

CURVAS DE ABATIMIENTO AREAL DE TORMENTAS. REGION PAMPA ONDULADA (SANTA FE, ARGENTINA)

Dr. Erik Zimmermann, Dr. Gerardo Riccardi, Ing. Horacio Pieroni, Ing. Martín Arraigada

Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales. Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Universidad Nacional de Rosario. Riobamba 245 bis (2000) Rosario. Pcia Santa Fe.
Argentina
Email: erikz@fceia.unr.edu.ar

palabras claves: tormentas (storm), curvas de abatimiento areal (area-depth curve), llanuras (flatlands)

RESUMEN

En este trabajo se presentan las curvas de abatimiento areal de la precipitación construidas a partir de información pluviográfica recolectada en la región pampeana (Santa Fe, Argentina), abarcando un área de influencia de 5400 km². Las curvas fueron deducidas combinando 63 eventos de gran magnitud registrados en un conjunto de siete estaciones pluviográficas y fueron clasificadas por duraciones (0,5 hs, 1 h, 3 hs, 6 hs, 12 hs y 24 hs). El algoritmo utilizado para la elaboración de los mapas de isoyetas, de características inéditas (Zimmermann y Silber 2001) respeta la estructura de correlación espacial observada en la región, presentando errores de interpolación inferiores al 10% en todos los casos analizados. Se ajustaron expresiones analíticas a las curvas de abatimiento areal mediante correlación múltiple no lineal, generando una herramienta que permite la distribución areal de focos de tormentas locales para eventos severos. Las curvas fueron comparadas con las publicadas por la World Meteorological Organisation y presentaron una marcada semejanza.

ABSTRACT

In this work, curves areal-depth of precipitation, which they were constructed with rainfall information of the flatland region (Santa Fe, Argentina), are presented. The area of influence was 5400 km². The curves were deduced combining 63 events of great magnitude registered over seven gauge stations and they were classified by durations (0,5 hs, 1 h, 3 hs, 6 hs, 12 hs and 24 hs). The algorithm used for the rainfall countour maps elaboration, of characteristic unpublished (Zimmermann and Silber 2001), it respects the spatial correlation structure observed in the region, and it presents interpolation errors less than 10% in all the analyzed cases. Analytic expressions were adjusted to the areal-depth curves by means of multiple no linear correlations, generating in this way a useful tool that allows the storm areal distribution for severe events. The curves were compared with those published by the World Meteorological Organisation and they presented a pronounced likeness.

INTRODUCCIÓN

En la generalidad de los casos, la tormenta de diseño se estima a partir de información pluviográfica registrada en una única estación de medición. La variabilidad espacial de los patrones de tormentas es generalmente grande, por ende, esta información puntual tiene una validez limitada, desde un punto de vista geográfico. El alcance de la metodología mencionada, entonces, se limita a cuencas de pequeño tamaño.

Cuando el área de aplicación es considerable, para lograr que esa serie puntual sea representativa en el

área de trabajo se emplean frecuentemente las curvas de abatimiento areal de la precipitación.

Estas curvas representan la lámina de precipitación promedio sobre un área como un porcentaje de los valores de precipitación puntual correspondientes al "foco" de la tormenta.

En el trazado convencional, las relaciones lámina – área para diferentes duraciones, se deducen de un análisis de precipitación-área-duración, en el cual se preparan mapas de isoyetas para cada duración utilizando tabulación de **lluvias máximas** de n horas registradas en un área densamente instrumentada.

La precipitación media para cada área de integración puede ser expresada matemáticamente de la

siguiente manera:

$$P_m = \frac{1}{A} \int_A f(x) dx \quad (1)$$

donde $f(x)$ es la función que describe la acumulación de precipitación en el punto de vector de coordenadas x . La integración precedente se realiza en el área contenida dentro de cada una de las isoyetas, estimando así el valor de precipitación media areal del evento lluvioso.

Finalmente se grafica la relación entre la altura máxima de precipitación (asociada al foco) y la precipitación promedio, versus el área, para cada duración analizada.

Para la construcción de las curvas de abatimiento, preservando el sesgo estadístico que las caracterizan, es necesario disponer de un conjunto de estaciones pluviográficas, dispuestas de manera tal que sean espacialmente representativas de la región de estudio, y que además, cuenten con una serie temporalmente extensa de información. Esto permitiría realizar la selección de los eventos críticos en el conjunto de las estaciones pluviográficas y analizar su decaimiento areal, siempre que la cantidad de estaciones permita una cobertura areal suficiente.

Esto es demasiado exigente para las redes de medición instaladas en nuestra región por lo que, en principio, sólo puede analizarse el abatimiento areal para un conjunto de tormentas para las cuales existe un registro simultáneo en algunas estaciones pluviográficas.

Si bien las curvas publicadas en la bibliografía (Zawadzki, 1973; WMO, 1983; Chow *et al*, 1994) conservan este sentido estadístico, dado que los registros sobre las que se basan representan eventos históricos extremos, la metodología será aplicada en el análisis del fenómeno para cualquier tormenta en general, siempre y cuando la estación de referencia constituya el foco de la tormenta.

ALGORITMO DE INTERPOLACIÓN EMPLEADO.

Para la construcción de los mapas de isoyetas se utilizó una metodología con base estadística que emplea la estructura de la correlación espacial de los registros regionales observados (Zimmermann y Silber, 2001).

El procedimiento caracteriza a la precipitación como un campo aleatorio multidimensional función de las coordenadas espaciales x y del tiempo t (Le Cam, 1961; Yaglom, 1962; Bras y Rodríguez Iturbe,

1976), bajo las siguientes hipótesis: (a) el proceso es estacionario y (b) la función de correlación del proceso es separable en términos de su estructura espacial y temporal.

Mientras que la estructura de correlación temporal puede ser aproximada por un esquema del tipo markoviano (Valdés, 1981), la estructura de la correlación espacial es representada mediante una función exponencial del tipo:

$$\rho(d) = \exp(-k.d) \quad (2)$$

donde ρ es el coeficiente de correlación, d es la distancia entre dos puntos y k un coeficiente de decaimiento.

