

Regionalización de Precipitaciones Máximas Diarias para la Provincia de Entre Ríos

Eduardo A. Zamanillo, Gustavo R. Larenze, María J. Tito, Patricia Gómez
Grupo de Investigación en Hidrología e Hidráulica Aplicada
Facultad Regional Concordia, Universidad Tecnológica Nacional
Salta 277 (E3200EKE) Concordia, Entre Ríos, Argentina
Teléfono / Fax: 0054 0345 421 4590 – Correo electrónico: gihha@frcon.utn.edu.ar

Resumen - Se presentan los resultados de la regionalización de precipitaciones máximas en la Provincia de Entre Ríos, incluyendo una descripción sintética de la metodología de regionalización adoptada, del proceso de recopilación y análisis estadístico de los datos pluviométricos, y de la elección de la distribución de probabilidad teórica. Como resultado se muestran los mapas de isohietas de precipitaciones máximas diarias para recurrencias de 2 a 50 años.

Palabras Claves: Regionalización, Precipitación Máxima, Análisis de Frecuencia

Regionalization of Maximum Rainfalls for the Entre Ríos Province

Abstract – The results of the Maximum Rainfalls Regionalization in the Entre Ríos Province are presented, including a synthetic description of the adopted regionalization methodology, the collection process and statistical analysis of the daily rainfall data, and the choice of the theoretical probability distribution function. As a result, the maps of maximum daily rainfalls for return periods from 2 to 50 years are shown.

Keywords: Regionalization, Maximum Rainfall, Frequency Analysis

INTRODUCCIÓN

El diseño y operación de las obras de infraestructura relacionadas con los recursos hídricos están directamente vinculados a la tormenta de proyecto que en algún momento futuro generará las máximas solicitaciones sobre las mismas.

Para que la precipitación pueda ser utilizada en la estimación de crecientes de proyecto es necesario realizar un análisis que relacione la intensidad de la lluvia con la duración y con la recurrencia de la tormenta en el lugar de interés.

En el caso de la provincia de Entre Ríos, existen pocas estaciones pluviográficas con registros sistemáticos de longitud suficiente, sobre los cuales puede desarrollarse este análisis, sin embargo se cuenta con una importante red de estaciones pluviométricas, que proveen totales diarios de lluvia.

A su vez, es posible aprovechar la información pluviométrica existente y combinarla a nivel regional con los registros pluviográficos disponibles para la determinación de tormentas de proyecto.

Este criterio es ampliamente utilizado en los países desarrollados. En todos ellos existen manuales de uso corriente en el área de ingeniería hidrológica que permiten la estimación de tormentas de proyecto a partir del resultado de la regionalización de precipitaciones máximas diarias.

Por esta razón, se procedió a efectuar el análisis regional de frecuencia de las precipitaciones máximas diarias en la Provincia de Entre Ríos, cuyos principales resultados se resumen en este trabajo.

DESARROLLO

Las principales etapas del trabajo de regionalización de precipitaciones máximas diarias, incluyen una descripción de 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 el método de análisis regional de frecuencia adoptado.

Recopilación y selección de estaciones

Se recopiló la información pluviométrica existente, generándose una base de datos constituida por estaciones

