios, se manifiesta la dependencia de los CDA a condiciones propias de la región, lo que evidencia la problemática de trasladar este tipo de algoritmos a regiones apartadas del sitio de calibración.

#### 4. CONCLUSIONES

En el presente artículo se estudia el decaimiento areal de la lluvia en la zona del Gran San Miguel de Tucumán, contemplando la escala espacial y temporal de los episodios lluviosos severos registrados en la red de medición.

Para ello, se utilizan series parciales lo que incorpora al análisis un mayor número de eventos con similar severidad que los obtenidos mediante series anuales. Esta metodología permite calibrar el algoritmo propuesto adecuadamente, en regiones donde las series de medición son demasiado cortas. El umbral fijado, asociado a una recurrencia establecida según los fines de diseño del modelo, evita el uso de un valor arbitrario como límite para considerar extremo a un evento.

Las alteraciones sufridas en la red de medición imposibilitan adoptar un área fija para evaluar la precipitación media. La metodología propuesta contempla el uso de áreas variables según los datos disponibles y abarca todo el periodo de registro mediante la elaboración de polígonos de Thiessen para cada configuración.

La densa red pluviométrica provincial posibilitó el trazado de isohietas diarias para visualizar la cobertura de las tormentas que, junto a su duración, permiten caracterizar a las tormentas según sean de pequeña o gran escala. La determinación del coeficiente de baroclinicidad húmeda resulta una verificación adicional de la magnitud de la tormenta.

Se observa que la diferencia de escala existente en los eventos pluviales tiene gran influencia en el

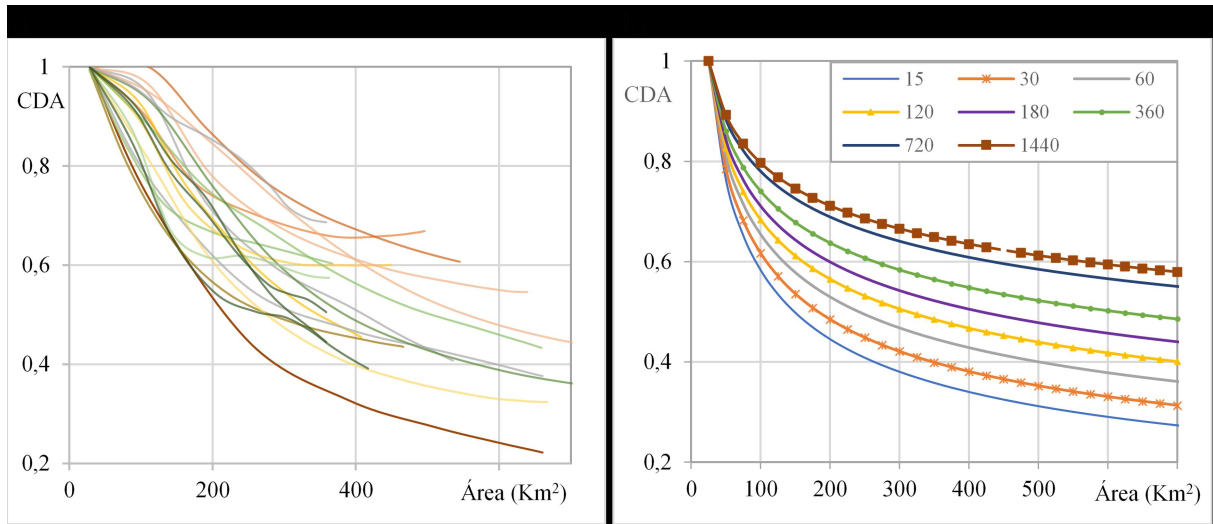


Figura 5: a) Dispersión de los Coeficientes de Decaimiento Areal(CDA) para 180 minutos b) Curvas generales de atenuación espacial para 8 duraciones de Intervalos de Máxima intensidad de la Tormenta (IMT) indicadas en minutos.