Entre dos puntos cualesquiera pertenecientes a una cuenca o, en general, a cualquier región, la correlación será una función de la distancia entre dichos puntos. Por lo tanto, si se tiene un punto cualquiera situado en un origen de coordenadas 0, en el cual se mide una precipitación $P(0)$, la recta de regresión que vincula la precipitación en 0 y en un punto arbitrario ubicada a una distancia d del origen esta dada por (Zimmermann y Silber, 2001):

$$P(d) = P(0) \left\{ \rho(d) + \frac{\mu(0)}{P(0)} [1 - \rho(d)] \pm m \frac{\sigma(0)}{P(0)} \sqrt{1 - \rho^2(d)} \right\} = P(0) \cdot \lambda \quad (3)$$

donde $\mu(0)$ y $\sigma(0)$ representan la media y el desvío estándar de los registros de precipitación, los cuales son considerados como población homogénea en la región, y $m=1,2,\dots$ el factor del "ancho de la banda" que se traza a ambos lados de la recta de regresión. Si se considera que en punto 0 está el "foco", la dispersión será circular, siendo la relación entre la precipitación en 0 y en d el coeficiente λ , una función de la bondad de la correlación entre 0 y d y de las medias y desvíos estándar poblacionales de las láminas regionales.

Suponiendo una red regular, compuesta por N estaciones de medición, bajo un campo de precipitaciones, es razonable suponer que todos los puntos en los cuales se mide son focales, y que la precipitación, en cualquier punto no focal de la zona -es decir, todos los puntos en los que no se mide- está influida por la variable medida en todos los puntos focales. Más aún, que la influencia ésta es aditiva, y que disminuye al aumentar la distancia, en común acuerdo con la ecuación (2).

La representación de la precipitación en un punto genérico x resulta:

$$P_x = \sum_{i=1}^N \beta_{x,i} P_i \quad (4)$$

donde el subíndice i representa una estación de medición. La ecuación (4) representa, por otra parte, el algoritmo general para estimar la precipitación areal. Los factores $\beta_{x,i}$ pueden definirse como:

$$\beta_{x,i} = \beta_{x,i}(\lambda) \quad (5)$$

En este caso, además de estar en juego la distancia, pesan otros factores regionales como la media y el desvío estándar poblacional puntual que definen el campo de las precipitaciones, tal como queda expresado en la ecuación (3).

De esta manera, en cada punto x de la cuenca puede definirse un vector β de orden N que contiene los coeficientes de peso, cumpliéndose además, que $\sum \beta_{x,i} = 1$. Si se considera que las mediciones conforman un vector \mathbf{P} , de orden N , puede ahora definirse al campo paramétrico sobre todos los puntos de la cuenca, como el producto escalar:

$$P_x = \mathbf{P} * \beta \quad (6)$$

De las funciones de peso $\beta_{x,i}(\lambda)$ propuestas, una potencia de orden 5 para λ , presentó el menor error de estimación en las estaciones de medición, siendo éste del mismo orden al cometido en la medición pluviométrica (error cuadrático medio relativo del 9,9%). La expresión propuesta para los coeficientes de peso fue la siguiente (Zimmermann y Silber, 2001):

$$\beta_{x,i} = \frac{\lambda^5(\rho(x,i), \mu, \sigma)}{\sum_{j=1}^N \lambda^5(\rho(x,j), \mu, \sigma)} \quad (7)$$

Los mapas de isoyetas generados mediante esta función propuesta son semejantes a los generados con un algoritmo de interpolación determinístico basado en la mínima curvatura, el cual concuerda aproximadamente con el realizado a mano alzada.

Además, desglosando una red básica de estaciones para la construcción del campo de precipitación de otra red utilizada para validación, este algoritmo presentó el menor error (8 %) frente al resto de los algoritmos testeados, constituyéndose así en el algoritmo más robusto.

ESTRUCTURA DE LA CORRELACION ESPACIAL EN LA REGION DE ESTUDIO

El modelo de interpolación propuesto, representado por la ecuación (2), involucra la estructura de la correlación espacial obtenida de los registros históricos de cada estación de referencia. Es decir que, contempla la correlación entre las mediciones puntuales a lo largo del tiempo y en función de la distancia que media entre las estaciones.

La metodología para el análisis de los coeficientes de decaimiento k (ec. 2) consiste en la construcción de *correlogramas*, es decir, gráficas de coeficientes de correlación medidos sobre las series de tormentas históricas en función de la distancia entre las estaciones de medición.

Los correlogramas fueron construidos en la región de estudio (Fig. 1) para diferentes duraciones de las tormentas recopiladas, sobre la base de información pluviométrica y pluviográfica (Zimmermann 1999). Con el primer tipo de información se construyeron los correlogramas para tormentas diarias. Con la información pluviográfica se construyeron correlogramas para duraciones de 6, 12 y 24 horas.

La Tabla 1 presenta las estaciones contempladas (Fig. 2), los coeficientes de correlación obtenidos y el número de tormentas consideradas (5848 tormentas recopiladas) para las correlaciones pluviométricas. También se incluyen valores de ρ estimados a partir de ecuaciones exponencial y exponencial cuadrática ajustadas a los datos, esta última considerada para analizar otra ecuación adicional.

Las ecuación de ajuste para el modelo exponencial fue:

$$\rho(d) = \exp(-0,0131.d) \quad (8)$$

Las Tablas 2, 3 y 4 proporcionan la información de las estaciones pluviográfica consideradas (Fig. 3), los coeficientes de correlación obtenidos y los valores de ρ estimados a partir de ecuaciones exponencial y exponencial cuadrática ajustadas a los datos.

Los coeficientes regionales ajustados para las las duraciones analizadas se sintetizan en la Tabla 5. El criterio de ajuste consistió en minimizar la suma de las diferencias cuadráticas entre coeficientes de correlación observados y estimados mediante las expresiones exponenciales.