ESTACIÓN	LAT.	LONG.
1. GUALEGUAYCHÚ AERO	-33.000	-58.617
2. ISLETAS	-32.217	-60.350
3. CRUCESITAS III	-32.127	-59.699
4. HERNANDEZ	-32.338	-60.027
5. FEBRE	-32.467	-59.917
6. SAUCE VIEJO AERO	-31.700	-60.817
7. PARANÁ AERO	-31.783	-60.483
8. COLÓN	-32.217	-58.150
9. PAYSANDÚ	-32.350	-58.033
10. C. DEL URUGUAY INTA	-32.483	-58.333
11. GILBERT	-32.530	-58.932
12. VILLAGUAY	-31.850	-59.083
13. SAN SALVADOR	-31.633	-58.500
14. LOS CHARRÚAS	-31.181	-58.183
15. CONCORDIA AERO	-31.300	-58.017
16. EL YUQUERÍ	-31.383	-58.117
17. PASO JUNCUE	-30.350	-59.250
18. SAN GUSTAVO	-30.691	-59.387
19. LA PAZ	-30.747	-59.607
20. BANDERAS	-30.825	-59.234
21. EC-YESO Oeste	-30.857	-59.379
22. SAN JAIME	-30.333	-58.300
23. PEDRO VALLEJOS	-31.245	-59.745
24. COLONIA AVIGDOR	-31.184	-59.401
25. MERCEDES (URUGUAY)	-33.250	-58.067
26. CASTELAR INTA	-34.667	-58.650
27. PERGAMINO INTA	-33.933	-60.550
28. SAN PEDRO INTA	-33.683	-59.683
29. OLIVEROS INTA	-32.550	-60.850
30. ROSARIO AERO	-32.917	-60.783
31. ZAVALLA	-33.017	-60.883
32. EST. LA ESPERANZA	-30.200	-58.283
33. MERCEDES INTA	-29.167	-58.017
34. M. CASEROS AERO	-30.267	-57.650
35. PASO DE LOS LIBRES AERO	-29.683	-57.150
36. COLONIA	-34.450	-57.850
37. RECONQUISTA	-29.183	-57.150

Tabla 2.- Estaciones pluviométricas seleccionadas Longitud de registro: 1976-2005

Con el objeto de definir y comprobar testear la metodología de procesamiento de la información pluviométrica diaria se realizó la calibración del análisis estadístico. Para ello se seleccionó 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 realizó 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. La Figura 2 muestra un ejemplo del ajuste gráfico para la localidad de Concordia, indicando la variación de las distribuciones de probabilidad teóricas seleccionadas y de la frecuencia experimental en función del período de retorno.

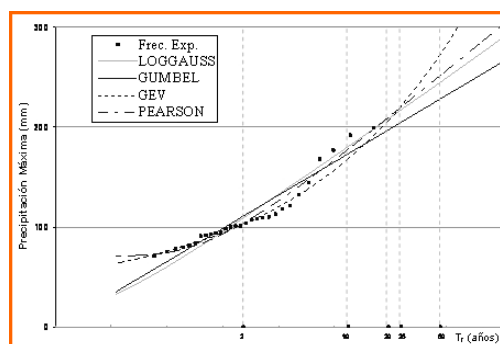


Fig. 2.- Análisis de frecuencia Concordia (1976-2005)

De las cuatro distribuciones teóricas de probabilidad seleccionadas, las dos 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 Extremos (GEV) está indicada en la Ecuación (1) (Chow V. *et al.*, 1994).

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

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 M_j (Paoli C. *et al.*, 1996):

$$M_j = \frac{1}{n} \sum x_i \cdot F_i^j \quad (2)$$

En estas expresiones F_i es una frecuencia empírica o posición de muestreo definida por Landwehr (1979) como:

$$F_i = \frac{i - 0,35}{n} \quad (3)$$

Siendo x_i cada uno de los n valores de la muestra, ordenados de manera ascendente.

De esta forma, los momentos ponderados por probabilidad quedan determinados por las ecuaciones (4) a (6).

$$M_0 = \frac{1}{n} \sum x_i \cdot F_i^0 \quad (4)$$

$$M_1 = \frac{1}{n} \sum x_i \cdot F_i \quad (5)$$

$$M_2 = \frac{1}{n} \sum x_i \cdot F_i^2 \quad (6)$$

Los parámetros de forma (k), escala (α) y ubicación (x_0) de la GEV quedan expresados según:

$$k = 7,859c - 2,95554c^2 \quad (7)$$

donde c , viene dado por la ecuación (8)

$$c = \left(\frac{2M_1 - M_0}{3M_2 - M_0} \right) - \frac{\ln 2}{\ln 3} \quad (8)$$

$$\alpha = \frac{(2M_1 - M_0) \cdot k}{\Gamma(1+k) \cdot (1 - 2^{-k})} \quad (9)$$

$$x_0 = M_0 + \frac{\alpha \cdot (\Gamma(1+k) - 1)}{k} \quad (10)$$

siendo $\Gamma(I + k)$ el valor de la función Gamma en $I + k$.