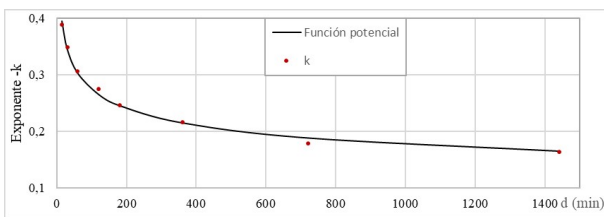


Figura 6: Exponente k del modelo CoDA en función de la duración (d).

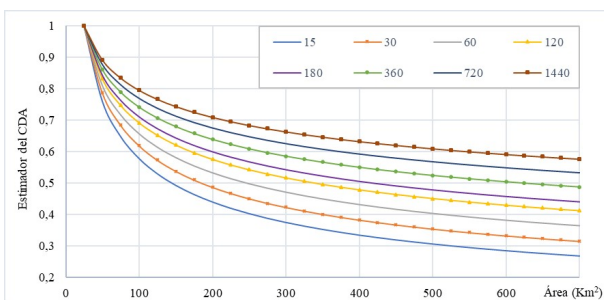


Figura 7: Gráfica de los coeficientes de atenuación areal (CDA) de lámina de precipitación del modelo CoDA para las duraciones indicadas en minutos.

volumen de lluvia que arrojan sobre el territorio analizado y en su distribución espacio temporal. El vínculo existente entre la escala espacio - temporal de las tormentas se pone de manifiesto al coincidir aquellas de larga duración con las

que abarcan grandes superficies. Las mismas se diferencian notablemente de los fenómenos locales caracterizados por su gran intensidad, aunque pequeño desarrollo espacio - temporal.

La incidencia de la escala de las tormentas en las curvas de abatimiento areal diverge según la duración estudiada, siendo despreciable para 15 minutos e incuestionable para 1440 minutos, donde se evidencia la mayor uniformidad que presentan las tormentas de gran escala.

Para considerar la incidencia de la escala de los fenómenos pluviales en el modelo, se deducen las curvas de duraciones prolongadas con los eventos (IMT) derivados de tormentas de gran escala, caracterizadas por su extensa persistencia. Para duraciones menores se involucra la totalidad de IMT disponibles, dado que al pretender representar el decaimiento típico de las lluvias intensas de la región se utilizan todos los eventos que aportan información en dichos intervalos temporales. De esta forma, se obtiene una gráfica de carácter general a utilizar en el diseño de obras hidráulicas.

Es notable que, aún para duraciones fijas, los coeficientes de decaimiento areal presentan gran

dispersión. Las curvas generadas mediante el ajuste del algoritmo representan las condiciones medias de su variación en función del área. Finalmente, la expresión obtenida de  $k$  como función continua de la persistencia de la lluvia y del área permite valorar los coeficientes para duraciones no ensayadas. La comparación con los resultados obtenidos en Córdoba sugiere que los coeficientes de decaimiento areal varían tanto por las condiciones fisiográficas como climáticas propias de la región, por lo que su traslado a otros emplazamientos debe ser considerado con mucha precaución en cada caso.

Agradecimientos: Los autores agradecen a la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombes, a la Dirección de Recursos Hídricos de la provincia de Tucumán, a las distintas dependencias de la Universidad Nacional de Tucumán y al Laboratorio Climatológico Sudamericano por los datos aportados para este trabajo.