Puede observarse que los coeficientes de decaimiento del modelo exponencial se aproximan al obtenido para los datos pluviométricos a medida que las duraciones consideradas se acercan a las 24 hs, existiendo una coherencia en la información procesada. Los coeficientes de decaimiento disminuyen con las duraciones mayores, hecho que

también presenta una coherencia con un menor decaimiento de las curvas $\rho(d)$. El modelo exponencial ajusta con menores errores los coeficientes de correlación observados que el modelo exponencial cuadrático en todos los casos. Los coeficientes de abatimiento obtenidos son

similares a los publicados por Eagleson en Australia. También puede señalarse que los órdenes de magnitud del coeficiente para otras regiones son semejantes, notando que los decaimientos para regiones menos llanas como Venezuela y USA (Vermont) son mayores.

Tabla 1. Resultados de los correlogramas con datos pluviométricos .

Estación 1	Estación 2	Distancia Km	Coefficiente de correlación	N° Tormentas Consideradas	Pronóstico Modelo Exponencial	Pronóstico Modelo Expon. Cuadrático
Pavón Arriba	Maizales	12.9	0.802	50	0.844	0.958
Mxmo. Paz	Maizales	13.5	0.754	50	0.837	0.954
S.Teresa	Pavón Arriba	14.8	0.797	55	0.824	0.945
Bigand	Bombal	15.5	0.907	46	0.816	0.940
S.Teresa	Sgto.Cabral	15.5	0.577	32	0.816	0.940
S.Teresa	Mxmo. Paz	16.0	0.694	46	0.811	0.936
S.Teresa	Maizales	17.4	0.594	50	0.796	0.925
Alcorta	Mxmo. Paz	17.4	0.879	59	0.796	0.925
Alcorta	Bigand	19.4	0.803	49	0.776	0.908
Alcorta	Bombal	20.6	0.907	46	0.763	0.896
Pavón Arriba	Sgto.Cabral	21.9	0.684	31	0.750	0.883
Maizales	Bigand	21.9	0.819	49	0.750	0.883
Pavón Arriba	Mxmo. Paz	22.6	0.684	47	0.744	0.877
Mxmo. Paz	Bigand	24.5	0.820	47	0.725	0.856
Alcorta	Maizales	26.5	0.744	52	0.707	0.835
Sgto.Cabral	Empalme Villa	29.7	0.620	32	0.677	0.796
Sgto.Cabral	Maizales	31.0	0.639	27	0.666	0.781
Mxmo. Paz	Sgto.Cabral	31.6	0.522	31	0.661	0.772
Bombal	Chovet	31.6	0.315	912	0.661	0.772
S.Teresa	Alcorta	33.6	0.623	50	0.644	0.747
Mxmo. Paz	Bombal	34.2	0.799	46	0.639	0.739
Pavón Arriba	Bigand	34.8	0.666	44	0.633	0.731
Maizales	Bombal	36.1	0.738	49	0.623	0.714
S.Teresa	Bigand	37.4	0.543	43	0.612	0.697
Alcorta	Pavón Arriba	38.7	0.669	47	0.602	0.679
Pavón Arriba	Empalme Villa	41.9	0.568	59	0.577	0.635
S.Teresa	Empalme Villa	43.2	0.414	386	0.567	0.617
Alcorta	Chovet	45.8	0.481	60	0.548	0.582
Bigand	Chovet	47.1	0.528	47	0.539	0.564
Alcorta	Sgto.Cabral	48.4	0.531	28	0.530	0.546
Pavón Arriba	Bombal	49.7	0.650	43	0.521	0.529
S.Teresa	Bombal	49.7	0.458	853	0.521	0.528
Sgto.Cabral	Bigand	51.6	0.418	26	0.508	0.502
Maizales	Empalme Villa	55.5	0.488	58	0.483	0.451
Mxmo. Paz	Empalme Villa	60.0	0.546	54	0.455	0.394
Mxmo. Paz	Chovet	61.9	0.502	55	0.444	0.371
Sgto.Cabral	Bombal	64.5	0.334	26	0.429	0.341
Maizales	Chovet	66.5	0.454	50	0.418	0.320
Alcorta	Empalme Villa	76.8	0.409	58	0.365	0.218
Bigand	Empalme Villa	76.8	0.350	51	0.365	0.218
S.Teresa	Chovet	78.7	0.415	1093	0.356	0.202
Pavón Arriba	Chovet	80.6	0.414	52	0.347	0.186
Empalme Villa	Bombal	91.0	0.376	377	0.303	0.118
Sgto.Cabral	Chovet	93.5	0.409	34	0.293	0.104
Empalme Villa	Chovet	121.3	0.312	448	0.204	0.022

Tabla 2. Resultados de los correlogramas para tormentas de **6 horas de duración.**

Estación 1	Estación 2	Distancia Km	Coefficiente de correlación observado	Pronóstico Modelo Exponencial	Pronóstico Modelo exp. Cuadrático
Rosario	Ibarlucea	6.5	0.741	0.837	0.964
Rosario	Pérez	9.1	0.646	0.780	0.930
Pérez	Ibarlucea	15.6	0.566	0.653	0.808
Rosario	Zavalla	15.6	0.474	0.653	0.808
Zavalla	Fuentes	26.0	0.695	0.491	0.552
Oliveros	Ibarlucea	29.3	0.840	0.449	0.470
Fuentes	Sapucay	34.5	0.045	0.389	0.351
Rosario	Oliveros	39.0	0.068	0.344	0.263
Rosario	Fuentes	42.3	0.204	0.315	0.208
Oliveros	Pérez	44.9	0.410	0.293	0.170
Zavalla	Sapucay	56.6	0.169	0.213	0.060
Fuentes	Oliveros	70.9	0.572	0.144	0.012
Rosario	Sapucay	72.2	0.226	0.139	0.010

Tabla 3. Resultados de los correlogramas para tormentas de **12 horas de duración.**

Estación 1	Estación 2	Distancia Km	Coefficiente de correlación observado	Pronóstico Modelo Exponencial	Pronóstico Modelo exp. Cuadrático
Rosario	Ibarlucea	6.5	0.741	0.850	0.974
Rosario	Pérez	9.1	0.834	0.796	0.949
Pérez	Ibarlucea	15.6	0.581	0.677	0.858
Rosario	Zavalla	15.6	0.404	0.677	0.858
Zavalla	Fuentes	26.0	0.856	0.522	0.653
Oliveros	Ibarlucea	29.3	0.106	0.480	0.583
Fuentes	Sapucay	34.5	0.326	0.422	0.473
Rosario	Oliveros	39.0	0.633	0.377	0.384
Rosario	Fuentes	42.3	0.156	0.347	0.324
Oliveros	Pérez	44.9	0.280	0.325	0.281
Zavalla	Sapucay	56.6	0.670	0.242	0.133
Fuentes	Oliveros	70.9	0.248	0.169	0.042
Rosario	Sapucay	72.2	0.460	0.164	0.038

Tabla 4. Resultados de los correlogramas para tormentas de **24 horas de duración.**

Estación 1	Estación 2	Distancia Km	Coefficiente de correlación observado	Pronóstico Modelo Exponencial	Pronóstico Modelo exp. Cuadrático
Rosario	Ibarlucea	6.5	0.795	0.892	0.983
Rosario	Pérez	9.1	0.855	0.852	0.967
Pérez	Ibarlucea	15.6	0.797	0.759	0.906
Rosario	Zavalla	15.6	0.458	0.759	0.906
Zavalla	Fuentes	26.0	0.908	0.632	0.760
Oliveros	Ibarlucea	29.3	0.451	0.596	0.706
Fuentes	Sapucay	34.5	0.562	0.544	0.617
Rosario	Oliveros	39.0	0.284	0.502	0.539
Rosario	Fuentes	42.3	0.300	0.474	0.484
Oliveros	Pérez	44.9	0.330	0.452	0.441
Zavalla	Sapucay	56.6	0.725	0.368	0.272
Fuentes	Oliveros	70.9	0.302	0.286	0.130
Rosario	Sapucay	72.2	0.466	0.279	0.120

Tabla 5. Coeficientes ajustados y errores de las expresiones exponencial y exponencial cuadrática.

	Coeficiente modelo exponencial	Suma de Residuos cuadráticos	Coeficiente modelo exponencial cuadrático	Suma de Residuos cuadráticos
Duración 6 hs.	0.0275 km ⁻¹	0.674	0.000878 km ⁻²	1.016
Duración 12 hs.	0.0211 km ⁻¹	0.738	0.000629 km ⁻²	1.238
Duración 24 hs.	0.0168 km ⁻¹	0.454	0.000406 km ⁻²	0.816
Datos pluviométricos regionales	0.0131 km⁻¹	0.493	0.000260 km ⁻²	1.393
Datos pluviométricos varios				
Eagleson (Australia)	0.0228 km⁻¹			
Stol (Holanda)	0.0010 km⁻¹			
Hendrick y Comer (USA)	0.0844 km⁻¹			
Rodríguez y Mejía (Venezuela)	0.0900 km⁻¹			

INFORMACION DISPONIBLE PARA EL ESTUDIO

El análisis de los patrones espaciales de las tormentas se basó, entonces, en un análisis puntual de un conjunto de estaciones pluviográficas para las cuales se recopiló información de eventos registrados simultáneamente.

Para llevar a cabo el estudio sobre los patrones espaciales de la precipitación se recopiló información de diversas instituciones públicas y privadas, entre las que se pueden citar el Servicio Meteorológico Nacional, Municipalidad de Rosario, Comunas y localidades de la provincia

de Santa Fe, líneas del Ferrocarril, Cooperativas agrícolas, productores, Dirección Provincial de Obras Hidráulicas, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (Oliveros), Facultad de Ciencias Agrarias (UNR). Se contó con información en el Departamento de Hidráulica de la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura (UNR), relevada en anteriores trabajos de asistencia al medio.

En **Tabla 6** se presentan los periodos para los cuales se dispone de información pluviográfica. La información recopilada de la estación Rosario Aero (Aeropuerto de Fisherton) abarcó la mayor extensión y constituyó la referencia para todo el estudio.

Tabla 6. Información pluviográfica disponible.

	AÑOS																				
	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98
Sapucay		■	■	■	■	■	■	■													
R.Aero	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Zavalla	■	■	■	■	■	■	■														
Fuentes	■	■	■	■	■	■	■	■						■	■	■	■				
Oliveros														■	■	■	■	■	■		
Ibarlucea																	■	■	■		
DNC																	■	■	■		

Se depuraron las tormentas diarias que presentaron (a) registros inconsistentes, (b) registros pluviográficos simultáneos en menos de tres estaciones, (c) registros promedios areales inferiores a los 30 mm. Esto fue adoptado para eliminar tormentas de frente, típicas de los períodos invernales y considerar las tormentas de mayor magnitud.

La aplicación de estas restricciones al conjunto de datos resultó en una muestra de sesenta y tres (63) tormentas seleccionadas

Para cada tormenta seleccionada se acumularon las alturas de lluvia para diferentes duraciones

sobre las cuales se analizaron, posteriormente, sus distribuciones espaciales. Las duraciones seleccionadas fueron **30', 1, 3, 6, 12 y 24 hs.**

CONSTRUCCION DE LAS CURVAS DE ABATIMIENTO

El área de análisis abarcó la zona geográfica limitada por las estaciones extremas (Sapucay y Oliveros), según se muestra en la Figura 1. La superficie total del "rectángulo" abarca unos 52 km de ancho por unos 104 km de alto, es decir algo más de 5400 km².

Los mapas de isoyetas se construyeron aplicando el algoritmo de interpolación precedentemente descrito. Fue utilizado y adaptado un programa computacional desarrollado por Silber (1985) cuyo objetivo primario era la graficación de campos paramétricos continuos por medio de isolíneas. El programa se apoya sobre un *mapa base* el cual representa al área de estudio. El mapa base consiste en una matriz bidimensional donde cada elemento constituye un punto de coordenadas geográficas establecidas. Las estaciones de medición tienen coordenadas asignadas en la matriz. En ella, los elementos están definidos por 0, si el punto está fuera de los límites de la cuenca; 1, si el punto está dentro de los mismos. Sobre cada punto de la cuenca, representado por un elemento de la matriz, el programa calcula los coeficientes de peso $\beta_{x_i}(\lambda)$ utilizando las expresiones (3) y (7). En segunda instancia, calcula la precipitación P_x con la ec. (4), construyendo así el campo de la precipitación para la totalidad del mapa base.

La integración de los mapas de isoyetas se realizó reconociendo del foco de la tormenta (estación de mayor altura de precipitación), expandiendo el área de análisis, de a un nodo por vez en el mapa base, y determinando la precipitación media para cada área de expansión. Este procedimiento permitió la construcción de las curvas de

abatimiento altura-área. También la estimación de la altura media de precipitación para el área total de análisis.

Los mapas generados fueron clasificados por duración, para permitir el análisis de las curvas de abatimiento para una duración específica.

Se construyeron los mapas de isoyetas para las 63 tormentas seleccionadas considerando, además, las alturas de precipitación acumuladas a los 30', 1h, 3hs., 6 hs., 12 hs. y 24 hs. de comenzado el evento en cada una de las tormentas. En definitiva se construyeron **trescientos setenta y ocho (378)** mapas de isoyetas.

Las curvas de abatimiento areal de la precipitación para las duraciones analizadas se presentan en las Figuras 4 a 9. Allí se grafica la curva exponencial ajustada a los datos y se imprime la ecuación de ajuste con su coeficiente de determinación.

Considerando el conjunto de datos obtenidos para todas las duraciones y áreas, implementando una planilla de cálculo, se propusieron y ajustaron expresiones analíticas a los datos considerando como función objetivo a minimizar los residuos medios cuadráticos. Las expresiones que se señalan en Tabla 7 resultaron las de mejores ajustes:

Tabla 7. Expresiones analíticas para las curvas de abatimiento

Expresión		Error medio cuadrático
$CAA = \exp(-0.000379*A)$	(9)	0.00570
$CAA = 1 - 0.0003455*A$	(10)	0.00580
$CAA = [\exp(-0.000364*A)]^{(0.046*d)}$	(11)	0.01110
$CAA = [\exp(-0.017606*A)]^{[0.03*d^{(-0.2927)}]}$	(12)	0.00477
$CAA = 1 - \exp[0.0261*d^{(-0.544)}] + \exp[-0.0261*d^{(-0.544)}] - 0.0002496*A$	(13)	0.00478
$CAA = 1 - \exp[-2.918235*d^{(0.16804)}] - 0.0002493*A$	(14)	0.00476

Donde CAA es el coeficiente de abatimiento areal, A el área en km² y d la duración en horas.

Las expresiones (9) y (10) están incompletas dado que la duración *d* no está incluida en los ajustes, de ahí es que presente los mayores desvíos. A pesar de incluir la variable duración en la expresión (11) la ecuación analítica presenta un ajuste muy bajo, como puede apreciarse por los errores elevados.

Las expresiones (12) a (14) presentan errores de ajuste semejantes, por lo que representan ajustes semejantes. La primera de todas garantiza de manera trivial que para área nula el coeficiente CAA es la unidad, por lo que se presenta como la

más conveniente. Además, esta expresión fue propuesta específicamente en este trabajo, revistiendo un carácter inédito.

La Figura 10 presenta una comparación entre las curvas de abatimiento publicadas por la WMO (1983) correspondiente al área de Illinois-USA (líneas de trazo) y las correspondientes a la aplicación de la ecuación (12) (líneas continuas). Las duraciones consideradas en ambos casos fueron 30', 1 h, 3 hs, 6 hs. y 24 hs.

Las curvas de la WMO presentan decaimientos más pronunciados con el área, especialmente para

las duraciones menores (30' a 6 hs). El procedimiento empleado para estas curvas publicadas, parte de una selección de tormentas máximas, como se mencionara al principio, en consecuencia el comportamiento areal de estos máximos se diferencia del observado para tormentas que no son extremas.

El decaimiento areal resultó mas *suave* que para las tormentas máximas.

No obstante esta diferencia entre las muestras utilizadas para la construcción de las curvas, los resultados alcanzados son comparables.

CONCLUSIONES

La metodología utilizada para las interpolaciones respeta los coeficientes de decaimiento regionales observados y presentó errores de interpolación inferiores al 10% en todos los casos analizados (378).

Se construyeron curvas de abatimiento areal de la precipitación, combinando 63 eventos registrados en un conjunto de siete estaciones pluviográficas y 6 duraciones consideradas: 0,5 hs, 1 h, 3 hs, 6 hs, 12 hs y 24 hs. Las curvas fueron construidas aplicando las metodologías de interpolación señaladas con anterioridad y fueron clasificadas por duración.

Se ajustaron expresiones analíticas inéditas a las curvas de abatimiento areal. Esto facultó una herramienta, que si bien no conserva el criterio de extremos de las curvas publicadas por la WMO, permite la distribución areal de focos de tormentas locales para eventos severos.

De este modo, las curvas obtenidas pueden significar una herramienta para la distribución areal de series de tormentas, si se complementan con probabilidades de que una estación determinada constituya el foco de la tormenta.

REFERENCIAS

- Bras R.L., Rodriguez-Iturbe I. (1976) Rainfall Generation: A Non Stationary, Time Varying Multidimensional Model. *Water Resources Research*, 12(3), 450-456.
- Chow VT, Maidment D, Mays L. (1995) *Hidrología Aplicada*; Edit Mc Graw-Hill Interamericana SA; ISBN 0-07-010810-2; Colombia.
- Le Cam, L. (1961). A Stochastic Description of Precipitation. In *Proceedings of the Fourth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*, 3, (ed. J. Neyman), pp. 165-186. Berkeley, California.
- Rodriguez-Iturbe I., Mejia J. (1974) On the Transformation of Point Rainfall to Areal Rainfall. *Water Resources Research*, 10 (4) , 729-735
- Silber M. (1985) Algoritmo de Cálculo y Representación de los Campos Paramétricos Continuos. XII Congreso Nacional del Agua. Mendoza. Argentina.
- Valdés J. (1981) Distribución Espacial y Temporal de la Precipitación. Posgrado en planificación y recursos hídricos. Universidad de Simón Bolívar. Venezuela.
- Yaglom, A.M. (1962) *Theory of Stationary Random Function*. Ed. Prentice Hall.
- World Meteorological Organization (WMO) (1983) *Guide to Hydrological Practices*. Vol II. Anaysis, Forecasting and other Applications. WMO N° 168. 4th edn. Geneva, Switzerland.
- Zawadzki I.I. (1973) Statistical properties of precipitation patterns, *J. Appl. Meteorol.*, 12, 459-472.
- Zimmermann E. (1999) Informe Anual Carrera de Investigador Científico y Técnico. CONICET. CURIHAM. FCEIA:Inédito.
- Zimmermann E, Silber M. (2001) Algoritmo para la representación de campos de precipitación. Enviado a la Revista Ingeniería del Agua. Valencia. España.

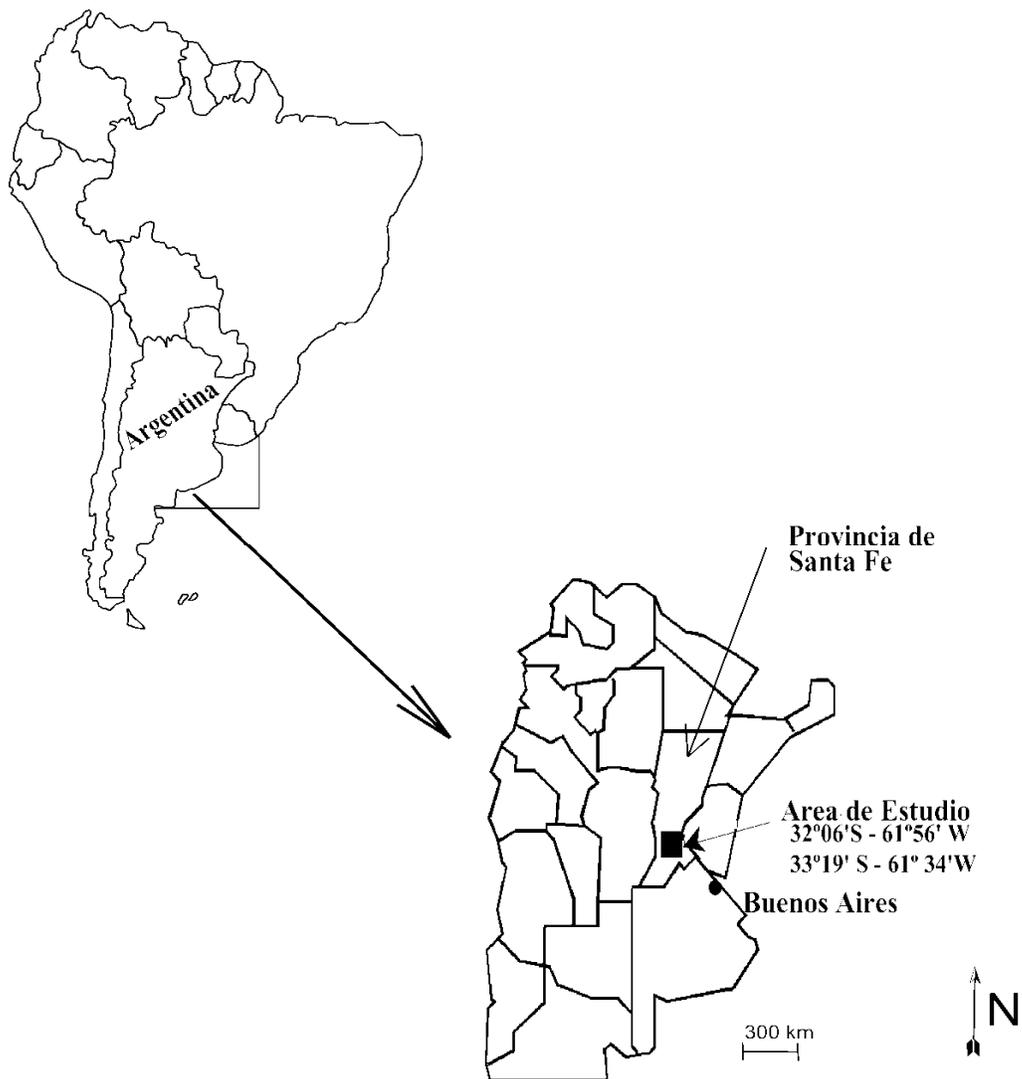


Figura 1. Ubicación de la región de estudio.

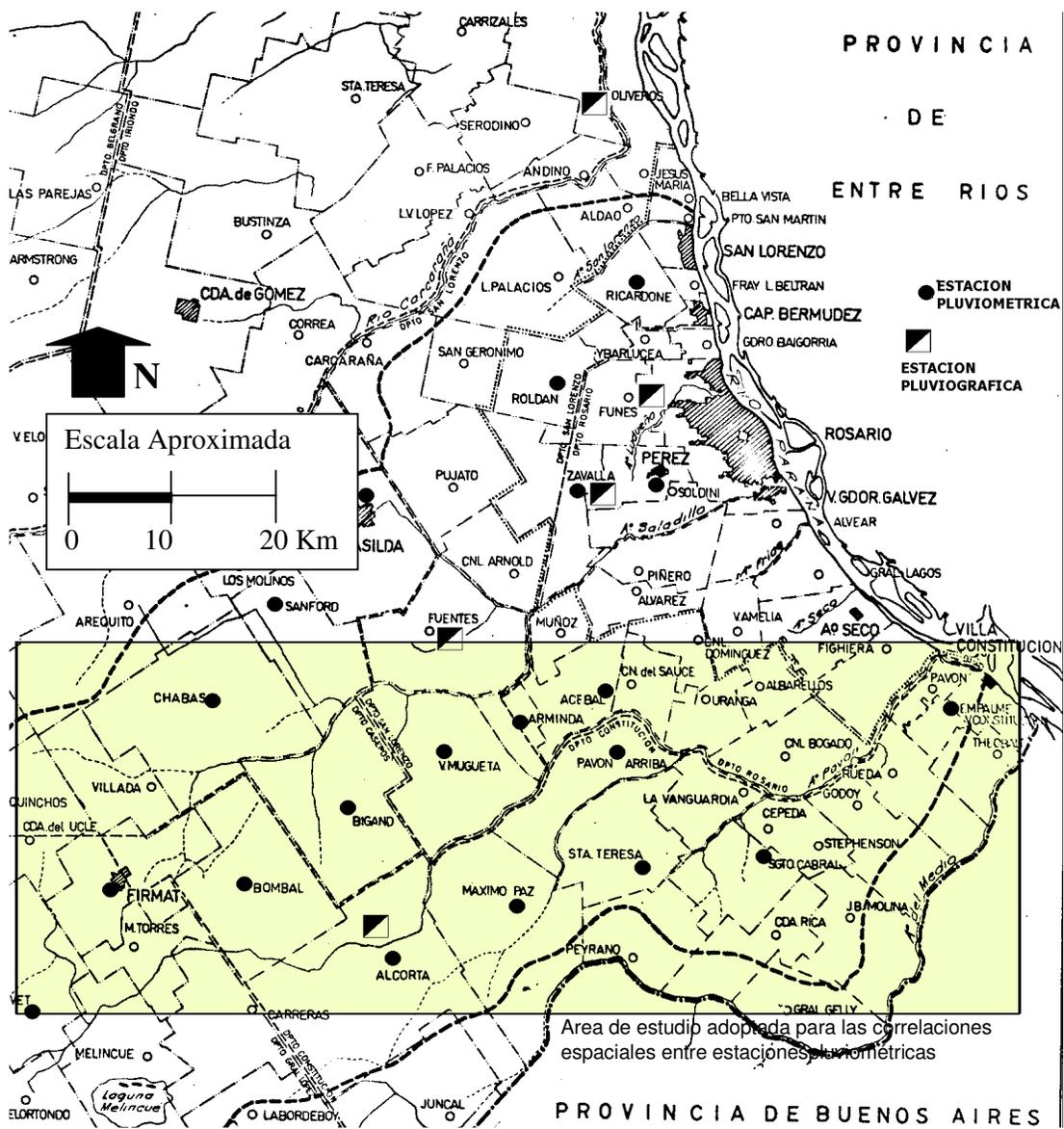


Figura 2. Area de análisis para la correlación pluviométrica

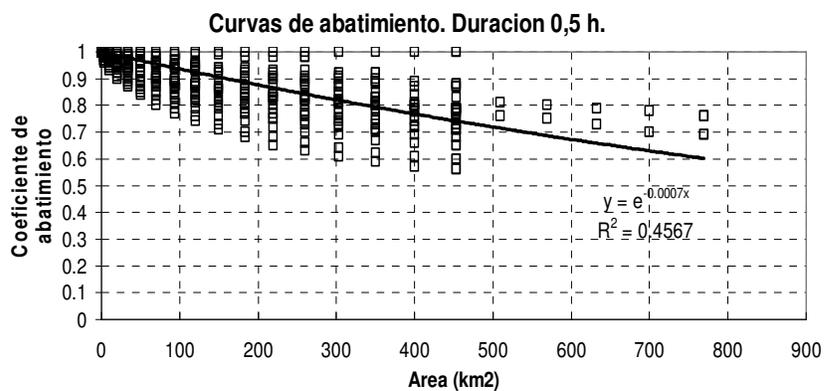


Figura 4

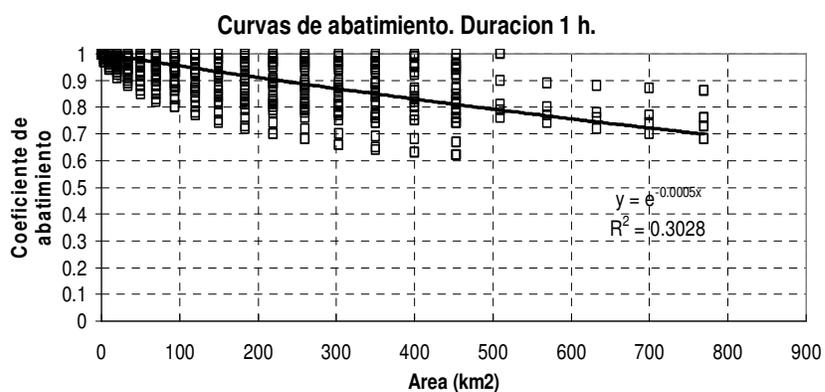


Figura 5.

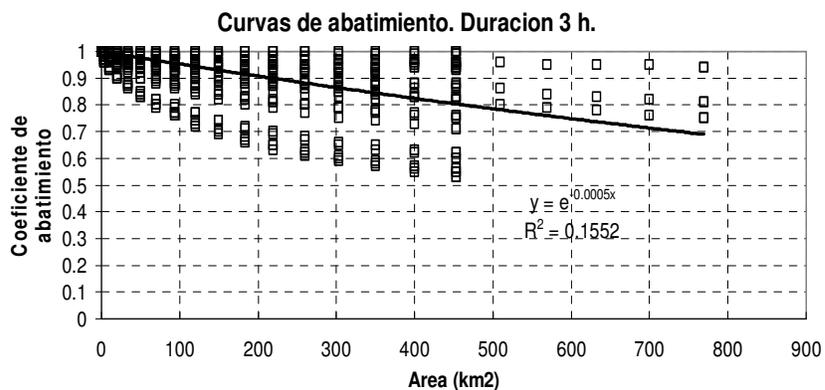


Figura 6.

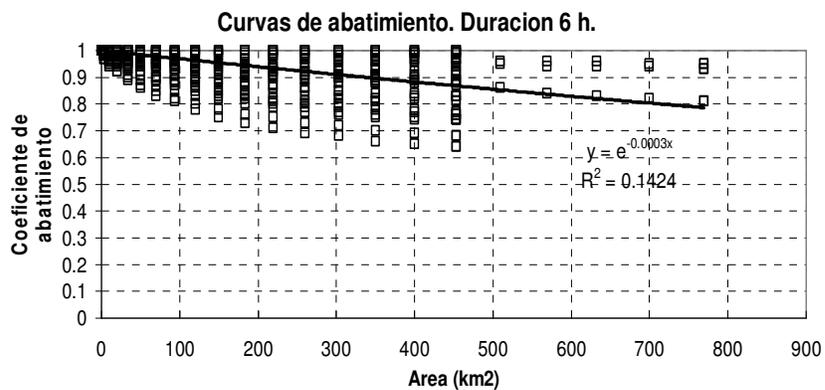


Figura 7.

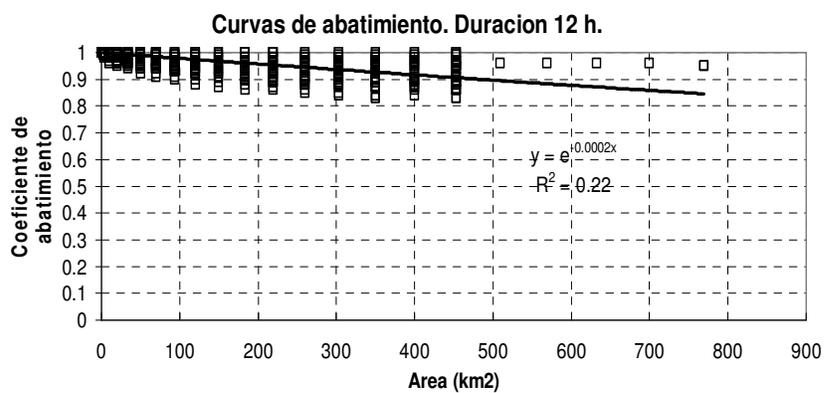


Figura 8.

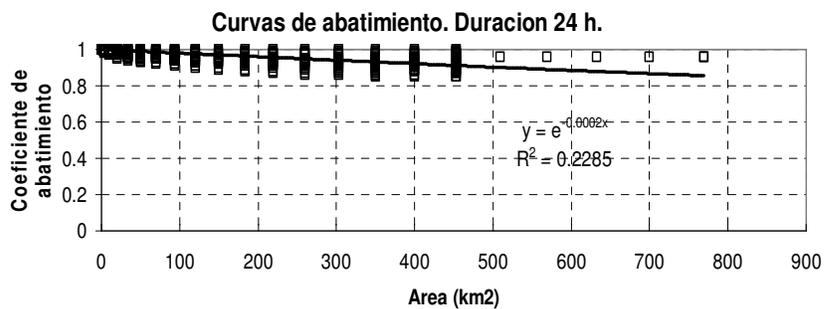


Figura 9.

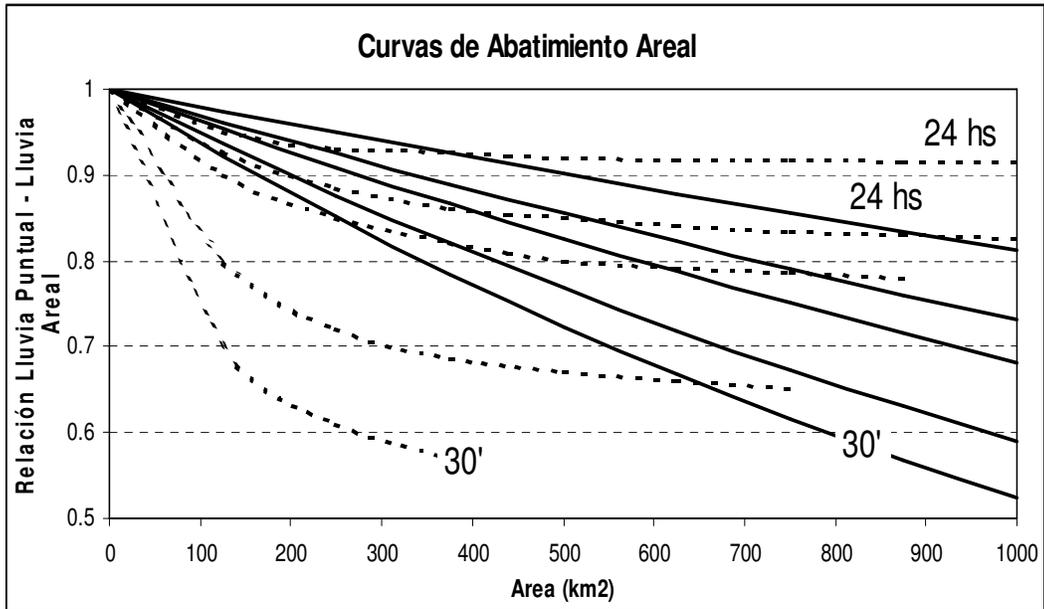


Figura 10. Comparación entre las curvas publicadas por WMO (1983) y las halladas en este trabajo