

ASPECTOS METODOLÓGICOS Y RESULTADOS DE LA REGIONALIZACIÓN DE PRECIPITACIONES MÁXIMAS PARA LA PROVINCIA DE ENTRE RÍOS

Eduardo A. Zamanillo^(1,2), Gustavo R. Larenze⁽¹⁾, María Josefina Tito^(1,2), Martín M. Pérez^(1,2),
María Eugenia Garat⁽¹⁾, Patricia C. Gómez⁽³⁾

⁽¹⁾Facultad Regional Concordia. Universidad Tecnológica Nacional

⁽²⁾Facultad de Ciencias de la Administración. Universidad Nacional de Entre Ríos

⁽³⁾Facultad de Ciencias de la Alimentación. Universidad Nacional de Entre Ríos

⁽¹⁾Salta 277. ⁽²⁾Tavella 1424. Concordia. Entre Ríos.

Teléfono / Fax: ⁽¹⁾+54 345 421 4590 - ⁽²⁾+54 345 423 1400

e-mail: ⁽¹⁾gihha@frcon.utn.edu.ar; ⁽²⁾eduzam@ai.fcad.uner.edu.ar

RESUMEN

Se describe la metodología y los resultados obtenidos de la regionalización de las precipitaciones máximas en la provincia de Entre Ríos. Se discuten los criterios para seleccionar las estaciones representativas, realizar el ajuste estadístico y los mapas de precipitaciones máximas para distintos períodos de retorno y duraciones de uno a cuatro días. Se utiliza el Criterio de Información de Akaike y los errores cuadráticos medios en la variable y en la frecuencia para seleccionar la distribución de mejor ajuste local y regional. Se presentan específicamente los mapas regionalizados mediante el uso de la distribución GEV y el método del Índice de Crecientes. Se comparan los resultados obtenidos con los que resultan de aplicar una metodología de regionalización basada en L-momentos. Se presentan las relaciones $i-d-T$ calculadas y se las vinculan con los resultados de la regionalización de máximos diarios para estimar intensidades para duraciones menores a un día en zonas donde no existe registro pluviométrico. Se muestran los resultados de aplicar el Método de Pilgrim para la estimación del patrón de distribución temporal de tormentas intensas. Se presentan las herramientas informáticas desarrolladas tanto para la visualización como para el cálculo de tormentas de proyecto en cualquier coordenada geográfica de la provincia.

Palabras Claves: Regionalización, Precipitación Máxima, Relaciones $i-d-T$, Tormentas de Diseño.

ABSTRACT

The methodology and results of the regionalization of maximum rainfall in the province of Entre Ríos are described. The criteria for selecting the representative stations, performing the statistical fitting and rainfall maps for different return periods and durations from one to four days are discussed. The Akaike information criterion and the mean square errors in the variable and the frequency are used to select the best local and regional statistical distribution. Maps using GEV distribution and Index Flood method are presented. The $i-d-T$ relationships are linked with the results of regionalization to estimate design intensities for durations of less than a day in areas without rainfall measurements. The results are compared with those resulting from applying a second methodology of regionalization based on L-moments. The results of applying the Pilgrim method for estimating the temporal distribution pattern of intense storms are shown. The software tools developed both for display as for the calculation of design storms in any geographic coordinate in the province are presented.

Key words: Regionalization, Maximum Rainfall, $i-d-T$ Relationships, Design Storms.

INTRODUCCIÓN

El dimensionamiento de las obras hidráulicas está directamente vinculado a la lluvia de diseño que en algún momento futuro generará solicitudes sobre las mismas.

La complejidad de la estimación de la frecuencia de eventos extremos viene dada fundamentalmente por la excepcionalidad de los mismos y los registros de las series de observaciones que, en general, son cortos para extrapolar. En particular, en muchas ocasiones a la corta longitud de las series de observaciones se suma la incertidumbre relacionada con la calidad de las muestras presentando variabilidad en el sesgo muestral.

El método de análisis regional del índice de crecientes es una alternativa que toma en consideración la deficiencia de los métodos de análisis local, aumentando la longitud de los registros disponibles mediante la transferencia de información de las diferentes estaciones pluviométricas que constituyen una supuesta región homogénea. El principio que subyace en este método, es que la distribución de los eventos máximos en una región homogénea es la misma salvo un factor de escala que refleja las características de las precipitaciones de cada estación. Una vez conocidos los cuantiles a escala regional y los valores medios locales, se pueden extrapolar extremos locales con cierta fiabilidad.

Hosking y Wallis (1997) han propuesto el empleo del índice de crecientes conjuntamente con el método de los L-momentos resultando un método robusto aún en presencia de "outliers".

La tormenta de diseño constituye el evento crítico que se utiliza como dato de entrada de cualquier modelo de transformación lluvia-caudal. Para su determinación es necesario definir la lámina máxima precipitada, su intensidad media y duración para diferentes probabilidades de excedencia y representar los interiores de tormenta a través de hietogramas de diseño.

Este trabajo presenta la aplicación y el análisis de las técnicas arriba mencionadas para la regionalización de las precipitaciones máximas, como así también los resultados del análisis de las tormentas históricas registradas en la Provincia de Entre Ríos, incluyendo la actualización de las relaciones Intensidad-Duración-Recurrencia ($i-d-T$), la definición de los patrones de distribución temporal de las tormentas

intensas y la generación de una metodología para la generación de relaciones $i-d-T$ en sitios que carecen de registros pluviométricos y pluviográficos.

La regionalización de precipitaciones máximas incluye la recopilación y selección de estaciones pluviométricas, la generación de series de máximos diarios, el análisis estadístico y elección de la distribución teórica de probabilidad, así como la aplicación de una metodología heurística para el análisis regional de frecuencia. Se comparan los resultados obtenidos con los que resultan de aplicar la metodología de regionalización propuesta por Hosking y Wallis (1997).

Se analizan sucintamente algunos aspectos teóricos relacionados a la definición de los exteriores e interiores de tormenta y se presentan los principales resultados obtenidos a partir del análisis de la información histórica registrada en los pluviógrafos de la provincia de Entre Ríos.

RECOPIACIÓN Y SELECCIÓN DE ESTACIONES

Se recopiló la información pluviométrica existente, generándose una base de datos constituida por estaciones con longitudes de registro de 15 a 50 años localizadas en las Provincias de Entre Ríos, Corrientes, Buenos Aires, Santa Fe y en la República Oriental del Uruguay.

En base al análisis de los registros de las estaciones, se seleccionaron las series de máximos anuales de 20 años de longitud de registro (1986-2005), de 25 años (1981-2005), 30 años (1976-2005), 40 años (1966-2005) y 50 años (1956-2005), las cuales se indican en la Tabla 1.

Las series más cortas no incorporan información suficiente para una adecuada representación del fenómeno, mientras que las más largas sólo permiten una representación espacial pobre del campo de las precipitaciones máximas.

Es importante destacar que desde el punto de vista hidrológico se puede hacer inferencia probabilística confiable del orden del doble de años de registros disponibles en lo que al período de retorno se refiere.

Teniendo en cuenta la representatividad temporal y espacial y el uso de los resultados para el diseño de obras hidráulicas de pequeña y mediana escala, se adoptó una longitud de serie donde la mayoría de

los puestos pluviométricos tiene 30 años de registro, constituida por 21 estaciones en la provincia de Entre Ríos y 16 estaciones externas a la provincia.

La Figura 1 muestra la ubicación de las estaciones pluviométricas seleccionadas para 30 años de registro (1976-2005).

Tabla 1. Número de estaciones seleccionadas por longitud de registro.

Ubicación	20 años	25 años	30 años	40 años	50 años
Entre Ríos	38	33	21	18	11
Externas	37	36	16	10	0



Figura 1. Estaciones pluviométricas seleccionadas.

OBTENCIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN REGIONAL DE FRECUENCIA

Los valores extremos son los eventos máximos o mínimos de un conjunto de datos. En este caso, las precipitaciones máximas diarias para cada año del registro histórico conforman el conjunto de valores extremos que se puede analizar estadísticamente.