#### REFERENCIAS

- Allen, R.J. y De Gaetano, A.T., 2005a: Considerations for the use of radar-derived precipitation estimates in determining return intervals for extreme areal precipitation amounts. *Journal of Hydrology*, 315, 203–219.
- Allen, R.J. y De Gaetano, A.T., 2005b: Areal Reduction Factors for Two Eastern United States Regions with High Rain-Gauge Density. *Journal of Hydrologic Engineering* © ASCE, 10, 4, 327–335
- Bazzano, F.M., Caamaño Nelli, G. E. y Rajmil, G., 2015: Predicción de lluvias máximas en Tucumán con el Modelo DIT. XXV Congreso Nacional del Agua. Paraná, Argentina.
- Bell, F.C., 1976: The areal reduction factors in rainfall frequency estimation. Report No. 35, Institute of Hydrology, Wallingford.
- Caamaño Nelli, G.E. y García, C.M., 1999: Relación Intensidad-Duración-Recurrencia de Lluvias Máximas: Enfoque a través del Factor de Frecuencia, Caso Lognormal. *Revista Ingeniería Hidráulica en México*, 14, 3, 37-44.
- Catalini C.G. y Caamaño Nelli, G.E., 2003: Lámina de Lluvia a Escala de Cuenca. Cáp. 9 en *Lluvias de Diseño. Conceptos Técnicas y Experiencias*. Ed. Universitas.
- Chulsang, Y., Kyoungjun, K., Hung S., K. y Moo J., 2007: Estimation of areal reduction factors using a mixed gamma distribution. *Journal of Hydrology*, 335, 271-284.
- Fernandez, P.C., Fattorelli, S., Rodriguez, S. y Fornero, L., 1999: Regional Analysis of Convective Storm. *Journal of Hydraulics Division ASCE*, 4, 4, 217-325.
- García, C.M., Catalini, C.G. y Caamaño Nelli, G.E., 2000: Distribución Espacial de la Lámina de Diseño en una Cuenca de Montaña. XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Tomo II, 309-318. AIH. Córdoba, Argentina.
- Hershfield, D.M., 1962: Extreme rainfall relationships. *Journal of Hydraulic Division ASCE*, 88, 6, 73–92.
- Lazarte Sfer, R., 2005: Factor de Reducción Areal para Lluvias de Diseño en el Gran S. M. de Tucumán. XX Congreso Nacional del Agua. Mendoza, Argentina.
- Markowski, P. y Richardson Y., 2010: *Mesoscale Meteorology in Midlatitudes*. Ed. Wiley-Blackwell.
- Minetti, J.L.; Vargas W.M., 2005: Circulación Regional en el Noroeste Argentino y Condiciones del Tiempo Asociadas. Cáp. 4 en *El Clima en el NOA*. Ed. Magna.
- Natural Environment Research Council (NERC), 1975: Flood Studies Report, 2.
- Omolayo, A.S., 1993: On the transposition of areal reduction factors for rainfall frequency estimation. *Journal of Hydrology*, 145, 1–2, 191–205.
- Orlanski, I. 1975: A rational subdivision of scales for atmospheric processes. *Bulletin of American Meteorology Society*, 56, 527-530.
- Pavlovic, S., Perica S., Laurent, M. y Mejía, A., 2016: Intercomparison of selected fixed-area areal reduction factor methods. *Journal of Hydrology*, 537, 419–430.
- Prohaska, F., 1976: The Climate of Argentina, Paraguay and Uruguay. In Schwerdtfeger, W. (ed.), *Climates of Central and South America*. World Survey of Climatology, Elsevier.

Rodríguez Iturbe, I. y Mejía, J.M., 1974: On the transformation of point rainfall to areal rainfall. *Water Resources Research*, 10, 4, 729–735.

Sivapalan, M. y Blöschl, G., 1998: Transformation of point rainfall to areal rainfall: Intensity - duration-frequency curves. *Journal of Hydrology*, 204, 1–4, 150–167.

Skaugen, T., 1997: Classification of rainfall into small- and large-scale events by statistical pattern recognition. *Journal of Hydrology*, 200, 40-57.

United States Weather Bureau, 1958: Rainfall intensity-frequency regime. Part 1- The Ohio Valley. U.S. Department of Commerce, U.S.

Weather Bureau Tech. Pap. No. 29, Engineering Division, Soil Conservation Service, U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C.  
 Zimmermann, E., Riccardi, G., Pieroni, H. y Arrigada, M., 2000: Curvas de Abatimiento Areal de Tormentas. Región Pampa Ondulada (Santa Fe, Argentina). Cuadernos del Curiham, 6.

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo la licencia Creative Commons, que permite el uso ilimitado, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada.