

## **APROXIMACIÓN BAYESIANA PARA LA ESTIMACION DE OCURRENCIAS DE EVENTOS LLUVIOSOS APLICADA A BALANCES HIDRICOS MENSUALES SERIADOS.**

Dr. Erik Zimmermann

Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales. Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Universidad Nacional de Rosario. Riobamba 245 bis (2000) Rosario. Santa Fe. Argentina

Email: erikz@fceia.unr.edu.ar

### **PALABRAS CLAVES: BALANCES HÍDRICOS MENSUALES, APROXIMACIÓN BAYESIANA, INFILTRACIÓN NETA**

#### **RESUMEN**

El balance hídrico mensual de Thornthwaite y Mather constituye una herramienta sencilla y frecuentemente aplicable para estimar excedentes de agua que no son almacenados en el perfil del suelo. Combinándolo con el método empírico del US-SCS, el cual se aplica a láminas diarias de lluvia, es posible deducir de los excedentes la porción destinada al escurrimiento, y así, por diferencia estimar la infiltración neta que alimentaría un acuífero freático. Para poder aplicar ambos métodos en forma serial durante una secuencia de años es necesario pronosticar el número de eventos de lluvia y la lámina caída en cada evento. En este trabajo se propone, en primera instancia, una metodología basada en el teorema de Bayes para estimar el número de ocurrencias de eventos lluviosos en un mes considerado condicionando el pronóstico a la lámina mensual. El algoritmo fue aplicado en cuatro estaciones de la región meridional de Santa Fe, obteniéndose resultados satisfactorios al compararse más de 2000 pronósticos de ocurrencias de lluvia con los registros observados.

#### **ABSTRACT**

The Thornthwaite and Mather water budget constitute a simple and frequently applicable tool to estimate surpluses of water that they are not stored in the soil profile. Combining it with the empiric method of the US-SCS, which is applied to daily rainfall records, is possible to deduce from the surpluses the portion dedicated to the runoff, and this way, for difference to estimate the net infiltration that would recharge a phreatic aquifer. In order to apply both methods in serial form during a sequence of years it is necessary to predict the number of rain events and the rainfall depth in each event. In this work is proposed, firstly, a methodology based on the theorem of Bayes to estimate the number of occurrences of rainy events in a considered month conditioning the forecast to the monthly rainfall. The algorithm was applied in four stations of the southern region of Santa Fe province (Argentina), obtaining satisfactory results when was compared more than 2000 forecasts of rain occurrences with the observed registrations.

#### **INTRODUCCIÓN**

En la mayoría de las situaciones, la información disponible para estimar valores de recarga en acuíferos freáticos es escasa, lo cual impide la aplicación de métodos directos de evaluación (ej. análisis de fluctuaciones de niveles freáticos, balances hídricos localizados, técnicas isotópicas, etc.). Es aquí donde cobran relevancia las metodologías sencillas que insumen información frecuentemente disponible. El método de balance hídrico de Thornthwaite, el cual requiere datos de temperaturas y precipitaciones medias mensuales,

es un ejemplo de ello. El método puede utilizarse para estimar la infiltración neta, la cual puede definirse como la cantidad de agua que anualmente percola por la zona no saturada hacia el acuífero, previa deducción de la porción de agua que escurre superficialmente y la que se evapotranspira. La infiltración neta se corresponde aproximadamente con el total de la recarga subterránea.

La metodología de Thornthwaite y Mather contempla la estimación de la evapotranspiración mensual y el escurrimiento superficial mensual puede estimarse aplicando el método de la curva número del Servicio de Conservación de Suelos

(USDA-SCS). Existen antecedentes previos de aplicación conjunta de ambos métodos, dando lugar al balance modificado de Thornthwaite-Mather (Scozzafava and Tallini 2001, D'Elía *et al* 2002, Paris *et al* 2002).

El balance hídrico mensual de Thornthwaite puede aplicarse en condiciones medias (balance medio anual) como así también en forma de balances seriados, utilizando información mensual secuencial a lo largo de una serie de años. Esta última forma de aplicarse permite una estimación seriada de las variables del balance en las serie de años analizada y de sus desviaciones respecto a los valores medios, lo cual es muy importante a la hora de pronosticar evoluciones en el tiempo.

En la aplicación del balance modificado en forma seriada, considerando que la metodología de la curva número se aplica a eventos aislados y no a láminas de lluvia mensual, se requiere de la siguiente información: (a) el número de eventos lluviosos ocurridos en cada mes y (b) la lámina precipitada en cada uno de ellos.

Dado que esta información con frecuencia es difícil de obtener se propone aquí, en primera instancia y para resolver el apartado (a) anterior, una metodología basada en el teorema de Bayes para estimar el número de ocurrencias de eventos lluviosos condicionado a la lámina de lluvia mensual.

## BALANCE HÍDRICO MENSUAL PARA ESTIMAR LA INFILTRACION NETA

### Método de Thornthwaite y Mather

En la ecuación de balance hídrico se utiliza el método de Thornthwaite para evaluar las evapotranspiraciones potencial y real. La evapotranspiración potencial (ETP, in mm) se define como el máximo valor obtenible de evapotranspiración en condiciones de humedad en capacidad de campo en el suelo. La ETP se relaciona con la temperatura de la siguiente manera (Thornthwaite and Mather 1957):

$$ETP = 16 \left( 10 \frac{t}{I} \right)^a$$

donde  $t$  es la temperatura media mensual ( $^{\circ}\text{C}$ );  $I$  es el índice térmico anual, obtenido como:

$$I = \sum_{j=1}^{12} i_j$$

donde  $i_j$  es el índice térmico mensual de el mes  $j$ :

$$i_j = \left( \frac{t}{5} \right)^{1.514}$$

y el exponente  $a$  en la primera ecuación se calcula como:

$$a = 0.000000675 \times I^3 - 0.0000771 \times I^2 + 0.01792 \times I + 0.4924$$

La evapotranspiración real (ETR) se evalúa en tres casos diferentes, como se describe debajo. En las ecuaciones siguientes,  $j$  es el mes actual y  $(j-1)$  el mes del antecedente. El almacenamiento máximo del suelo (RM) es la humedad del suelo sustrayendo el agua gravitatoria. RM es una constante para cada suelo y es una función de la textura, estructura, mineralogía del sedimento, etc.).  $H_j$  es la cantidad de agua almacenada en el suelo durante el mes actual ( $j$ ), y  $P$  es la precipitación.

### Caso 1

Cuando  $P_j - ETP_j > 0$ , y la reserva se encuentra colmatada ( $H_{j-1} = \text{RM}$ ) entonces:

$$ETR_j = ETP_j$$

y

$$H_j = H_{j-1} = \text{RM}$$

En este caso, la infiltración neta ( $\text{IN}_j$ ) es:

$$\text{SR} = \text{IN}_j + Q_j = P_j - ETR_j$$

donde SR es el sobrante de agua en el suelo y Q es el escurrimiento. En el método de Thornthwaite estándar, el cual es usado por agrónomos SR se introduce sin distinción entre Q y IN.

### Caso 2

Cuando  $P_j - ETP_j < 0$ , entonces:

$$ETR_j = \frac{H_j}{\text{RM}} ETP_j$$

$$H_j = H_{j-1} + (P_j - ETR_j)$$

ó

$$H_j = \frac{RM}{RM + ETP_j} (H_{j-1} + P_j)$$

$$ETR_j = \frac{ETP_j}{RM + ETP_j} (H_{j-1} + P_j)$$

En este caso, SR es nulo.