Dado que la magnitud de un evento extremo es inversamente proporcional a su frecuencia de ocurrencia, se requiere definir el intervalo de recurrencia o período de retorno *T*, que por definición es el tiempo medio (en años) entre ocurrencias en el largo plazo.

Con el objeto de definir y testear la metodología de procesamiento de la información pluviométrica

diaria se realizó la calibración del análisis estadístico. Para ello se eligió un grupo de estaciones de una zona de la provincia, y se procesaron las series utilizando el programa AFMULTI (Paoli C. *et al*, 1996), a partir de cuyos resultados fueron adoptadas como candidatas las distribuciones Lognormal, GEV, Gumbel y Pearson.

Posteriormente, se completó el análisis de frecuencia de la serie de máximos anuales de 30 años de longitud de registro para cada una de las estaciones pluviométricas elegidas. Las dos distribuciones teóricas de probabilidad que presentaron el mejor ajuste a los valores observados fueron la distribución de Valores Extremos Generalizada (GEV) y la distribución de Gumbel.

La función de Distribución General de Valores Ex-

tremos (GEV) está indicada en (1).

$$F(x) = e^{-\left(1 - \frac{k(x-x_0)}{\alpha}\right)^{\frac{1}{k}}} \quad (1)$$

Los tres parámetros de la distribución son k , x_0 y α , que determinan la forma, ubicación y escala.

El parámetro k permite dividir a la familia general en tres clases:

- Si $k = 0$ Distribución Gumbel o EVI
- Si $k > 0$ Distribución Frechet o EVII
- Si $k < 0$ Distribución Weibull o EVIII

Los parámetros de la Distribución de Valores Extremos Generalizada se estimaron a partir de los momentos ponderados por probabilidad.

La Función de Distribución Gumbel está definida por:

$$F(x) = e^{-e^{\left(\frac{x-x_0}{\alpha}\right)}} \quad (2)$$

Los dos parámetros de ubicación y escala de esta distribución son x_0 y α .

Para medir la bondad del ajuste a escala regional se consideraron criterios basados en parsimonia y medidas de la variabilidad no explicada. La idea de parsimonia es que un buen modelo tiene pocos parámetros, ya que ha capturado las propiedades intrínsecas de la serie que se analiza; por el contrario, un modelo con demasiados parámetros es un modelo que probablemente ajuste mejor pero que sea menos robusto.

Históricamente la calidad de ajuste de una distribución se ha realizado efectuando la suma de los cuadrados de los residuos dividida por el tamaño de la muestra n ($ECMV$).

El Criterio de información de Akaike (AIC) (Salas *et al*, 1980), definido por (3), combina el $ECMV$, el total p de parámetros de la distribución que va a ser ajustada y la longitud n de la serie.

$$AIC(p) = n \cdot \ln(ECMV^2) + 2p \quad (3)$$

El criterio de información de Akaike pondera la varianza residual y el número de parámetros del modelo, en donde, para la distribución GEV, $p = 3$, y para la distribución Gumbel, $p = 2$. De esta forma un modelo será mejor que otro si el AIC es menor independientemente del número de parámetros.

En síntesis, como indicadores para medir la bondad del ajuste se consideraron el Error Cuadrático Medio de la Variable, el Error Cuadrático Medio de la Frecuencia y el Criterio de Información de Akaike. En la Tabla 2 se muestran los valores promedio obtenidos para estos estimadores discriminando entre las estaciones dentro de la provincia y las externas. Esta tabla muestra que los mejores indicadores corresponden a la distribución GEV.

Como resultado de los tests regionalizados de bondad de ajuste se adoptó la Distribución General de Valores Extremos (GEV) para definir la distribución de probabilidad teórica que representa el comportamiento de las precipitaciones máximas en el ámbito de la Provincia de Entre Ríos.

Tabla 2. Valor promedio obtenido para ECM de la variable, ECM de la frecuencia y $AIC(p)$.

ESTACIONES	ECM VARIABLE		ECM FRECUENCIA		$AIC(p)$ VARIABLE	
	GUMBEL	GEV	GUMBEL	GEV	GUMBEL	GEV
Entre Ríos	6.81	6.03	0.04	0.03	94.28	91.77
Externas	8.31	7.27	0.05	0.04	122.30	118.04

FORMA ALTERNATIVA PARA OBTENER LA DISTRIBUCIÓN REGIONAL DE FRECUENCIA

Una metodología alternativa para el análisis regional de frecuencia (Hosking y Wallis, 1997) utiliza el conjunto de datos espacialmente distribuidos en puntos de una región considerada homogénea para estimar los cuantiles asociados a diferentes probabi-

lidades de excedencia en un punto cualquiera dentro de esa región.

Los L-momentos son un sistema alternativo para describir la forma de las distribuciones de probabilidad. Históricamente se originaron como modificaciones de los momentos ponderados por probabilidad definidos por Greenwood *et al* (1979) por las cantidades (4):

$$M_{p,r,s} = E \left[x^p (F(x))^r \{1 - F(x)\}^s \right] \quad (4)$$

Particularmente, son útiles en casos especiales los siguientes momentos ponderados por probabilidad: $\alpha_r = M_{1,0,r}$ y $\beta_r = M_{1,r,0}$.

Por otro lado se definen polinomios $P_r^*(u)$ para $r = 0, 1, 2, \dots$ como sigue:

i) $P_r^*(u)$ es un polinomio de grado r en u

ii) $P_r^*(0) = 1$

iii) $\int_0^1 P_r^*(u) P_s^*(u) du = 0$ si $r \neq s$ (condición de ortogonalidad). Estas condiciones definen los polinomios de Legendre* y pueden ser escritos como (5):

$$P_r^*(u) = \sum_{k=0}^r P_{r,k}^* \cdot u^k \quad (5)$$

donde:

$$P_{r,k}^* = (-1)^{r-k} \cdot \binom{r}{k} \cdot \binom{r+k}{k} \quad (6)$$

Para una variable aleatoria X cuya función cuantil es $X(u)$, definimos los L-momentos como las cantidades:

$$\lambda_r = \int_0^1 X(u) P_{r-1}^*(u) du \quad (7)$$

En términos de los momentos ponderados por probabilidad, los L-momentos vienen dados por (8):

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= \beta_0 \\ \lambda_2 &= 2\beta_1 - \beta_0 \\ \lambda_3 &= 6\beta_2 - 6\beta_1 + \beta_0 \\ \lambda_4 &= 20\beta_3 - 30\beta_2 + 12\beta_1 - \beta_0 \end{aligned} \quad (8)$$

En particular, se define el L-CV (coeficiente de L-variación) como: $\tau = \lambda_2/\lambda_1$; el coeficiente de L-curtosis como: $LC_k = \tau_k = \lambda_4/\lambda_2$, y el coeficiente de L-asimetría como: $LC_s = \tau_3 = \lambda_3/\lambda_2$.

El análisis regional de frecuencia se basa en cuatro etapas:

- Análisis y filtrado de los datos primarios de observaciones.
- Identificación de regiones homogéneas.
- Selección de la distribución regional de frecuencia.

d) Estimación de los parámetros y cuantiles de la función regional de distribución de probabilidades.

Es por ello, que proponen tres pruebas estadísticas útiles en el análisis regional de frecuencia. Ellas son: la prueba de la discordancia, la prueba de la heterogeneidad y la prueba de bondad de ajuste Z.

La prueba de discordancia es útil para identificar estaciones cuyos datos muestrales de los L-momentos difieren significativamente de las otras estaciones de una supuesta región.

Si se tienen N estaciones en una región. Sea $u_i = [\tau^i, \tau_3^i, \tau_4^i]$ un vector cuyas coordenadas son τ, τ_3 y τ_4 para una estación i , transpuesto. Sea \bar{u}_i la media aritmética de los u_i . Se define la matriz de suma de cuadrados y productos cruzados como sigue (9):

$$A = \sum_{i=1}^N (u_i - \bar{u})(u_i - \bar{u})^T \quad (9)$$

Se define la medida de la discordancia D_i para una estación i , por (10):

$$D_i = \frac{1}{3} N (u_i - \bar{u})^T A^{-1} (u_i - \bar{u}) \quad (10)$$

Para regiones con cantidad de estaciones mayor o igual a 15, el valor crítico para la discordancia es 3. Es decir, las estaciones cuyo valor de D_i supere este valor, deberán ser separadas.

La prueba de heterogeneidad se utiliza para analizar el grado de coherencia de un grupo de estaciones y cuando estas pueden ser consideradas como una región homogénea.

Si se tienen N estaciones en una región, sea n_i , la longitud de registro de la estación i y sean τ^i, τ_3^i y τ_4^i los L-momentos cocientes para una estación i .

Sea τ^R el L-Coeficiente de Variación regional medio ponderado proporcionalmente por la longitud de registro de las estaciones. Así (11):

$$\tau^R = \frac{\sum_{i=1}^N n_i \tau^{(i)}}{\sum_{i=1}^N n_i} \quad (11)$$

Calculando la desviación estándar ponderada del L -CV de cada una de las estaciones según (12):

$$V = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^N n_i (\tau^{(i)} - \tau^R)^2}{\sum_{i=1}^N n_i} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

La medida de la heterogeneidad se define como (13):

$$H = \frac{(V - \mu_V)}{\sigma_V} \quad (13)$$

Para calcular H es necesario estimar la media y la desviación estándar de V , esto se logra mediante experimentos de simulación en los que V_i se determina para cada simulación realizada. El número de simulaciones propuesto por Hosking y Wallis (1997) debe ser por lo menos de 500, para que las estimaciones de μ_V y σ_V resulten fiables. Luego una región puede ser considerada “aceptablemente homogénea” si $H < 1$, “posiblemente heterogénea” si $1 < H < 2$ y “definitivamente heterogénea” si $H \geq 2$.

De un conjunto de distribuciones candidatas, el objetivo es determinar aquella que mejor se ajusta. La medida de la bondad del ajuste para una distribución de tres parámetros propuesta por Hosking y Wallis (1997) es (14):

$$Z^{DIST} = \frac{(\tau^{DIST} - \bar{\tau}_4 + \beta_4)}{\sigma_4} \quad (14)$$

siendo τ_4^{DIST} el coeficiente de L-curtosis estimado con GEV, τ_4^R el coeficiente de L-curtosis regional, y σ_4 la desviación estándar del τ_4^R .

Si el estadístico Z^{DIST} de una determinada distribución es suficientemente cercano a cero, el ajuste se considera adecuado; para un nivel de significación

del 90% el criterio es $|Z^{DIST}| \leq 1,64$.

Se procesaron las series de datos con *LMOMENTS: Fortran routines for use with the method of L-moments* propuestas por Hosking (2005).

Análisis regional de consistencia de datos

Con respecto al análisis regional, se efectuó la prueba de la discordancia para cada una de las estaciones seleccionadas. La Tabla 3 presenta los valores de τ , τ_3 y τ_4 obtenidos para cada una de las 37 estaciones, como así también el correspondiente valor para D_i . Se puede observar que los valores locales de D_i son inferiores a 3 en todas las estaciones salvo en la estación Pergamino. Por lo que debe ser separada por ser discordante en la región considerada.

Prueba de heterogeneidad regional

La prueba de heterogeneidad se calculó simulando 500 regiones con 36 estaciones y series de 30 años, obteniéndose los resultados que se muestran en la Tabla 4. Como el valor obtenido para H es menor a 1 la región puede considerarse aceptablemente homogénea.

Resultado del método alternativo de selección de la distribución regional de frecuencia

Con respecto a la bondad del ajuste, se determinó el valor de Z para las siguientes distribuciones: Logística Generalizada, General de Valores Extremos, LogNormal, Pearson Tipo III y Pareto. Los valores obtenidos para Z de las cinco distribuciones se muestran en la Tabla 5. Los asteriscos indican los valores de Z que son menores a 1,64. Se puede observar que son tres las distribuciones que dan un buen ajuste a los datos: GEV, LogNormal y Pearson Tipo III. En el análisis anterior la distribución GEV fue la que localmente brindó mejores ajustes. A nivel regional el valor obtenido para $Z^{GEV}=1,24$, indica un buen ajuste. Por lo tanto, a partir de este resultado se confirma que a nivel regional la distribución de los máximos diarios es GEV.

Tabla 3. Valores estimados de τ , τ_3 , τ_4 y D_i correspondientes a las estaciones pluviométricas.

	Estación	τ	τ_3	τ_4	D_i
1	Guaaleguaychu	0,17	0,27	0,24	0,94
2	Mercedes(ROU)	0,20	0,29	0,10	0,99
3	Colonia	0,20	0,31	0,25	0,59
4	Castelar	0,17	0,26	0,15	0,50
5	Colonia Avigdor	0,16	0,20	0,12	0,29
6	Pedro Vallejos	0,23	0,33	0,21	1,71
7	Monte Caseros	0,14	0,14	0,17	1,62
8	San Jaime	0,15	0,03	0,06	1,16
9	Est. La Esperanza	0,14	0,11	0,15	1,13
10	El Carmen	0,16	0,08	0,07	0,62
11	Banderas	0,18	0,16	0,09	0,18
12	La Paz	0,17	0,13	0,07	0,31
13	San Gustavo	0,19	0,11	0,07	0,72
14	Paso Juncue	0,18	0,26	0,17	0,16
15	El Yuquerí	0,17	0,34	0,16	1,80
16	Concordia	0,20	0,42	0,31	2,07
17	Los Charruas	0,19	0,30	0,19	0,28
18	San Salvador	0,17	0,27	0,24	0,83
19	Villaguay	0,16	0,10	0,10	0,41
20	C del Uruguay	0,15	0,15	0,03	1,39
21	Paysandu	0,15	0,09	0,18	1,47
22	Colon	0,16	0,23	0,06	1,34
23	Parana	0,20	0,19	0,16	0,53
24	Sauce Viejo	0,22	0,17	0,08	2,10
25	Febre	0,18	0,28	0,14	0,49
26	Hernandez	0,20	0,12	0,14	1,09
27	CrucesitasIII	0,18	0,12	-0,05	2,74
28	Isletas	0,18	0,16	0,21	0,91
29	Zaballa	0,16	0,21	0,22	0,79
30	Rosario	0,19	0,25	0,11	0,44
31	Oliveros	0,17	0,13	0,05	0,52
32	San Pedro	0,19	0,23	0,14	0,16
33	Pergamino	0,25	0,47	0,33	3,75
34	Gilbert	0,21	0,23	0,24	1,14
35	Paso de los Libres	0,19	0,14	0,17	0,71
36	Mercedes	0,18	0,26	0,17	0,22
37	Reconquista	0,18	0,10	0,15	0,91

Test de Langbein

Otra prueba complementaria para determinar la homogeneidad hidrológica es el Test de Langbein (Dalrymple *et al*, 1960). Esta prueba permite verificar si la región considerada es homogénea, desde el punto de vista hidrológico, en base a la comparación de los

períodos de retorno teóricos con los estimados con la distribución GEV versus los años de registro de cada estación (Olmos *et al*, 2007). Según se presenta en la Figura 2, los puntos correspondientes a los períodos de retorno corregidos quedarían ubicados dentro de los límites de confianza para las 37 estaciones seleccionadas, con lo que la región puede considerarse homogénea desde el punto de vista hidrológico.

Tabla 4. Resumen de la prueba de heterogeneidad.

V	μ_V	σ_V	H
0,0235	0,0242	0,0027	-0,23

Tabla 5. Resumen de valores obtenidos en la prueba de bondad de ajuste Z .

Distribución de Frecuencia	τ_4	Z
Gen. Logistic	0,202	4,15
Gen. Extreme Value (GEV)	0,166	1,24 *
LogNormal	0,156	0,49 *
Pearson Type III	0,137	-1,03 *
Gen. Pareto	0,081	-5,47

(*) Valores inferiores al límite $|Z| \leq 1.64$

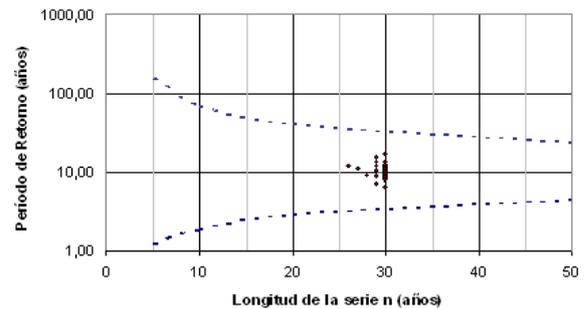


Figura 2. Límites de confianza del Test de Langbein.

REGIONALIZACIÓN DE VALORES MÁXIMOS

El Método del Índice de Crecientes (*Index Flood Method*), es uno de los métodos de regionalización más difundidos. Fue introducido por (Dalrymple *et al*, 1960), y usado por diversos investigadores (Olmos *et al*, 2007) para adimensionalizar datos obtenidos en puntos distintos de una región considerada homogénea, con la finalidad de utilizarlos como un conjunto muestral único. La hipótesis básica de este método es que los puntos forman una región homogénea, o sea, las distribuciones de frecuencias de los N puntos son idénticas, salvo un factor de escala local, llamado índice de crecientes o factor de adimensionalización (15):

$$\chi_j(F) = \mu_j x(F) \quad (15)$$

donde μ_j es el índice de crecientes del punto j , y $x(F)$ representa la curva regional de frecuencia de cuantiles adimensionales, común a todos los puntos. El factor de escala μ_j puede ser estimado por cualquier medida de posición o tendencia central de la muestra de observaciones $\{\chi_{1,j}, \chi_{2,j}, \dots, \chi_{n,j}\}$. Los datos adimensionales estandarizados:

$$x_{i,j} = \chi_{i,j} / \hat{\mu}_j \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad j = 1, 2, \dots, N$$

donde n es la cantidad de datos por punto de la región y N es la cantidad de puntos de la región, forman una base para estimar una curva regional de cuantiles adimensionales $x(F)$. Los principales supuestos del método del índice de crecientes son:

- las observaciones en un punto cualquiera son idénticamente distribuidas;
- las observaciones en un punto cualquiera no presentan dependencia estadística serial;
- las observaciones en diferentes puntos son estadísticamente independientes;
- las distribuciones de frecuencia en diferentes puntos son idénticas, salvo un factor de escala;
- la forma matemática de la curva regional de cuantiles adimensionalizados puede ser correctamente especificada.

Aplicado a los máximos anuales de precipitación supone que estos en un conjunto de estaciones que pertenecen a una región homogénea poseen distribuciones idénticas excepto por un factor de escala propio de cada estación. De esta forma, el máximo anual X_j en una estación j de la región puede expresarse como: $X_j = u_j \eta_j$. Expresión donde el factor de escala u_j es una constante particular de cada estación y el índice de crecientes η_j es la curva regional de cuantiles adimensionales, común a todas las estaciones, el cual se adoptó igual al valor medio de la serie de máximos para cada duración considerada. Por ese motivo, se regionalizó la Precipitación Máxima Media P_M para duraciones iguales a 1, 2, 3 y 4 días, que se presentan en los mapas de isohietas indicados en la Figura 3 (Zamanillo et al, 2008a).

Teniendo en cuenta que la región es homogénea y que el método de interpolación usado (*kriging*) construye los contornos a partir de los datos estimados en los nodos de la red, se adoptó el criterio de tomar estaciones representativas y dividir la provincia en subregiones por aproximación geográfica.

Se agruparon las 37 estaciones en 11 subregiones. En cada una de estas se eligió 1 estación representativa. El criterio usado para elegir representante de la subregión fue seleccionar aquella que presentara el valor máximo para la media. Con este procedimiento se logró suavizar las isohietas correspondientes a los mapas de medias y de máximos para distintos períodos de retorno.

La adimensionalización de las series se llevó a cabo dividiendo cada valor de la misma P_{T_j} (para $T = 2, 5, 10, 20, 25$ y 50 años) por el factor u_j , donde $u_j = P_{M_j}$ = Media de los máximos para cada duración considerada de cada estación y P_{T_j} = Precipitación Máxima para el período de retorno T en la estación j . Por lo tanto, los cocientes o índices de crecientes locales de cada estación se calcularon para duraciones iguales a 1, 2, 3 y 4 días según (16):

$$\eta_j = \frac{P_{T_j}}{P_{M_j}} \quad (16)$$

Se determinó el Índice de crecientes regional adoptando el promedio de los cocientes correspondientes a las estaciones seleccionadas.

La Tabla 6 presenta los valores correspondientes para cada duración y recurrencia de diseño. El uso combinado de la Tabla 6 y la Figura 3 permite estimar en cada punto de la provincia la Precipitación Máxima P_{T_R} (mm) asociada a un período de retorno T_R (años) para duraciones de 1, 2, 3 y 4 días.

Tabla 6. Índices de crecientes regionales.

Duración (días)	Período de retorno (años)					
	2	5	10	20	25	50
1	0.93	1.23	1.44	1.67	1.74	1.99
2	0.93	1.24	1.46	1.68	1.76	1.99
3	0.92	1.24	1.46	1.68	1.76	2.00
4	0.93	1.24	1.46	1.68	1.76	2.00

La Figura 4 muestra los resultados de la regionalización de las precipitaciones máximas diarias. La misma presenta los mapas correspondientes a los máximos de un día y períodos de retorno de 5, 10, 25 y 50 años. Mapas similares a los de la Figura 4 han sido generados para duraciones de 2, 3 y 4 días.

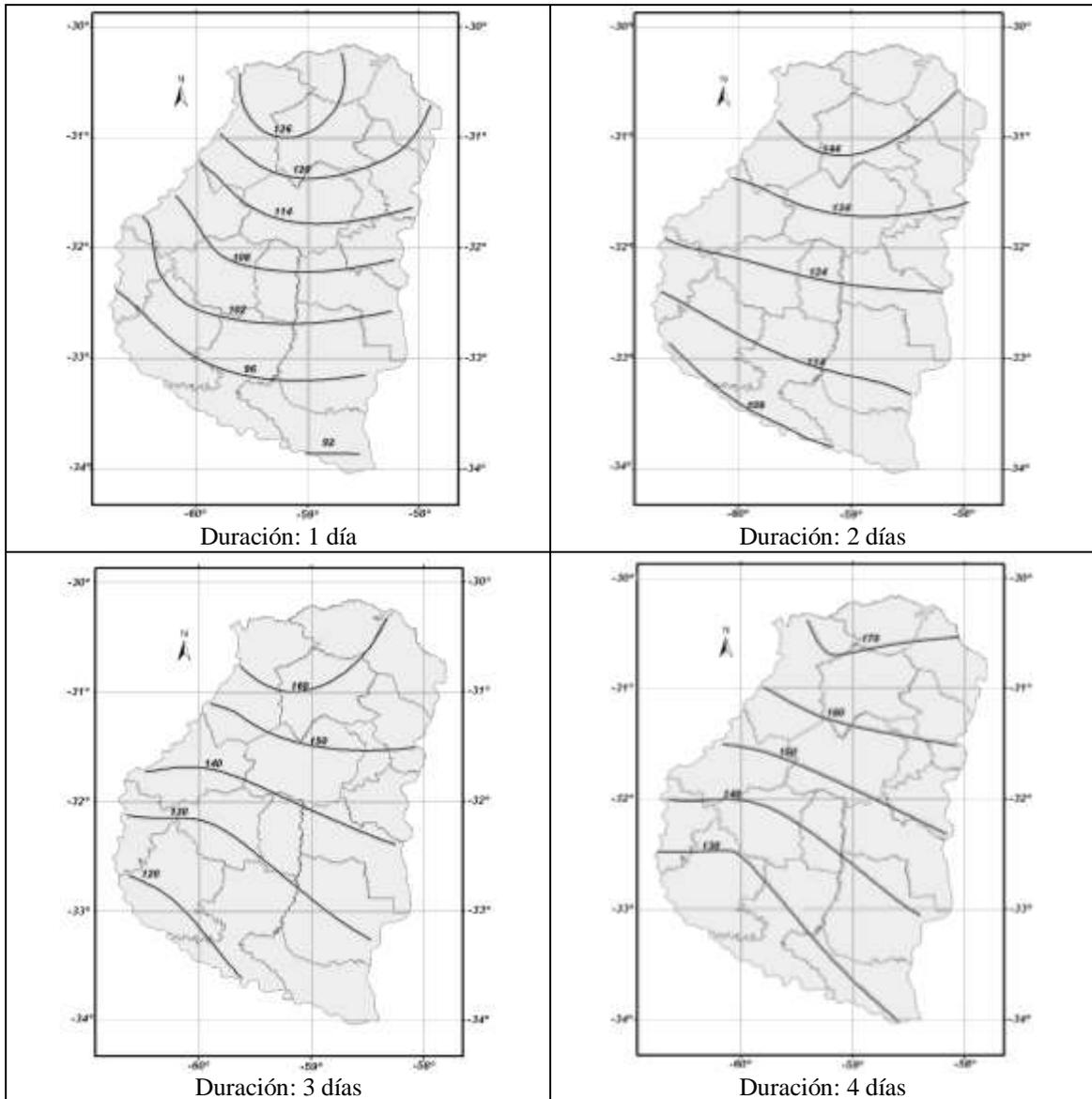


Figura 3. Isohietas de valores medios de precipitaciones máximas P_M (mm).

La Tabla 7 muestra los cuantiles calculados a partir de estimar los parámetros de forma, ubicación y escala para la distribución GEV regional, para distintos períodos de retorno. Y se comparan con los obtenidos anteriormente para los máximos de un día. La Figura 5 muestra esta comparación desde el punto de vista gráfico, por lo que se puede concluir que los valores obtenidos por medio de las dos metodologías no son significativamente diferentes dentro de

los rangos de los períodos de retorno analizados.

Tabla 7. Comparación de los índices de crecientes regionales obtenidos por las dos metodologías para un día de duración.

	Período de Retorno (años)					
	2	5	10	20	25	50
Hosking y Wallis	0.93	1.23	1.43	1.64	1.71	1.92
Zamanillo et al.	0.93	1.23	1.44	1.67	1.74	1.99

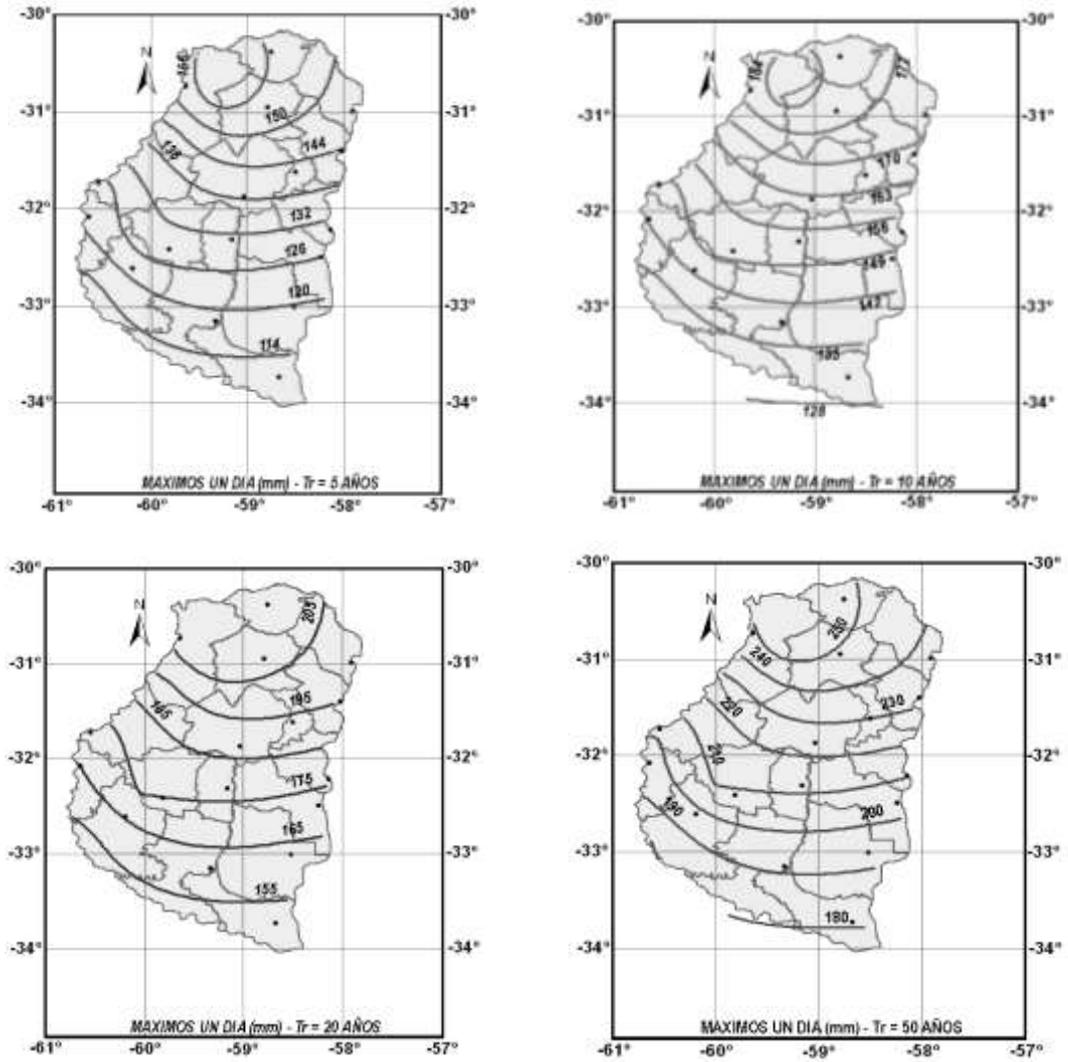


Figura 4. Mapas correspondientes a los máximos de un día y períodos de retorno de 5, 10, 20 y 50 años.

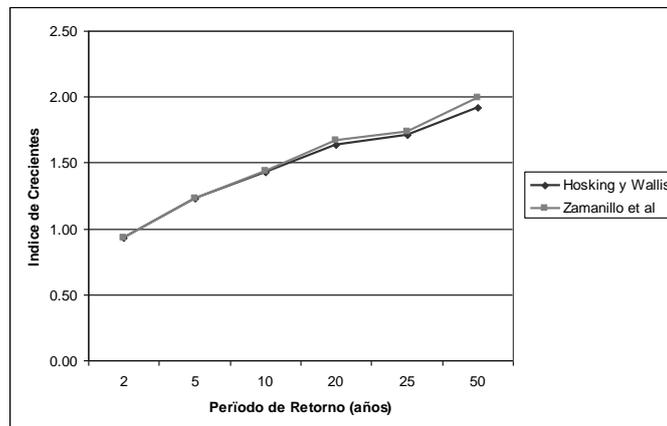


Figura 5. Comparación gráfica de los índices de crecientes regionales obtenidos por las dos metodologías para un día de duración.

RELACIONES *i-d-T*

Se obtuvieron los registros provenientes de Concordia, Paraná y Concepción del Uruguay.

Una vez definidos los intervalos de máxima intensidad anual, comprendidos entre 5 minutos y 24 horas, se procedió al análisis de los registros, utilizando un software de procesamiento específico (Pérez *et al*, 2008), que interpreta los datos digitalizados.

El análisis estadístico de las alturas máximas de precipitación se efectuó ajustando la Ley Gumbel para estimar las intensidades máximas correspondientes a distintas probabilidades de excedencia para una duración dada. A estos resultados se le ajustó una expresión tipo Sherman de cuatro parámetros. Las Ecuaciones (18) a (20) presentan las relaciones *i-d-T* para los pluviógrafos provinciales, y en la Figura 6 se muestra la *i-d-T* correspondiente a la ciudad de Concordia (Zamanillo *et al*, 2008b).

$$i = \frac{652,4 \cdot T^{0,26}}{(d + 5)^{0,71}} \text{ (Concordia)} \tag{18}$$

$$i = \frac{1086,9 \cdot T^{0,19}}{(d + 9)^{0,78}} \text{ (C. del Uruguay)} \tag{19}$$

$$i = \frac{601 \cdot T^{0,23}}{(d + 6)^{0,69}} \text{ (Paraná)} \tag{20}$$

ANÁLISIS DE INTERIORES DE TORMENTA

Los hietogramas de diseño se determinaron utilizando el Método de Pilgrim, Cordery y French (Pilgrim *et al*, 1977), que refleja la distribución temporal real de las tormentas registradas. En este trabajo se fijó un valor mínimo de intensidad media igual a 0,1 mm/min para que una tormenta sea considerada en el análisis (Medina *et al*, 1975).

El valor establecido para definir la lámina mínima precipitada, en virtud de los registros disponibles, fue igual a 20 mm, mientras que el valor de separación entre tormentas adoptado fue de 2 horas (criterio de Eagleson).

La duración total de la tormenta fue dividida en cuantiles variables, de acuerdo a su rango. Las duraciones mayores a 120 minutos fueron divididas en 6 cuantiles, mientras que para las tormentas de corta duración se adoptaron los siguientes cuantiles: tres para duraciones menores o iguales a 30 minutos, cuatro para duraciones entre 30 y 60 minutos y cinco para duraciones variables entre 60 y 120 minutos.

De esta forma fueron identificados los distintos patrones de distribución temporal de las tormentas intensas en cada estación pluviográfica, los cuales se resumieron en hietogramas de diseño característicos para la Provincia de Entre Ríos. A modo de ejemplo, la Figura 7 presenta los hietogramas de diseño para la localidad de Concordia y la Figura 8 presenta los hietogramas de diseño para la ciudad de Paraná.

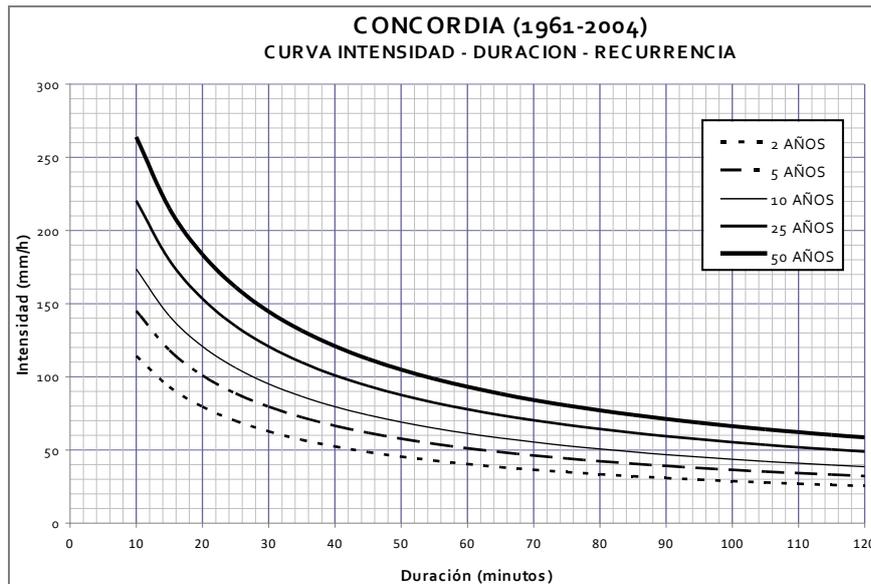


Figura 6. *i-d-T* correspondiente a la ciudad de Concordia.

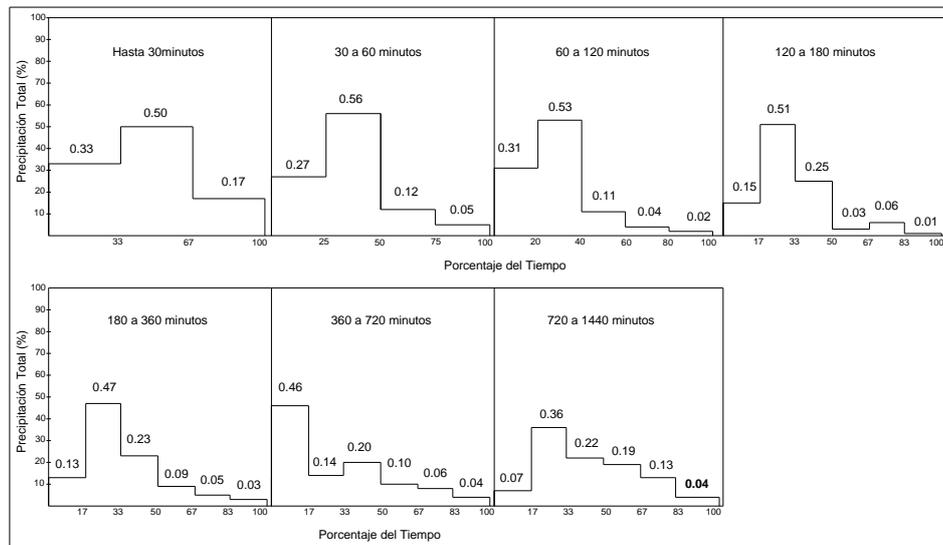


Figura 7. Hietogramas de diseño Concordia.

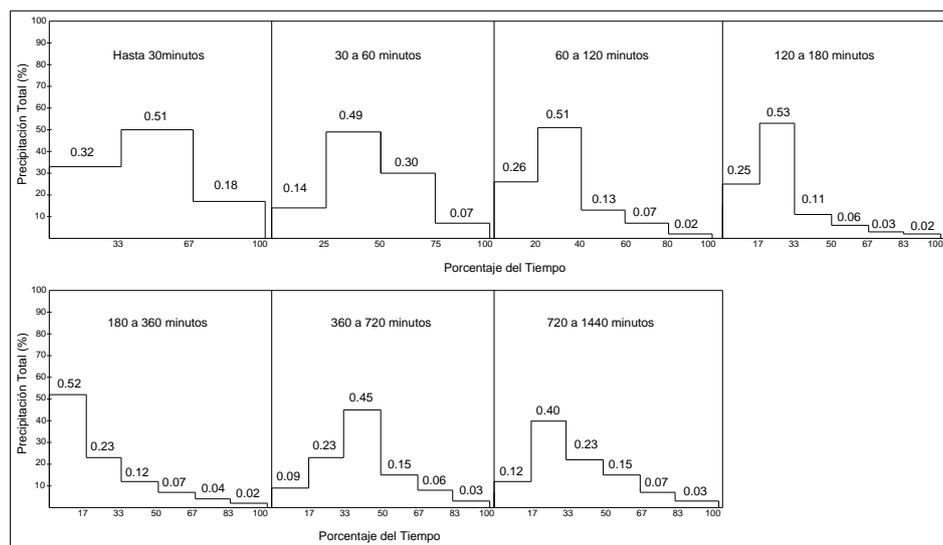


Figura 8. Hietogramas de diseño Paraná.

TRANSPOSICIÓN DE LAS RELACIONES INTENSIDAD-DURACIÓN-RECURRENCIA

Para estimar las intensidades de precipitación en los emplazamientos que carecen de información pluviográfica se desarrolló un procedimiento basado en la desagregación temporal de la precipitación máxima diaria regionalizada (Zamanillo et al, 2008b). De acuerdo a las condiciones propuestas por Pierehumbert (García C. M., 2000; Caamaño Nelli et al, 2003) se delimitaron las zonas de influencia asociadas a cada estación pluviográfica. La provincia de Entre Ríos se dividió en tres zonas.

A cada zona de influencia se le atribuyó el mismo patrón temporal, caracterizado por los cocientes $r_{d/24} = P_d/P_{24}$ (horas) entre láminas de distintas duraciones d (min) con respecto a la precipitación de 24 horas (P_{24} (horas)) y por las relaciones (21):

$$RT = \frac{P_{24}(\text{horas})}{P_{Max\ diaria}} \quad (21)$$

Las relaciones RT incorporan al análisis la diferencia que existe entre el día pluviométrico y pluviográfico (generalmente con hora de inicio y fin de registro

predeterminadas) y el intervalo móvil de 24 horas que abarca las máximas intensidades de tormenta.

El valor medio de esta relación en diferentes lugares del mundo oscila en torno al valor 1.14. El mismo fue determinado para los tres pluviógrafos provinciales a partir del contraste entre los registros pluviográficos y pluviométricos obteniéndose los valores que se indican en la Tabla 8.

Tabla 8. Relaciones RT de los pluviógrafos provinciales.

LOCALIDAD	RT
Concordia	1.16
Concepción del Uruguay	1.14
Paraná	1.15

Los cocientes $r_{d/24}$ se obtuvieron a partir de la relación $i-d-T$ representativa de cada región de influencia pluviográfica, indicándose los valores representativos en la Tabla 9.

Tabla 9. Relaciones $r_{d/24}$ de los pluviógrafos provinciales.

LOCALIDAD	DURACIÓN (minutos)							
	10	30	60	90	120	180	360	720
Concordia	0.18	0.29	0.38	0.43	0.47	0.54	0.66	0.82
C. Uruguay	0.20	0.35	0.45	0.51	0.55	0.61	0.73	0.85
Paraná	0.16	0.27	0.35	0.41	0.45	0.51	0.65	0.80

SISTEMAS DE INFORMACIÓN Y CÁLCULO ASOCIADOS A LA REGIONALIZACIÓN

Con el propósito de visualizar los resultados de la Regionalización de Precipitaciones Máximas se desarrollaron dos herramientas de consulta: un Sistema de Información Geográfica (SIG), y un sistema en lenguaje HTML. Los mismos fueron diseñados para facilitar la visualización y consulta de resultados en 250 localidades de la Provincia.

La Figura 9 presenta la Ventana Principal del Siste-

ma de Información Geográfica. El recuadro 1 indica la Tabla de Contenidos donde se encuentran las distintas capas de información que integran el proyecto, el recuadro 2 es la zona de visualización donde se representan las mismas, y el recuadro 3 indica las coordenadas del punto donde está posicionado el puntero del mouse.

$$h_d (\text{mm}) = (r_{d/24})P_{24} = (r_{d/24})(RTP_{\text{max diaria}}) \quad (22)$$

En los sitios que carecen de información pluviográfica, es posible estimar la precipitación máxima diaria ($P_{\text{máx diaria}}$) en base a mapas regionalizados (Zamanillo et al, 2008b), y afectarla por los cocientes RT y $r_{d/24}$, extrapolados desde la estación pluviográfica, para obtener las láminas h_d correspondientes a duraciones menores a 24 horas. Por lo tanto:

Aplicando (22) a las precipitaciones máximas diarias correspondientes a distintos períodos de retorno T , se determinan las láminas h_d (mm) para todo el rango de duraciones d (min) menores a 24 horas, a partir de las cuales quedan definidas las intensidades $i_d = h_d \cdot 60/d$ (mm/hora), generando una nube de puntos sobre la que es posible ajustar una ecuación de tipo Sherman.

La Figura 10 muestra la ventana de visualización donde puede efectuarse la consulta de información sobre los máximos diarios para una localidad de la Provincia de Entre Ríos.

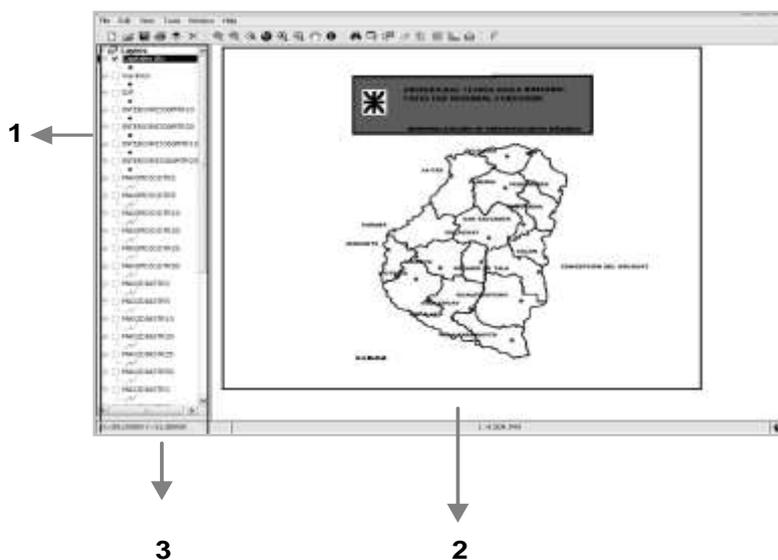


Figura 9. RegPrecMax. Ventana principal.

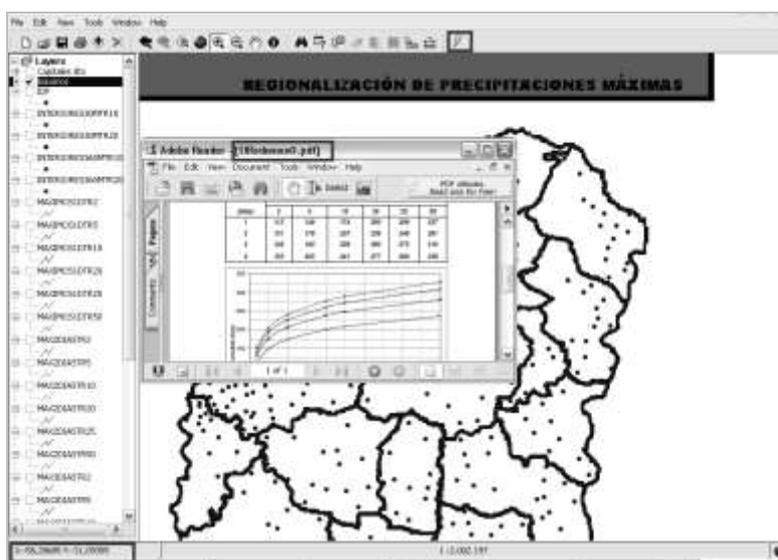


Figura 10.- RegPrecMax. Máximos Diarios.

Con el objeto de suministrar una herramienta de cálculo para el diseño se desarrolló una aplicación, que funciona en un entorno Excel con macros programadas en Visual Basic, denominada “Lluvias E.R.”. Esta permite estimar la Precipitación Máxima Diaria, la relación I-D-T y la distribución temporal de tormentas de distintas duraciones para cualquier coordenada geográfica ubicada en el ámbito de la Provincia de Entre Ríos. La Figura 11 presenta la estructura de la aplicación, que ha sido organizada en cuatro módulos, a los cuales se puede acceder a

través del Menú Inicio de la planilla de cálculo: Máximos Diarios, Relaciones I-D-T, Hietograma de Diseño y Decaimiento Areal.

La aplicación permite seleccionar coordenadas geográficas pertenecientes al territorio de la Provincia de Entre Ríos, y adoptar el pluviógrafo de referencia para efectuar la desagregación temporal de la tormenta y calcular o imprimir la ecuación intensidad-duración-recurrencia para el sitio de coordenadas especificadas, según se indica en la Figura 12.

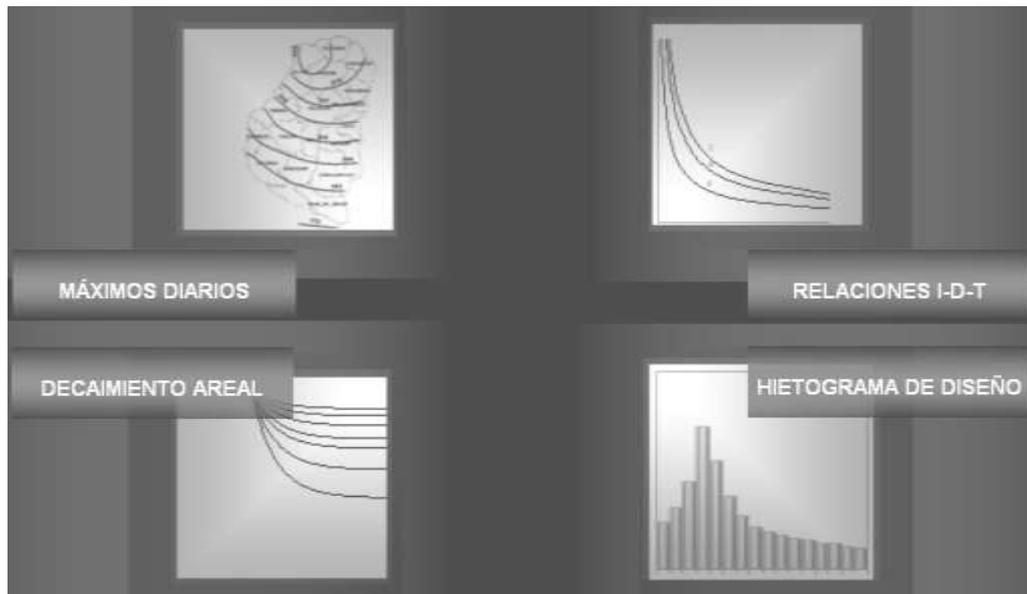


Figura 11. Menú Inicio de "Lluvias E.R."



Figura 12. Selección del pluviógrafo de referencia.

La opción HIETOGRAMA DE DISEÑO conduce al cálculo del patrón de distribución temporal de la tormenta y la evolución de lámina acumulada para distintos intervalos de tiempo.

El hietograma generado con el Método de Pilgrim representa el patrón de distribución correspondiente al pluviógrafo de referencia seleccionado, e indica los valores de precipitación (como porcentaje de la precipitación total) correspondientes a distintos

porcentajes de la duración total de la tormenta, tal como se muestra en la Figura 13.

La aplicación trabaja también con Hietogramas de Diseño derivados del Método de los Bloques Alternos, y permite la selección de las características principales del hietograma, como la amplitud del intervalo de tiempo asignado a cada bloque, y la posición del pico de máxima intensidad, como se muestra en la Figura 14.

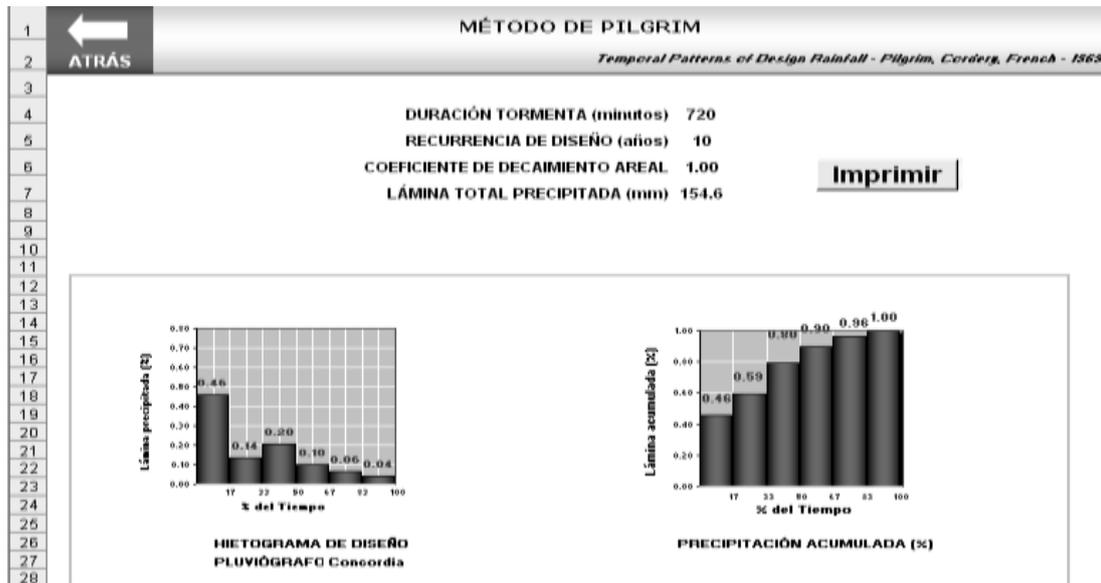


Figura 13. Método de Pilgrim.



Figura 14. Método de los Bloques Alternos.

CONCLUSIONES

Ha sido posible determinar la variación geográfica de la precipitación máxima diaria para los períodos de retorno usualmente empleados en el diseño de obras de pequeña y mediana escala, a partir de los registros pluviométricos disponibles.

Los índices de crecientes que resultan del promedio de los índices locales, no resultan significativamente diferentes de los que se calculan a partir de la distribución regional de frecuencia obtenida me-

dante la metodología desarrollada por Hosking y Wallis (1997).

La prueba de bondad de ajuste aplicada a la región comprueba que la distribución de frecuencia (GEV) es la misma que se obtuvo localmente en cada estación.

Se caracterizó el comportamiento de las tormentas intensas, en base a la actualización de las relaciones intensidad-duración-recurrencia de los pluviógrafos provinciales y de la definición de los patrones de distribución temporal para distintos rangos de dura-

ción de las precipitaciones.

Se ha generado una metodología a través de la cual se efectúa la transposición de tormentas en cualquier emplazamiento geográfico ubicado en el territorio de la Provincia, y que contempla las características pluviométricas y pluviográficas del punto de utilización.

Los resultados antes mencionados han sido incorporados y sistematizados en una herramienta de cálculo y dos sistemas de visualización de resultados que flexibilizan y permiten la consulta del trabajo de regionalización en 250 localidades de la Provincia de Entre Ríos.

REFERENCIAS

- Caamaño Nelli G. E. y Dasso C. M. 2003. Lluvias de Diseño – Conceptos, Técnicas y Experiencias. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Universitat – Editorial Científica Universitaria Argentina.
- Dalrymple T. 1960. “Manual of Hydrology, Part 3, Flood-Flow Techniques. Homogeneity Test” Geological Survey Water Supply, Paper 1543-A, Washington.
- García C. M. 2000. “Lámina de Lluvia Puntual para Diseño Hidrológico”. Tesis (Maestría en Ciencias de la Ingeniería, Mención Recursos Hídricos), Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina, 146 p.
- Greenwood J. A., Landwehr J. M., Matalas N. C. and Wallis, J. R. 1979. “Probability weighted moments: definition and relation to parameters of several distributions expressible in inverse form”. Water Resources Research., 15(5), 1049–1054.
- Hosking J. R. M. and Wallis J. R. 1997. Regional Frequency Analysis. An Approach Based on L-Moments. Cambridge University Press. New York.
- Hosking J. R. M. 2005. LMOMENTS: Fortran routines for use with the method of L-moments. IBM Research Divison, Yorktown Heights, N.Y., U.S.A.
- Medina L. y Moyano M. C. 1975. “Estudio piloto de lluvias intensas en la República Argentina”, Hidrología Cuaderno N°2, INCYTH. Buenos Aires, Argentina, 1-17.
- Olmos L. A., Ibáñez J. y Hartmann A. 2007. “Aplicación del Método del Índice de Crecientes en Lluvias Máximas Diarias de la Provincia de Santiago del Estero”. Instituto de Recursos Hídricos. Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías.
- Paoli C. U., Bolzicco J. E. A. y Cacik P. 1996. Análisis de Frecuencia de Variables Hidrológicas. Universidad Nacional del Litoral. Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas.
- Pérez M. M., Zamanillo E. A. y Larenze G. R. 2008. “Análisis de interiores y exteriores de tormenta para la Provincia de Entre Ríos”, III Jornadas de Difusión de Proyectos de Investigación y Extensión – INEX 2008. Universidad Nacional de Entre Ríos, Concepción del Uruguay, Argentina, 28 de septiembre de 2008.
- Pilgrim D. H., Cordery I. and French R. H. 1977. Australian rainfall and runoff, Flood Analysis and Design, The Institution of Engineers, Bloxham and Chambers PTY LTD., Australia, 3-59.
- Salas J. D., Delleur J. W., Yevjevich V. and Lane W. L. 1980. Applied Modelling of Hydrologic Time Series. Water Resources Publications.
- Zamanillo E. A., Larenze G. R., Tito M. J., Pérez M. M., Garat M. E. y Gómez P. C. 2008a. “Regionalización de Precipitaciones Máximas Diarias para la Provincia de Entre Ríos”. Segundo Congreso Internacional sobre Gestión y Tratamiento Integral del Agua. Córdoba, 5 a 7 de Noviembre de 2008.
- Zamanillo E. A., Larenze G. R., Tito M. J., Pérez M. M. y Garat M. E. 2008b. Tormentas de Diseño para la Provincia de Entre Ríos, Primera Edición, Universidad Tecnológica Nacional, Argentina, (2008).

Artículo recibido el 08/2009 y aprobado para su publicación el 12/2009.