La Función de Distribución Gumbel está definida en la ecuación (11) (Chow V. *et al.*, 1994).

$$F(x) = e^{-e^{\left(\frac{x-x_0}{\alpha}\right)}} \tag{11}$$

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

Los Momentos ponderados por Probabilidad M_k (Landwehr *et al.*, 1979) responden a las ecuaciones (12) a (14):

$$M_k = \frac{1}{n} \sum x_i \cdot (1 - F_i)^k \tag{12}$$

$$M_0 = \frac{1}{n} \sum x_i = \mu \tag{13}$$

$$M_1 = \frac{1}{n} \sum x_i \cdot \frac{n-i}{n-1} \tag{14}$$

Los parámetros de escala (α) y ubicación (x_0) de la Distribución Gumbel, expresados en función de los MPP resultan:

$$\alpha = \frac{(M_0 - 2M_1)}{\ln 2} \tag{15}$$

$$x_0 = M_0 - 0,577\alpha \tag{16}$$

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 (*ECMV*) dividida por el tamaño de la muestra (n).

El Criterio de información de Akaike (*AIC*) (Salas, 1980), definido por la ecuación (17), combina el *ECMV*, el total p de parámetros de la distribución que va ser ajustada y la longitud n de la serie.

$$AIC(p) = n \cdot \ln(ECMV^2) + 2p \tag{17}$$

El criterio de información de Akaike pondera la varianza residual y el número de parámetros p 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 la Tabla 3 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.

CRITERIO	DIST.	E. Ríos	Externas
ECM VARIABLE	GUMBEL	6,81	8.31
	GEV	6.03	7.27
ECM FRECUENCIA	GUMBEL	0.04	0.05
	GEV	0.03	0.04
AIC(p) VARIABLE	GUMBEL	94.28	112.30
	GEV	91.77	118.4

Tabla 3.- Valor promedio de los indicadores de Bondad de Ajuste

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.

Análisis regional de frecuencia

El análisis regional de frecuencia utiliza el conjunto de datos espacialmente distribuidos en puntos de una región considerada homogénea para estimar los cuantiles asociados a diferentes probabilidades de excedencia en un punto cualquiera dentro de esa región.

La condición de Homogeneidad Hidrológica fue verificada para las estaciones seleccionadas utilizando el Test de Langbein Dalrymple *et al.* (1960).

Este test está basado en la determinación de la desviación estándar de las estimaciones de la variable reducida y de la Función de Distribución Gumbel, determinada por la ecuación (18):

$$2\sigma_y = 2 \cdot \frac{e^y}{\sqrt{n}} \cdot \sqrt{\frac{1}{(T-1)}} \tag{18}$$

Siendo *n* la longitud de la serie en años, *T* el período de retorno (en años), *y* es la variable reducida de Gumbel, y es función del tiempo de retorno *T*.

El test se realiza para un período de retorno de *T*=10 años, debido a que es el mayor período de retorno para el cual en la mayoría de los casos se obtienen estimaciones confiables, y para el cual el valor de la variable reducida *y* es igual a 2,25.

Se asume que σ_y se distribuye normalmente, por lo cual el 95% de las estimaciones deben estar comprendidas entre $\pm\sigma_y$ del valor más probable.

Por lo tanto, los límites de confianza al 95% quedan determinados por $2,25 \pm 6,3 \cdot \sqrt{n}$. Los correspondientes períodos de retorno *T* límites (en años) se indican en la Tabla 4 (Dalrymple 1960).

<i>n</i> (años)	<i>y</i>	<i>2σ</i>	<i>Lím. Inf.</i>		<i>Lím. Sup.</i>	
			<i>y - 2σ</i>	<i>T</i>	<i>y + 2σ</i>	<i>T</i>
5	2.25	2.83	-0.58	1.20	5.08	161.07
10	2.25	2.00	0.25	1.85	4.25	70.62
20	2.25	1.41	0.84	2.84	3.66	39.53
50	2.25	0.89	1.36	4.40	3.14	23.71

Tabla 4.-Límites de confianza del Test de Langbein

La homogeneidad hidrológica se comprueba determinando la precipitación para períodos de retorno de 10 y 2,33 años y realizando el cociente entre estos valores para obtener un valor medio característico de la región. Olmos *et al.* (2007)

Posteriormente se procede a obtener una *P*₁₀ corregida para cada estación, la cual se determina multiplicando *P*_{2,33} por el promedio de los cocientes.

A partir de los parámetros de forma, ubicación y escala de la distribución GEV se determinan los períodos de retorno de *P*₁₀ corregida en cada estación, los cuales se grafican en función de la longitud de registro de su estación (en años).

Según se presenta en la Figura 3, los puntos correspondientes a los períodos de retorno corregidos quedaron ubicados dentro de los límites de confianza indicados en la Tabla 5 para las 37 estaciones seleccionadas, considerándose a la región homogénea desde el punto hidrológico. Partiendo de este resultado, se procedió a efectuar el análisis regional de frecuencia de precipitaciones máximas diarias.

La regionalización de las precipitaciones máximas diarias se realizó utilizando el Método del Índice de Crecientes (Index Flood Method), uno de los métodos regionales más difundidos (Olmos *et al.*, 2007).

El mismo supone que los máximos anuales de precipitación en un conjunto de estaciones que pertenecen a

una región homogénea poseen distribuciones idénticas excepto por un factor de escala propio de cada estación.

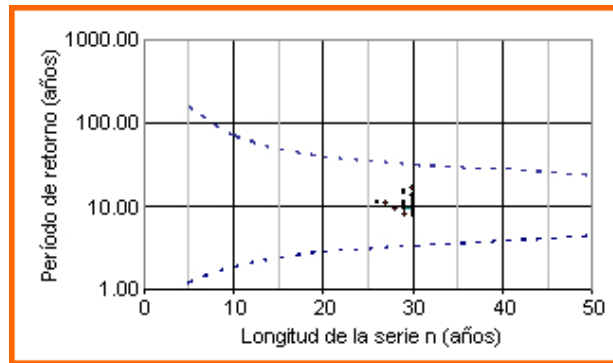


Fig. 3.- Límites de confianza del test de Langbein

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

Tabla 5.- Índices de creciente regionales

De esta forma, el máximo anual X_j en una estación j de la región puede expresarse como:

$$X_j = \mu_j \cdot \eta \tag{19}$$

Expresión donde el factor de escala μ_j es una constante particular de cada estación y el índice de crecientes η 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 diarios. Por tal motivo, se regionalizó la Precipitación Máxima Media PM para duraciones iguales a 1, 2, 3 y 4 días, que se presentan en los mapas de isohietas indicados en la Figura 4 (Zamanillo *et al.* 2008).

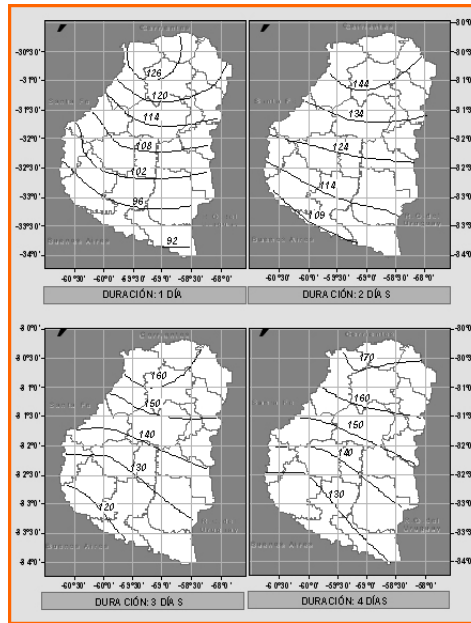


Fig. 4.- Isohietas de valores medios de precipitaciones máximas P_M (mm)

La adimensionalización de las series se llevó a cabo dividiendo cada valor de la misma P_{Tj} (para $T = 2, 5, 10, 20, 25$ y 50 años) por el factor μ_j , siendo $\mu_j = P_M$ la media de los máximos diarios de cada estación y P_{Tj} la precipitación Máxima para el periodo 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:

$$\eta_j = \frac{P_{Tj}}{P_{Mj}} \tag{20}$$

Se determinó el Índice de crecientes regional adoptando el promedio de los cocientes correspondientes a las estaciones seleccionadas. La Tabla 5 presenta los valores correspondientes para cada duración y recurrencia de diseño.

El uso combinado de la Tabla 6 y la Figura 4 permite estimar en cada punto de la Provincia la Precipitación Máxima P_T (mm) asociada a un período de retorno T (años) para duraciones de 1, 2, 3 y 4 días.

Aplicación de cálculo de tormentas de diseño

Para caracterizar la variación geográfica de la lluvia de proyecto resulta necesario disponer de herramientas flexibles que faciliten la visión integral de los principales parámetros involucrados.

A tal efecto se generó una aplicación de cálculo que permite determinar la evolución de la lámina máxima acumulada en función del período de retorno, para cualquier coordenada geográfica ubicada en el ámbito de la Provincia de Entre Ríos.

La aplicación incluye también un acceso a los mapas de isohietas de máximos diarios para duraciones iguales a 1, 2, 3 y 4 días para períodos de retorno iguales a 2, 5, 10, 20, 25 y 50 años.

En la Figura 5 se muestra la hoja destinada al ingreso de coordenadas geográficas, mientras que la Figura 6 presenta la salida correspondiente a dichas coordenadas, donde se puede visualizar la gráfica de lámina acumulada vs. período de retorno.

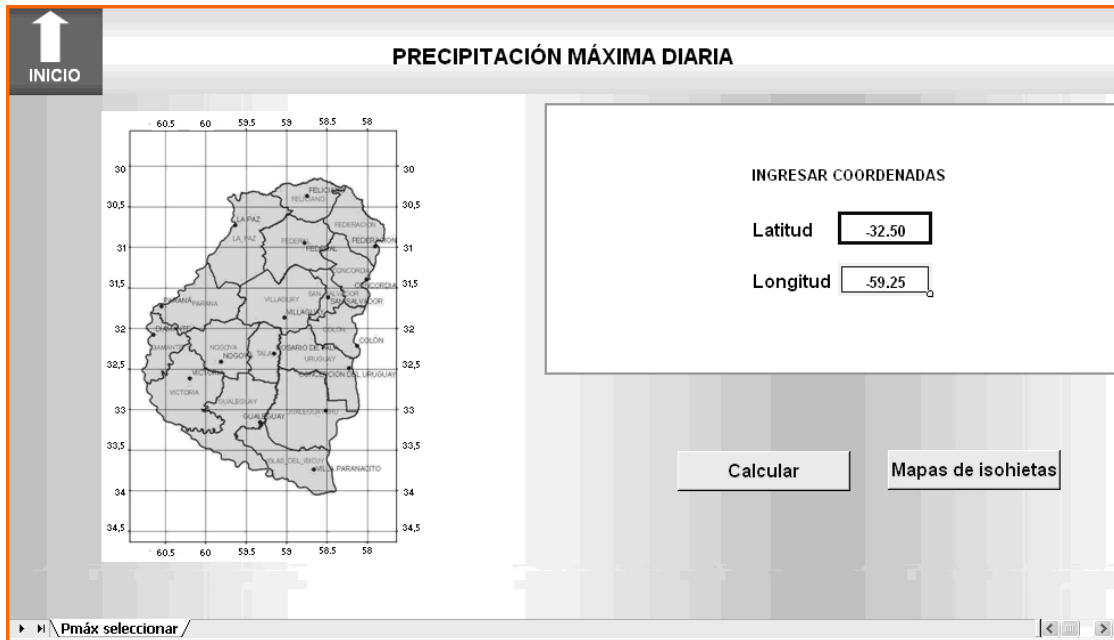


Fig. 5.- Selección de coordenadas geográficas.

Combinando este resultado con las características pluviográficas del punto de utilización es posible caracterizar la tormenta de proyecto que solicitará a las obras hidráulicas para los períodos de retorno analizados.

Combinando este resultado con las características pluviográficas del punto de utilización es posible caracterizar la tormenta de proyecto que solicitará a las obras hidráulicas para los períodos de retorno analizados.

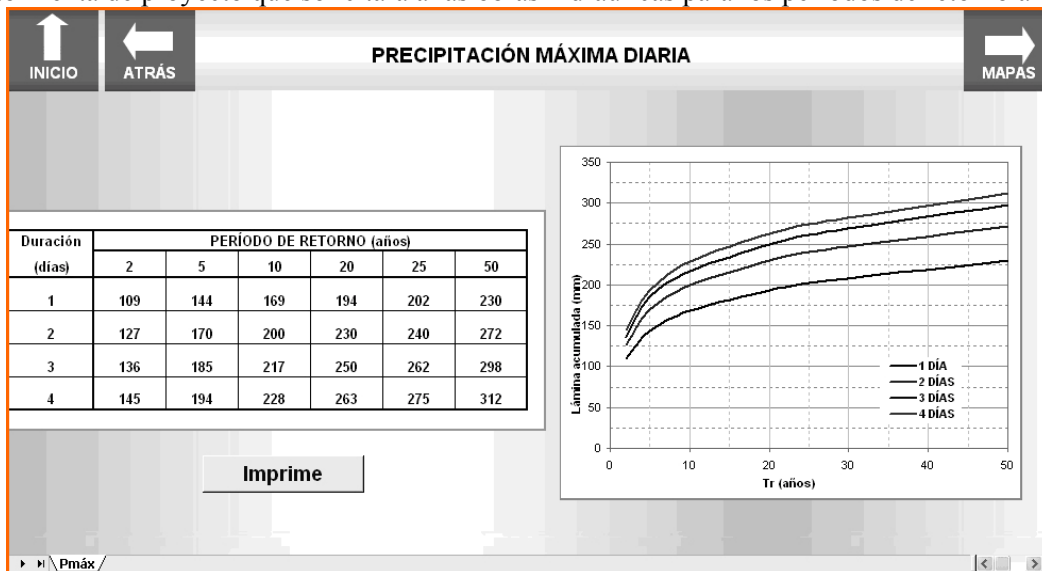


Fig. 6.- Cálculo de la precipitación máxima diaria para las coordenadas especificadas.

Sistemas de información

Se incorporaron los resultados de la regionalización de precipitaciones máximas a dos versiones de consulta: el Sistema de Información Geográfica que utiliza la plataforma ArcExplorer, denominado RegPrec-Max.axl, y su versión en formato HTML.

Los mismos fueron diseñados para facilitar la visualización y consulta de resultados en 250 localidades de la Provincia.

La Figura 7 presenta la Ventana Principal del Proyecto RegPrecMax. 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.

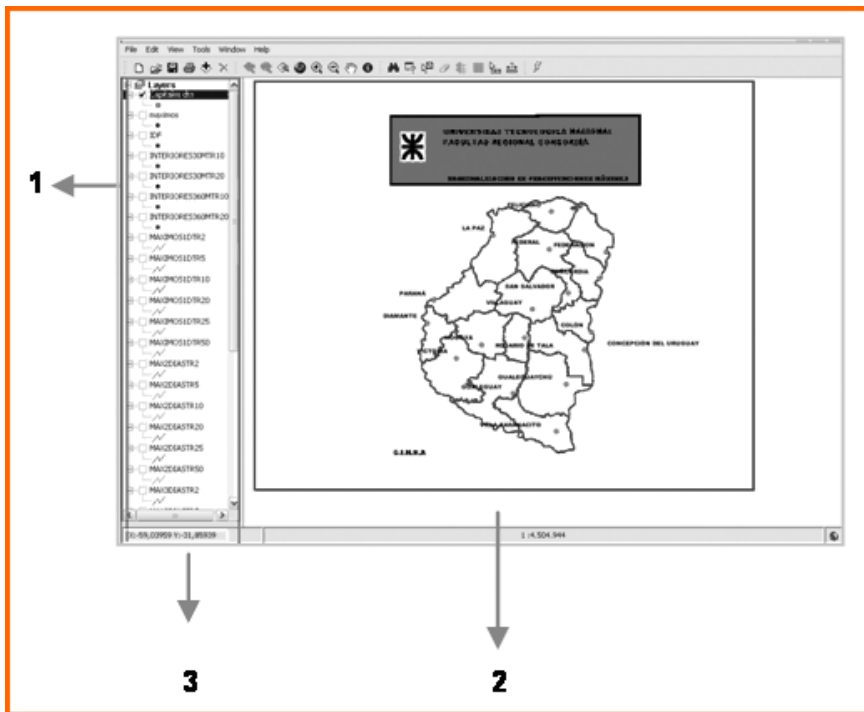


Fig. 7.- Reg. Prec. Max. - Ventana principal

Para determinar la precipitación máxima diaria correspondiente a distintos períodos de retorno, se debe marcar previamente la capa MAXIMOS y luego ubicar la localidad de la cual se desea obtener la información.

Como ejemplo, la Figura 8 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.

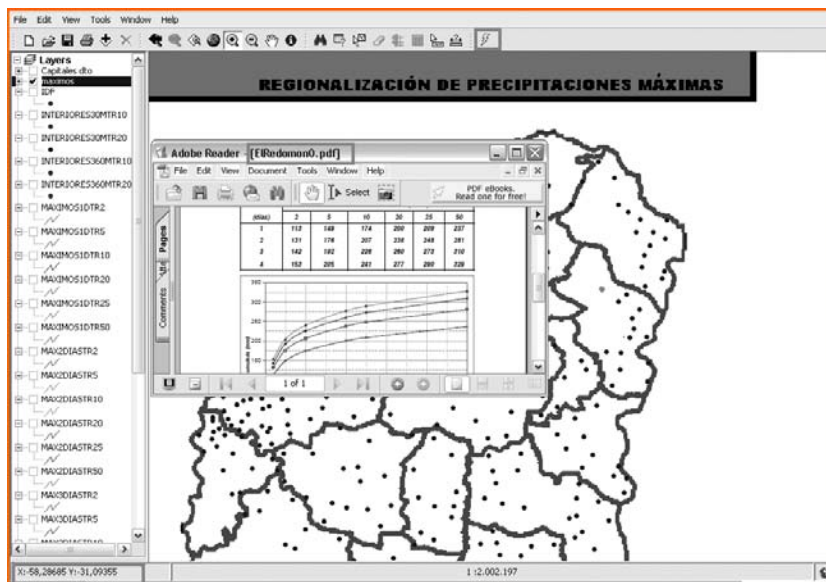


Fig. 8.- RegPrecMax - Máximos Diarios

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

AGRADECIMIENTOS

A la Dirección Provincial de Hidráulica, al INTA y al Servicio Meteorológico Nacional por el suministro de información indispensable. A los becarios del Proyecto.

REFERENCIAS

Zamanillo Eduardo A., Larenze Gustavo R., Tito María J., Pérez Martín M., Garat María E., Gómez Patricia, "Tormentas de Diseño para la Provincia de Entre Ríos", Primera Edición, Universidad Tecnológica Nacional, Argentina, (2008).

Paoli Carlos U., Bolzicco José E. A. y Cacik Pablo, "Análisis de Frecuencia de Variables Hidrológicas", Universidad Nacional del Litoral, Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, (1996).

Chow, V.T., Maidment, D.R., Mays, L.W. – "Hidrología Aplicada". Mc Graw – Hill Interamericana S.A. Bogota. Colombia. 1994

Landwehr J. M., Greenwood J. A., Matalas N. C. and Wallis J. R., "Probability weighted moments: definition and relation to parameters of several distributions expressible in inverse form". Water Resources Research, 15(5), 1049-1054 (1979).

Salas J. D., Delleur J. W., Yevjevich V. y Lane W. L., "Applied Modelling of Hydrologic Time Series", Water Resources Publications, Littleton, Colorado, USA, (1980).

Dalrymple Tate, "Manual of Hidrology, Part 3, Flood-Flow Techniques" Geological Survey Water-Supply Paper, 1543-A, U. S. Cover Printing Office, Washington, (1960)

Olmos L. A., Ibáñez J., Hartmann A., "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, (2007).

Zamanillo Eduardo A., Larenze Gustavo R., Tito María J., Pérez Martín M., Garat María E., Gómez Patricia, "Regionalización de Precipitaciones Máximas Diarias para la Provincia de Entre Ríos", II Congreso Internacional sobre Gestión y Tratamiento Integral del Agua, Córdoba, 5 a 7 de Noviembre de 2008.