### Caso 3a

Cuando  $P_j - ETP_j > 0$  y  $H_j < RM$ , las ecuaciones del caso 2 son válidas y SR es igual a cero. Sin embargo, si se usan estas ecuaciones, resultando  $H_j > RM$ , al ser ésta una condición que no ocurre en la Naturaleza, es necesario considerar el Caso 3b:

### Caso 3b

$$H_j = RM$$

y

$$ETR_j = ETP_j$$

y de nuevo

$$SR = P_j - ETR_j > 0$$

### Modificación del método de Thornthwaite

Scozzafava y Tallini (2001) propusieron un cambio al método de Thornthwaite y Mather para determinar la contribución exclusiva de la infiltración neta (IN), resultado que no puede lograrse con el método estándar. Allí, el sobrante de agua (SR) se refiere a todo el exceso de agua que no tiene por destino la humedad del suelo, sin distinguir la infiltración neta del escurrimiento. Para diferenciar las dos contribuciones, los autores, propusieron estimar el escurrimiento (Q) con el método de SCS-CN. El valor de Q así estimado se sustrae a la lluvia total (P) y el balance de agua se computa en base a un valor de lluvia ficticia (PF) que es igual a  $P - Q$ . La PF es la cantidad de agua disponible para la infiltración neta y para la evapotranspiración real. De esta manera, las ecuaciones anteriores acerca del cálculo de SR en tres casos diferentes son válidas

para IN, cuando Q ya se ha sustraído. Esas fórmulas son usadas introduciendo la infiltración neta en lugar del sobrante de agua (SR) y el valor de lluvia ficticia (PF) en lugar de lluvia total (P):

$$IN_j = PF_j - ETR_j \text{ (casos 1, 3b); } IN_j = 0 \text{ (casos 2, 3a)}$$

### Método del SCS-CN

El CN es un parámetro entero en el rango de 0-100. Su variación tiene en cuenta varios factores, incluyendo el tipo de suelo (espesor, textura, estructura, humedad, etc.), uso de la tierra y pendiente.

En el método del CN, se propone una fórmula de base empírica, contrastada con mediciones en parcelas experimentales, que permite cuantificar la máxima capacidad que tiene el complejo suelo-vegetación de almacenamiento instantáneo de humedad (S) durante un evento de precipitación dado:

$$S = \left( \frac{25,400}{CN} \right) - 254$$

donde S es una función de CN (USDA-SCS 1986). Usando la ecuación previa, el escurrimiento (Q) se calcula como sigue:

$$\begin{aligned} Q &= 0 && \text{if } P < 0.2S \\ Q &= (P - 0.2S)^2 / (P + 0.8S) && \text{if } 0.2S < P < 4.2S \\ Q &= P - S && \text{if } P > 4.2S \end{aligned}$$

donde P es lluvia acumulada en un evento.

En este caso, el CN es  $CN_{II}$  el cual corresponde a una condición de humedad de antecedente media en el suelo (Hawkins et al. 1985; Boughton 1989). El método contempla otras condiciones antecedentes de humedad ( $CN_I$  y  $CN_{III}$ ). En períodos lluviosos es conveniente evaluar el escurrimiento con  $CN_{III}$ , que es el mayor de los tres valores; en períodos secos,  $CN_I$  es el más adecuado.  $CN_{III}$  y  $CN_I$  se obtienen en función de  $CN_{II}$  mediante las ecuaciones siguientes (Boughton 1989, Chow *et al* 1994):

$$\begin{aligned} CN_I &= CN_{II} / (2.334 - 0.01334 \times CN_{II}) \\ CN_{III} &= CN_{II} / (0.4036 - 0.0059 \times CN_{II}) \end{aligned}$$

La aplicación correcta del método de CN requiere una elaboración de la distribución estadística de eventos lluviosos para mejorar la evaluación del escurrimiento.

Dado que el procedimiento de Thornthwaite utiliza como datos disponibles la precipitación mensual, es necesario conocer el número de días lluviosos por mes y la lámina de lluvia por cada evento.

Sozzafava y Tallini (2001) proponen una distribución estadística del tipo exponencial para estimar las láminas de lluvia de n eventos, según la siguiente expresión:

$$P_n = a \times n^b$$

donde  $P_n$  (mm) es la precipitación para un evento de lluvia,  $n = 1..N$ , siendo N el número de eventos de lluvia del mes considerado, a y b ( $b > 1$ ) son constantes a ajustar en función de la lámina precipitada en el mes.

Considerando esto, queda por estimar el número N de eventos mensuales para aplicar el método del CN en forma seriada a lo largo de una secuencia de años. A continuación se describe la metodología propuesta en este trabajo.

#### APROXIMACIÓN BAYESIANA PARA LA ESTIMACION DEL NUMERO MENSUAL DE OCURRENCIAS DE EVENTOS LLUVIOSOS.

Suponemos tener valores de precipitación mensual, P, y un número al azar de eventos de lluvia N, en el mes considerado, el cual debe vincularse con P.

Suponemos también conocidas la probabilidad *a priori* del número de eventos para el mes dado  $f(N)$ . Al respecto, se podría adoptar una función de distribución de probabilidad para N, ajustada para cada mes de año. Ahora, el pronóstico mejoraría si se utiliza una información adicional disponible: la precipitación mensual P.

Suponemos conocida la densidad de probabilidad condicional  $f(P|N)$  correspondiente al monto de lluvia mensual asociado al número de eventos N. Entonces, según el teorema de Bayes puede determinarse la probabilidad *a posteriori*,  $f(N|P)$ , de la siguiente manera:

$$f(N|P) = \frac{f(P|N)f(N)}{f(P)} \quad (1)$$

siendo  $f(P)$  la probabilidad que la precipitación del mes dado sea P. Según el teorema de probabilidades totales, se tiene que:

$$f(P) = \sum_{j=1}^{N_{max}} f(P|N_j)f(N_j) \quad (2)$$

donde  $N_{max}$  es un número del máximo de eventos posible durante un mes que se analiza.

El problema es que normalmente ni la probabilidad *a priori* de que el número de eventos sea N,  $f(N)$  ni la probabilidad condicional  $f(P|N)$  son conocidas.

Todorovic (1967) estableció una función de distribución de eventos de lluvia del tipo Poisson. Esta propuesta es compartida por muchos investigadores: Eagleson (1972), Cox e Isham (1994), Arnaud y Lavabre (1999), Vanlesberg y Silber (1999), entre otros.

Entonces, dado un periodo de tiempo de un mes en el cual se registran muestras de N tormentas, y dado el número medio de eventos,  $\lambda_1$ , la función de la distribución de N del tipo de Poisson y, por ende la función de probabilidad *a priori*  $f(N)$ , puede escribirse de la siguiente manera:

$$f(N) = \frac{\lambda_1^N e^{-\lambda_1}}{N!} \quad (3)$$

El periodo considerado, un mes, debe ser meteorológicamente homogéneo, lo cual significa que la probabilidad de que una tormenta ocurra es la misma en cualquier momento en el periodo.

Todorovic (1967, citado por Antigüedad *et al* 1995) propuso una función de distribución acumulada para la precipitación total, P, producida por N tormentas mediante una distribución del tipo Gamma, según la siguiente ecuación:

$$F(P|N) = 1 - e^{-\lambda_2 P} \sum_{j=0}^{N-1} \frac{(\lambda_2 P)^j}{j!} \quad (4)$$

El significado físico de  $\lambda_2$  es la inversa de la lámina media de la precipitación producida por una sola tormenta. La misma puede estimarse como:

$$\lambda_2 = \frac{\lambda_1}{P_m} \quad (5)$$

donde  $P_m$  es la lámina media mensual.

Esta distribución condicional es de tipo Gamma y asumiéndose que  $\lambda_2$  es invariable a lo largo del periodo homogéneo.

La función de densidad de probabilidad puede ser obtenida por derivación de (4), según la siguiente formulación:

$$f(P | N) = \frac{\lambda_2^N e^{-\lambda_2 P} P^{N-1}}{(N-1)!} \quad (6)$$

Esta distribución de probabilidad condicional, también es del tipo Gamma (distribución de Erlang) cuyos parámetros son  $N$  y  $\lambda_2$ . La media de la distribución es  $N/\lambda_2$  y su varianza es  $N/(\lambda_2)^2$  (Montgomery y Runger 1996).

Combinando las ecuaciones (1), (2), (3), y (6) la función de distribución de la probabilidad *a posteriori* puede determinarse mediante:

$$f(N | P) = \frac{\frac{\lambda_2^N e^{-\lambda_2 P} P^{N-1}}{(N-1)!} \frac{\lambda_1^N e^{-\lambda_1}}{N!}}{\sum_{j=1}^{N_{\max}} \frac{\lambda_2^{N_j} e^{-\lambda_2 P} P^{N_j-1}}{(N_j-1)!} \frac{\lambda_1^{N_j} e^{-\lambda_1}}{N_j!}} \quad (7)$$

**Algoritmo para definir los números de eventos de lluvia condicionados a valores de la precipitación mensual.**

1. Datos disponibles: Una serie de precipitaciones mensuales,  $P$ , y los valores de los promedios mensuales para los números de eventos de lluvia,  $N_m$ , y la respectiva lámina media mensual,  $P_m$ .
2. Asignar parámetros de las distribuciones probabilísticas:  $\lambda_1=N_m$  y  $\lambda_2$  estimada con (5).
3. Calcular para cada año y cada mes valores de la probabilidad *a posteriori*  $f(N|P)$  usando (7), donde  $N$  varía de 1 a  $N_{\max}$ .
4. Seleccionar un valor óptimo de  $N$ ,  $N_{op}$ , para cada mes y año tal que  $f(N_{op}|P)$  es la mayor de  $f(N|P)$ , con  $N=1..N_{\max}$ .

**Ejemplo de aplicación**

A manera de ejemplo, supongamos tener un mes cuyo número promedio de ocurrencias de lluvia  $N_m$  sea de 4 eventos, lámina media mensual  $P_m$  de 60 mm y cuya precipitación mensual  $P$  sea de 50 mm.

La Fig. 1 muestra la función densidad de probabilidad correspondiente a una distribución de Poisson con  $\lambda_1 = 4$  (ec. 3).

La Fig. 2 representa la distribución de Erlang (ec. 6) con parámetros  $\lambda_1 = 4$  y  $\lambda_2 = 0.067 \text{ mm}^{-1}$  (precipitación media por evento de 15 mm).

El producto de ambas funciones (ec. 7) da por resultado las funciones de probabilidad graficadas en la Fig. 3. Puede observarse que, para una precipitación de 50 mm, el número de eventos más probable es 4 (campana de  $N = 4$ ), lo cual es bastante lógico porque el valor 50 mm no difiere mucho de el valor medio mensual de 60 mm, al cual le corresponden, en promedio, 4 eventos de lluvia. Si el valor de lámina mensual hubiese sido 25 mm, en la Fig. 3 puede observarse que el número más probable sería de 3 eventos de lluvia, para  $P = 100 \text{ mm}$  el número de ocurrencias más probable es de 5 (curva de trazos).

**APLICACIÓN DEL MODELO A REGISTROS PLUVIOMETRICOS REGIONALES.**

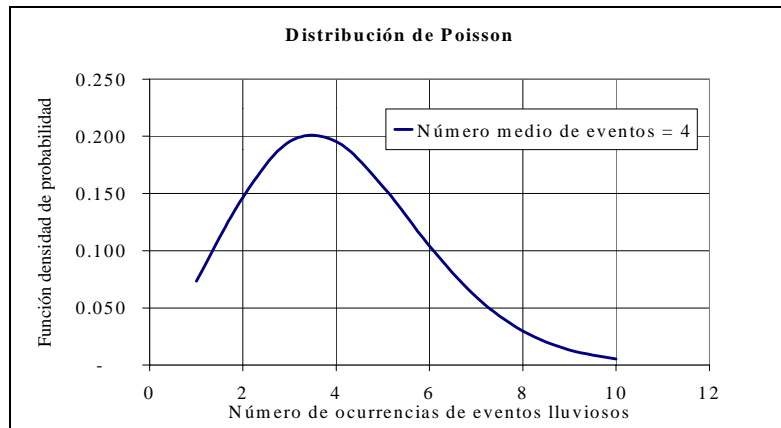
La disponibilidad de información pluviométrica en la región de estudio permitió el contraste de la metodología propuesta con los registros de ocurrencias mensuales de eventos de lluvia, a lo largo de una serie de años y en diferentes estaciones de medición.

Se contó con registros de más de veinte estaciones pluviométricas ubicadas en el sector meridional de la provincia de Santa Fe. La consistencia de la información fue analizada mediante dobles acumulaciones, contrastándose las estaciones entre sí (Zimmermann *et al* 1988). Este análisis previo permitió seleccionar cuatro estaciones del conjunto, las que presentan períodos extensos de registros, buena cobertura geográfica de la región y de buena calidad de la información.

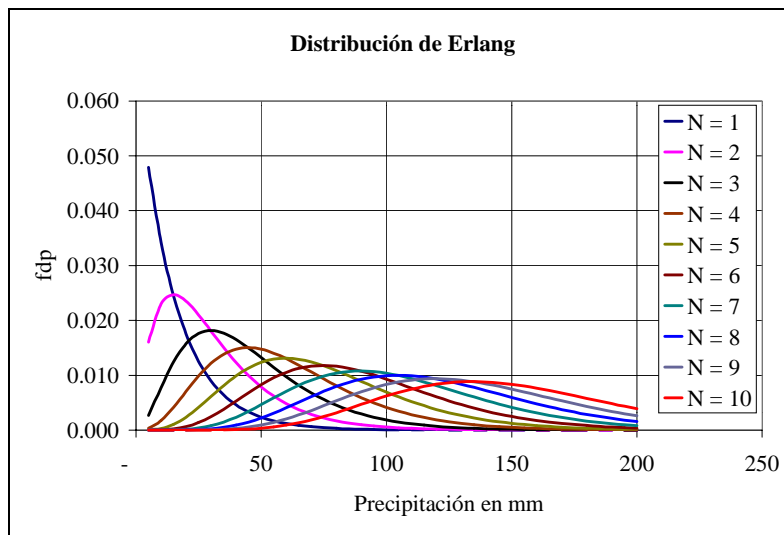
Las estaciones seleccionadas y la cantidad de años de registros pluviométricos fueron los siguientes: Bombal, 51 años; Chovet, 51 años; Santa Teresa, 52 años y Empalme, 17 años (Fig. 4).

**Procesamiento de la información.**

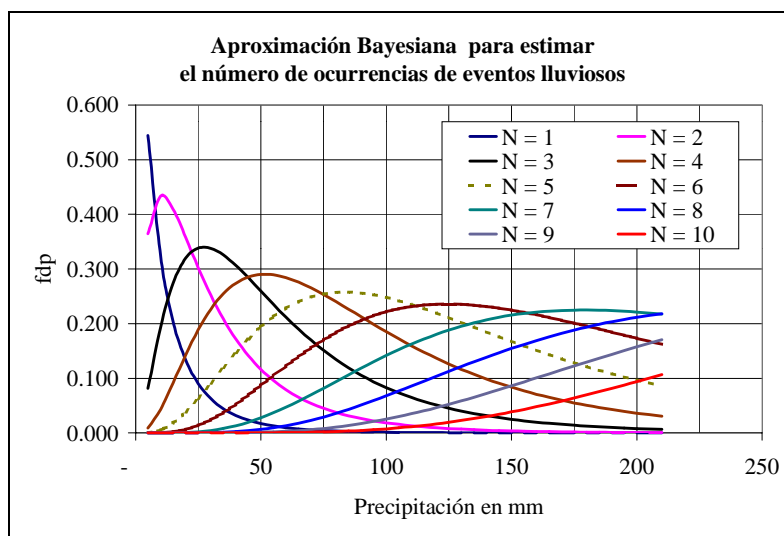
Las precipitaciones registradas en soporte papel (planillas de lluvias diarias) fueron volcados en archivos tipo ASCII, y posteriormente procesados con programas de lectura y clasificación específicamente diseñados para esta tarea.



**Figura 1.** Distribución de Poisson con  $\lambda_1 = 4$



**Figura 2.** Distribución de Erlang con  $\lambda_2 = 0.067 \text{ mm}^{-1}$



**Figura 3.** Aproximación Bayesiana propuesta

Se acumularon las ocurrencias de eventos lluviosos y las precipitaciones diarias a valores mensuales para la totalidad de las estaciones y los años de registros. Los resultados del procesamiento se vuelcan a las Tablas 1 a 4, para las ocurrencias de lluvia y a las Tablas 5 a 8, para las precipitaciones mensuales. Al pie de cada tabla figuran los valores medios, desvíos

estándares y coeficientes de variación para cada estación y variable analizada. Se acumularon también los valores en intervalos anuales, observándose que los módulos pluviométricos crecen hacia el este (Fig. 4).

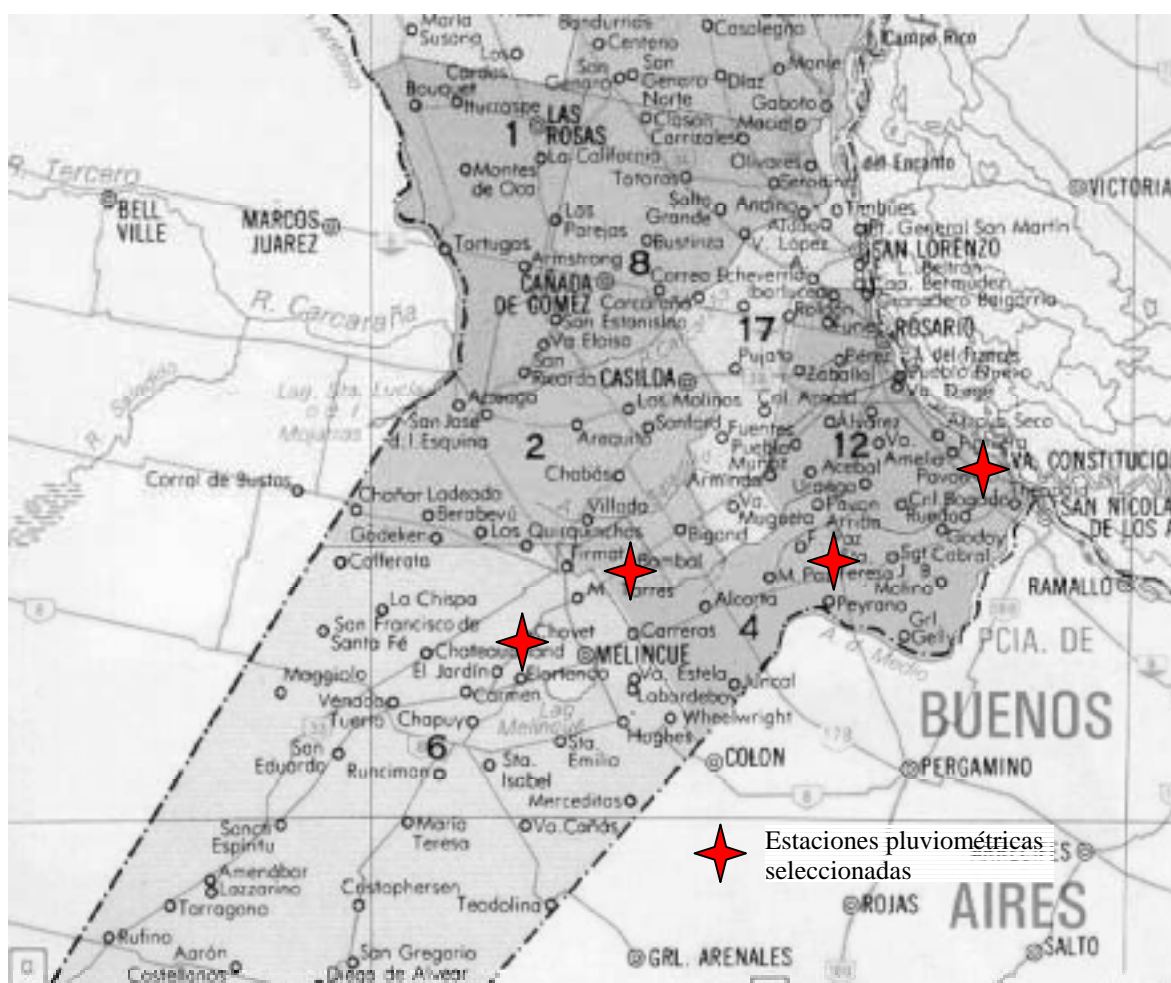


Figura 4. Región de estudio y ubicación de las estaciones pluviométricas

Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1933	10	8	6	6	6	0	1	0	8	7	5	4	61
1934	2	1	12	4	0	5	5	2	9	8	8	7	63
1935	5	5	3	2	1	2	0	2	2	10	8	7	47
1936	5	3	8	8	2	7	5	1	1	7	7	15	69
1937	9	6	4	2	3	0	0	2	3	4	5	1	39
1938	6	5	14	8	4	3	0	1	2	6	7	2	58
1939	9	6	3	4	2	6	1	4	9	9	2	5	60
1940	6	3	5	6	3	4	5	5	5	6	7	12	67
1941	2	5	5	8	5	1	4	4	0	5	11	6	56
1942	6	9	3	5	3	1	1	5	2	5	6	5	51
1943	3	1	8	2	6	5	3	0	2	5	9	4	48
1944	8	6	5	3	6	1	1	1	2	6	2	6	47
1945	3	5	3	5	0	0	4	4	4	3	1	6	38
1946	3	6	4	6	3	6	4	3	7	5	5	9	61
1947	8	4	8	7	1	4	2	0	5	3	3	9	54
1948	8	5	10	0	3	4	0	0	6	1	1	7	45
1949	6	7	9	4	5	4	5	2	3	4	5	3	57
1950	4	3	6	5	8	2	5	2	6	9	6	8	64
1951	7	8	5	3	5	1	3	2	0	6	11	4	55
1952	6	4	10	2	7	2	7	1	7	10	4	1	61
1953	11	4	10	6	3	5	2	1	1	9	8	8	68
1954	9	6	6	9	2	11	5	8	6	9	5	8	84
1955	6	9	7	8	5	4	2	3	3	5	6	5	63
1956	7	4	4	4	3	0	3	5	3	9	3	1	46
1957	5	5	1	8	8	3	1	1	5	4	4	9	54
1958	5	9	6	3	0	7	3	3	3	1	6	7	53
1959	3	7	9	6	5	0	2	7	2	4	6	3	54
1960	3	2	0	2	0	3	5	2	3	14	6	6	46
1961	11	7	5	3	2	2	2	6	4	7	0	3	52
1962	6	2	7	2	0	0	4	3	1	1	3	4	33
1963	5	2	11	4	2	3	2	1	6	6	7	5	54
1964	3	5	7	5	5	1	0	2	4	1	7	5	45
1965	3	2	0	7	0	6	7	0	3	6	5	7	46
1966	5	3	9	0	1	1	2	1	0	2	9	7	40
1967	5	2	2	0	0	1	3	2	3	12	1	1	32
1968	5	0	6	0	1	8	0	4	4	10	5	8	51
1969	4	5	4	6	9	3	0	0	4	2	8	2	47
1970	9	0	7	3	0	0	2	1	2	7	6	8	45
1971	8	9	8	5	3	2	4	2	5	3	4	3	56
1972	0	2	4	3	1	6	1	4	4	8	4	3	40
1973	6	8	6	5	1	5	10	0	1	5	5	4	56
1974	5	7	3	0	8	3	3	1	3	5	6	4	48
1975	6	6	4	5	8	3	2	1	2	2	4	2	45
1976	5	5	4	2	5	0	3	8	2	5	8	9	56
1977	7	8	6	0	4	0	0	0	0	7	4	7	43
1978	7	5	12	2	0	2	14	1	7	5	6	4	65
1979	5	7	0	3	0	2	3	0	0	5	0	6	31
1980	2	7	4	10	3	3	3	0	1	6	7	6	52
1981	9	3	5	9	6	3	3	2	1	6	9	4	60
1982	7	6	4	5	1	5	2	0	5	8	7	1	51
1983	4	7	4	2	4	2	0	3	2	5	0	8	41
<b>PROM</b>	<b>5.73</b>	<b>4.98</b>	<b>5.80</b>	<b>4.25</b>	<b>3.20</b>	<b>2.98</b>	<b>2.92</b>	<b>2.22</b>	<b>3.39</b>	<b>5.84</b>	<b>5.33</b>	<b>5.47</b>	<b>52.12</b>
<b>DESV</b>	<b>2.44</b>	<b>2.43</b>	<b>3.14</b>	<b>2.65</b>	<b>2.61</b>	<b>2.45</b>	<b>2.64</b>	<b>2.09</b>	<b>2.36</b>	<b>2.87</b>	<b>2.67</b>	<b>2.91</b>	<b>10.34</b>
<b>CV</b>	<b>0.43</b>	<b>0.49</b>	<b>0.54</b>	<b>0.62</b>	<b>0.82</b>	<b>0.82</b>	<b>0.91</b>	<b>0.94</b>	<b>0.70</b>	<b>0.49</b>	<b>0.50</b>	<b>0.53</b>	<b>0.20</b>

Tabla 1. Estadísticas de días de lluvia. Estación Bombal.

Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1933	7	4	5	4	4	0	0	0	8	6	3	2	43
1934	0	0	9	1	2	5	4	2	6	4	8	7	48
1935	6	5	2	2	0	0	0	2	1	8	6	6	38
1936	3	1	5	8	4	2	2	1	2	4	3	10	45
1937	2	4	3	0	6	2	1	0	5	3	6	2	34
1938	6	1	12	5	4	1	1	0	2	4	7	2	45
1939	5	6	2	4	4	3	0	2	5	10	1	5	47
1940	7	2	3	3	2	4	4	5	3	2	7	13	55
1941	3	4	3	7	2	0	4	3	0	6	5	5	42
1942	6	6	2	1	1	0	0	2	3	2	4	4	31
1943	2	4	9	4	6	4	3	0	3	7	9	4	55
1944	3	3	4	2	3	1	0	0	2	6	3	4	31
1945	5	6	5	3	0	0	2	2	6	2	3	7	41
1946	4	3	5	4	3	6	2	2	2	3	8	11	53
1947	7	5	7	7	1	1	1	1	6	3	3	5	47
1948	9	2	5	1	2	4	0	0	6	1	1	8	39
1949	3	6	4	1	3	3	3	0	3	5	4	3	38
1950	1	2	7	3	4	0	3	1	4	7	4	5	41
1951	6	5	5	2	7	1	0	2	0	7	8	4	47
1952	4	4	6	2	3	2	4	1	4	7	6	2	45
1953	6	3	12	3	0	3	0	0	0	10	8	6	51
1955	4	8	6	5	2	2	3	2	5	5	6	6	54
1956	11	5	3	3	2	4	2	5	1	8	3	1	48
1957	6	4	1	7	6	2	1	0	5	3	6	6	47
1958	5	10	5	5	2	2	4	3	1	1	6	6	50
1959	2	5	8	7	3	6	2	4	2	8	7	4	58
1960	8	4	5	1	0	3	2	2	4	8	4	5	46
1961	7	3	8	4	2	1	2	4	4	8	7	7	57
1962	5	1	5	4	1	0	4	3	3	1	6	5	38
1963	2	3	9	3	4	2	4	4	2	9	6	8	56
1965	3	5	2	5	0	4	2	0	1	6	4	7	39
1966	5	5	9	5	1	2	4	1	0	3	9	7	51
1967	5	5	2	6	4	2	3	1	4	13	3	3	51
1968	4	7	5	0	1	6	1	5	3	10	3	10	55
1969	5	5	6	7	7	2	3	0	4	4	10	2	55
1970	10	5	7	5	5	0	1	1	2	7	7	9	59
1971	7	6	9	6	2	2	3	3	4	2	4	5	53
1972	5	8	7	5	2	8	4	8	5	5	6	5	68
1973	4	7	7	7	1	4	5	0	1	6	9	5	56
1974	7	7	4	1	6	2	3	4	3	6	5	6	54
1975	7	7	7	6	8	2	2	4	3	5	7	3	61
1976	8	8	6	3	3	1	2	8	1	6	7	12	65
1977	10	10	8	1	5	3	1	5	4	5	3	8	63
1978	8	5	12	3	0	2	6	3	7	11	5	4	66
1979	7	8	7	4	2	3	4	6	4	4	10	5	64
1980	2	6	5	8	3	5	2	0	2	9	5	5	52
1981	8	7	6	7	1	4	1	0	2	5	8	6	55
1982	6	6	5	4	1	3	2	0	6	5	7	3	48
1983	6	4	5	2	6	3	1	5	3	4	4	8	51
1984	6	9	5	5	4	3	1	1	7	4	11	7	63
<b>PROM</b>	<b>5.29</b>	<b>4.90</b>	<b>5.75</b>	<b>3.98</b>	<b>2.88</b>	<b>2.59</b>	<b>2.16</b>	<b>2.20</b>	<b>3.29</b>	<b>5.57</b>	<b>5.65</b>	<b>5.55</b>	<b>49.80</b>
<b>DESV</b>	<b>2.43</b>	<b>2.33</b>	<b>2.61</b>	<b>2.22</b>	<b>2.08</b>	<b>1.92</b>	<b>1.51</b>	<b>2.14</b>	<b>1.98</b>	<b>2.74</b>	<b>2.36</b>	<b>2.74</b>	<b>9.00</b>
<b>CV</b>	<b>0.46</b>	<b>0.48</b>	<b>0.45</b>	<b>0.56</b>	<b>0.72</b>	<b>0.74</b>	<b>0.70</b>	<b>0.97</b>	<b>0.60</b>	<b>0.49</b>	<b>0.42</b>	<b>0.49</b>	<b>0.18</b>

Tabla 2. Estadísticas de días de lluvia. Estación Chovet

Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1933	6	3	5	3	3	0	1	0	8	5	3	3	40
1934	1	1	5	1	1	5	2	3	4	4	7	4	38
1935	4	1	1	3	2	0	0	1	3	6	4	7	32
1936	4	0	6	7	1	4	4	1	1	4	4	7	43
1937	1	1	5	1	3	0	0	1	6	5	4	2	29
1938	6	3	8	5	1	2	0	1	2	5	5	1	39
1939	6	8	3	4	0	1	0	5	5	6	1	2	41
1940	6	1	2	2	0	4	4	4	3	2	6	9	43
1941	5	5	3	3	2	1	4	3	0	5	6	5	42
1942	2	5	3	1	2	1	0	3	0	3	3	2	25
1943	0	1	4	1	3	4	3	0	0	4	8	2	30
1944	3	2	5	3	3	1	2	1	1	10	4	2	37
1945	1	2	1	4	0	0	3	5	5	6	2	4	33
1946	4	1	5	4	2	5	4	2	3	5	5	6	46
1947	6	4	6	7	1	1	1	0	3	2	3	5	39
1948	6	2	10	3	2	2	0	0	8	0	2	5	40
1949	3	5	4	2	4	2	3	1	3	2	3	2	34
1950	0	5	6	3	8	0	1	0	4	2	3	4	36
1951	4	4	3	1	3	1	0	1	1	4	8	4	34
1952	4	2	7	0	4	2	3	3	5	4	2	2	38
1953	7	2	7	3	0	2	1	1	2	5	5	4	39
1954	6	1	4	6	2	5	1	5	3	6	4	4	47
1955	5	10	5	6	3	1	0	2	3	3	6	5	49
1956	9	3	3	4	1	3	5	3	6	6	3	2	48
1957	4	6	2	7	5	1	1	1	1	4	5	7	44
1958	4	7	3	2	0	2	3	3	3	1	4	7	39
1959	2	6	7	5	1	3	2	3	2	5	4	4	44
1960	2	3	0	2	0	5	5	0	2	6	4	6	35
1961	9	3	7	3	1	1	1	2	3	3	4	4	41
1962	5	0	5	4	0	0	3	2	5	2	8	3	37
1963	6	3	7	4	3	1	3	4	5	8	6	7	57
1964	2	4	7	4	5	1	0	2	3	3	7	4	42
1965	2	5	2	4	2	3	2	0	3	6	3	6	38
1966	4	3	8	5	1	0	3	1	0	4	10	7	46
1967	3	3	2	2	1	0	1	2	2	9	1	3	29
1968	4	4	3	0	0	3	1	4	2	4	3	9	37
1969	4	7	3	4	3	2	1	0	4	2	6	1	37
1970	5	3	5	2	1	0	2	2	4	3	3	5	35
1971	6	7	4	6	1	2	2	3	4	3	5	3	46
1972	3	4	4	1	1	4	3	5	4	5	6	3	43
1973	7	5	3	5	0	2	6	0	0	3	4	2	37
1974	5	4	2	1	2	2	2	3	3	1	2	2	29
1975	5	4	5	7	3	1	1	4	2	3	3	4	42
1976	6	4	6	3	2	1	2	2	1	3	4	10	44
1977	8	6	5	1	2	2	2	3	8	3	3	3	46
1978	4	2	14	2	0	1	6	1	5	11	4	6	56
1979	3	3	4	3	0	2	1	4	2	3	8	5	38
1980	3	4	4	8	2	2	2	1	2	6	6	8	48
1981	4	2	2	5	2	0	3	0	1	2	4	4	29
1982	6	3	3	5	2	1	1	0	3	5	5	2	36
1983	2	4	3	3	1	1	0	3	2	4	2	6	31
1984	3	7	2	3	1	1	0	1	5	4	4	4	35
<b>PROM</b>	<b>4.23</b>	<b>3.62</b>	<b>4.48</b>	<b>3.42</b>	<b>1.79</b>	<b>1.75</b>	<b>1.94</b>	<b>1.96</b>	<b>3.08</b>	<b>4.23</b>	<b>4.40</b>	<b>4.38</b>	<b>39.29</b>
<b>DESV</b>	<b>2.08</b>	<b>2.13</b>	<b>2.46</b>	<b>1.96</b>	<b>1.58</b>	<b>1.47</b>	<b>1.61</b>	<b>1.56</b>	<b>2.01</b>	<b>2.16</b>	<b>1.94</b>	<b>2.18</b>	<b>6.65</b>
<b>CV</b>	<b>0.49</b>	<b>0.59</b>	<b>0.55</b>	<b>0.57</b>	<b>0.88</b>	<b>0.84</b>	<b>0.83</b>	<b>0.79</b>	<b>0.65</b>	<b>0.51</b>	<b>0.44</b>	<b>0.50</b>	<b>0.17</b>

**Tabla 3.** Estadísticas de días de lluvia. Estación Santa Teresa.

Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1968	4	6	2	0	1	5	1	2	2	8	3	7	41
1969	2	6	4	5	5	3	1	0	3	1	7	1	38
1970	6	4	5	4	3	2	2	1	3	5	2	5	42
1971	9	5	8	4	1	3	3	2	5	3	5	4	52
1972	3	2	4	2	0	4	2	7	5	5	4	2	40
1973	6	7	4	5	0	5	2	0	1	6	8	3	47
1974	5	3	5	2	2	2	5	3	5	3	5	4	44
1975	4	1	3	7	8	4	1	5	4	6	3	2	48
1976	5	3	6	3	5	1	4	11	1	4	5	10	58
1977	6	11	5	1	3	3	2	5	8	7	3	8	62
1978	12	7	12	3	3	6	8	1	8	16	8	7	91
1979	4	4	4	4	2	3	3	6	2	6	11	8	57
1980	5	7	4	14	6	7	4	2	3	10	6	7	75
1981	10	6	6	9	8	3	3	1	3	3	7	4	63
1982	8	4	3	4	4	4	4	0	4	7	8	1	51
1983	3	6	3	2	10	3	0	3	2	4	2	6	44
1984	5	10	4	6	1	4	2	1	7	7	7	7	61
<b>PROM</b>	<b>5.71</b>	<b>5.41</b>	<b>4.82</b>	<b>4.41</b>	<b>3.65</b>	<b>3.65</b>	<b>2.76</b>	<b>2.94</b>	<b>3.88</b>	<b>5.94</b>	<b>5.53</b>	<b>5.06</b>	<b>53.76</b>
<b>DESV</b>	<b>2.66</b>	<b>2.62</b>	<b>2.32</b>	<b>3.32</b>	<b>2.98</b>	<b>1.50</b>	<b>1.89</b>	<b>2.99</b>	<b>2.20</b>	<b>3.40</b>	<b>2.53</b>	<b>2.70</b>	<b>13.90</b>
<b>CV</b>	<b>0.47</b>	<b>0.48</b>	<b>0.48</b>	<b>0.75</b>	<b>0.82</b>	<b>0.41</b>	<b>0.68</b>	<b>1.02</b>	<b>0.57</b>	<b>0.57</b>	<b>0.46</b>	<b>0.53</b>	<b>0.26</b>

**Tabla 4.** Estadísticas de días de lluvia. Estación Empalme.

Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1968	94	146	73	0	21	83	12	60	39	106	74	187	895
1969	29.5	124	208	132.5	85.5	17	14	0	41	31	178	7	868
1970	93.5	65	115	42.5	34.5	12	22	37	62	105.5	20	182	791
1971	144.5	270	99	84	14	33	75.5	30	62	40.5	64	107	1 024
1972	50	41	67	36	0	100	24	139	198	128	76	131	990
1973	325	293	100	158	0	152	54	0	14	100.5	65	42	1 304
1974	162	83	106	14	43	26	132	14	82	34	57	106	859
1975	28	62	114	91	66	70	3	88	132	51	41	13	759
1976	193	77	69	40	85	5	33	133.5	25	94	72.5	440	1 267
1977	69	316	118	30	22	48	26	79	144	173	100	165	1 290
1978	382	97	339	43	21	102	138	5	220	174	153	188.5	1 863
1979	37.5	107	178	38	11	84	16	42.5	33	162	244	192.5	1 146
1980	58	126	75	214	68	80	61	20	98	353	144	71	1 368
1981	271.5	105	35	155	214	31	81	2	17	31	190	41	1 174
1982	142	128	28	77	46	29	17	0	132	120	87	10	816
1983	50	177	55	34	85	18	0	85	22	137	46	98	807
1984	156	511	118	68	14	36	33	8	137	165	79	100	1 425
<b>PROM</b>	<b>134.44</b>	<b>160.47</b>	<b>111.59</b>	<b>73.94</b>	<b>48.82</b>	<b>54.47</b>	<b>43.62</b>	<b>43.71</b>	<b>85.76</b>	<b>117.97</b>	<b>99.44</b>	<b>122.41</b>	<b>1096.65</b>
<b>DESV</b>	<b>106.25</b>	<b>121.63</b>	<b>74.39</b>	<b>58.91</b>	<b>51.87</b>	<b>40.51</b>	<b>41.71</b>	<b>46.26</b>	<b>64.62</b>	<b>79.00</b>	<b>60.95</b>	<b>104.59</b>	<b>298.11</b>
<b>CV</b>	<b>0.79</b>	<b>0.76</b>	<b>0.67</b>	<b>0.80</b>	<b>1.06</b>	<b>0.74</b>	<b>0.96</b>	<b>1.06</b>	<b>0.75</b>	<b>0.67</b>	<b>0.61</b>	<b>0.85</b>	<b>0.27</b>

**Tabla 5.** Estadísticas de lluvias mensuales. Estación Empalme.

Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1933	112	142	254	87	115	0	2	0	153	286	48	35	1234
1934	15	2	246	53	0	45	120	50	144	59	218	86	1038
1935	57	31	157	36	3	4	0	48	20	164	170	173	863
1936	76	61	101	207	26	73	22	9	46	76	48	432	1177
1937	110	92	113	93	7	0	0	25	83	54	80	37	694
1938	172	84	262	129	142	9	0	12	52	130	106	6	1104
1939	110	106	59	58	18	52	2	43	114	263	17	37	879
1940	107	16	107	125	12	53	72	79	54	16	102	364	1107
1941	110	64	45	110	44	2	104	38	0	50	164	103	834
1942	102	254	141	33	14	4	2	90	10	65	38	46	799
1943	23	1	189	57	140	125	64	0	13	118	137	86	953
1944	105	101	173	48	131	27	3	7	19	277	7	60	958
1945	20	161	51	85	0	0	65	53	173.2	24	10	44	686.2
1946	46	81	59	65	75	90	34	29	126	61	97	166	929
1947	201	130	218	164	1	17	19	0	32	42	66	164	1054
1948	303	62	172	0	86	22	0	0	128	45	5	168	991
1949	178	260	188	62	34	77	159	4.8	29	46.5	40	33	1111.3
1950	36	53	83	25	53	6	53	11	72	73	65	150	680
1951	143	106	138	42	91	16	5	31	0	63	158	53	846
1952	112	25	171	63	52	43	42.2	4	80	134	26	19	771.2
1953	175	144	280	93.7	7	80	4	6	3	120	125	128	1165.7
1954	85	21	106	189	44	68	61	99	40	85	127	76	1001
1955	39	357	84	197	28	42	11	56	30	104	91	65	1104
1956	199	130	176	84	28	0	23	46	77	238	36	5	1042
1957	61	69	18	79	113	57	9	4	47	86	142	214	899
1958	134	228	122	32	0	56	115	24	29	15	119	264	1138
1959	65	144	118	149	70	0	35	48	16	82	219	68	1014
1960	138	63	0	64	0	7	94	18	65	214	44	36	743
1961	213	101	146	100	21	15	35	63	36	103	0	193	1026
1962	88	12	153	18	0	0	79	56	4	1	50	62	523
1963	69	57	208	50	9	22	28	13	70	82	99	179	886
1964	107	143	317	58	62	28	0	36	53	15	47	153	1019
1965	51	38	0	66	0	81	50	0	27	105	98	113	629
1966	107	19	492	0	10	4	28	10	0	40	122	122	954
1967	114	43	129	0	0	5	64	55	62	201	20	30	723
1968	63	0	128	0	2	64	0	30	42	91	63	132	615
1969	79	75	167	264	109	20	0	0	41	42	190	22	1009
1970	223	0	127	35	0	0	44	30	170	110	56	168	963
1971	165	176	242	137	19	18	75	25	80	52	74	72	1135
1972	0	116	59	21	8	90	36	98	109	69	102	86	794
1973	97	206	165	115	9	92	53	0	3	171	41	41	993
1974	88	63	27	0	102	19	142	9	38	54	72	88	702
1975	68	128	170	68	67	32	5	15	52	37	53	19	714
1976	193	140	84	81	76	0	30	142	4	143	167	269	1329
1977	128	181	126	0	58	0	0	0	0	151	73	118	835
1978	155	58	300	11	0	5	141	10	157	62	78	142	1119
1979	89	133	0	57	0	34	25	0	0	93	0	178	609
1980	40	83	117	162	76	53	58	0	26	118	98	103	934
1981	251	67	151	161	34	27	42	11	18	57	160	95	1074
1982	114	145	60	115	91	32	14	0	164	82	126	13	956
1983	64	137	95	24	48	8	0	34	29	131	0	130	700
<b>PROM</b>	<b>109.80</b>	<b>100.18</b>	<b>143.02</b>	<b>77.90</b>	<b>41.86</b>	<b>31.84</b>	<b>40.57</b>	<b>28.86</b>	<b>55.69</b>	<b>98.05</b>	<b>84.20</b>	<b>110.71</b>	<b>922.67</b>
<b>DESV</b>	<b>63.78</b>	<b>74.36</b>	<b>91.61</b>	<b>60.82</b>	<b>42.83</b>	<b>31.77</b>	<b>42.11</b>	<b>31.47</b>	<b>50.61</b>	<b>68.05</b>	<b>57.35</b>	<b>87.95</b>	<b>183.30</b>
<b>CV</b>	<b>0.58</b>	<b>0.74</b>	<b>0.64</b>	<b>0.78</b>	<b>1.02</b>	<b>1.00</b>	<b>1.04</b>	<b>1.09</b>	<b>0.91</b>	<b>0.69</b>	<b>0.68</b>	<b>0.79</b>	<b>0.20</b>

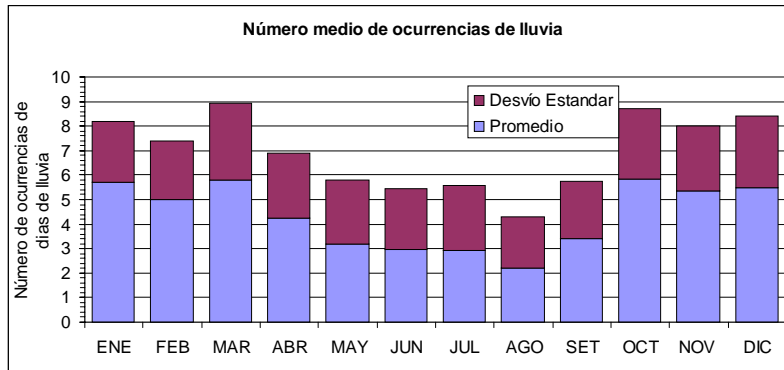
Tabla 6. Estadísticas de lluvias mensuales. Estación Bombal.

Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1933	78	192	204	73	64	0	0	0	134	176	57	46	1024
1934	0	0	208	40	10	78	84	33	90	74	154	110	881
1935	35	56	84	74	0	0	0	28	2	128	109	112	628
1936	116	45	62	227	48	61	86	11	57	55	42	316	1126
1937	31	97	86	0	101	30	5	0	88	38	49	7	532
1938	164	40	224	112	98	9	5	0	32	68	71	42	865
1939	96	151	58	33	21	20	0	38	116	232	7	24	796
1940	187	12	53	73	8	57	65	67	41	17	80	358	1018
1941	128	82	50	87	29	0	158	29	0	82	161	64	870
1942	153	218	88	29	7	0	0	95	30	60	44	37	761
1943	12	10	252	58	70	129	58	0	24	118	137	61	929
1944	77	117	126	37	89	6	0	0	39	188	13	42	734
1945	37	101	38	55	0	0	26	11	144	17	12	81	522
1946	77	68	54	74	47	55	12	29	48	46	90	120	720
1947	177	154	188	177	9	15	29	5	101	50	64	92	1061
1948	364	44	106	20	72	15	0	0	120	17	7	130	895
1949	76	174	220	24	36	36	109	0	40	78	41	15	849
1950	5	100	94	44	49	0	42	5	84	75	54	100	652
1951	105	113	172	51	72	9	0	12	0	64	156	40	794
1952	36	53	131	34	17	53	23	6	55	108	80	10	606
1953	117	52	354	50	0	64	0	0	0	125	108	109	979
1954	12	60	53	149	42	100	27	56	44	71	108	0	722
1955	76	235	114	99	27	17	9	27	22	92	78	64	860
1956	310	156	147	53	11	107	9	61	47	297	52	4	1254
1957	123	92	11	115	72	30	13	0	35	27	179	157	854
1958	91	205	100	50	10	14	97	19	7	3	55	190	841
1959	17	68	147	126	28	115	7	49	17	121	171	57	923
1960	202	84	111	40	0	39	32	10	42	189	74	46	869
1961	172	72	201	87	14	2	12	34	24	96	93	194	1001
1962	69	4	77	91	22	0	61	37	12	15	113	101	602
1963	80	87	179	25	43	19	18	15	36	132	84	273	991
1965	56	50	49	146	0	181	15	0	21	96	100	140	854
1966	99	64	481	71	5	8	20	18	0	39	162	184	1151
1967	129	73	70	95	22	8	29	45	64	178	85	71	869
1968	70	65	54	0	1	50	2	45	48	184	68	178	765
1969	45	70	117	222	99	18	45	0	16	34	218	28	912
1970	244	97	149	78	44	0	19	10	95	92	93	146	1067
1971	149	132	147	152	19	17	67	31	81	50	24	66	935
1972	88	102	84	34	8	67	42	87	96	60	156	132	956
1973	87	239	221	123	19	123	73	0	3	153	48	78	1167
1974	141	66	63	3	87	11	120	31	12	62	38	108	742
1975	72	168	285	96	79	54	10	63	71	51	71	21	1041
1976	261	99	128	139	57	2	45	117	2	151	142	235	1378
1977	121	228	111	5	46	48	8	30	21	145	97	173	1033
1978	130	87	372	20	0	9	76	12	125	170	122	85	1208
1979	102	141	262	60	7	11	40	28	51	60	184	47	993
1980	23	42	178	112	76	31	15	0	15	339	71	120	1022
1981	197	208	125	149	18	44	2	0	27	60	186	98	1114
1982	111	142	93	76	40	10	6	0	140	71	140	29	858
1983	138	66	68	29	89	8	4	18	41	62	123	65	711
1984	160	239	55	56	28	10	2	19	76	81	112	63	901
<b>PROM</b>	<b>109.72</b>	<b>104.31</b>	<b>139.29</b>	<b>75.94</b>	<b>36.47</b>	<b>35.10</b>	<b>31.90</b>	<b>24.14</b>	<b>49.73</b>	<b>97.98</b>	<b>93.78</b>	<b>99.39</b>	<b>898.75</b>
<b>DESV</b>	<b>76.00</b>	<b>64.82</b>	<b>93.72</b>	<b>53.41</b>	<b>31.37</b>	<b>40.57</b>	<b>36.44</b>	<b>27.06</b>	<b>40.79</b>	<b>70.16</b>	<b>51.77</b>	<b>78.35</b>	<b>182.96</b>
<b>CV</b>	<b>0.69</b>	<b>0.62</b>	<b>0.67</b>	<b>0.70</b>	<b>0.86</b>	<b>1.16</b>	<b>1.14</b>	<b>1.12</b>	<b>0.82</b>	<b>0.72</b>	<b>0.55</b>	<b>0.79</b>	<b>0.20</b>

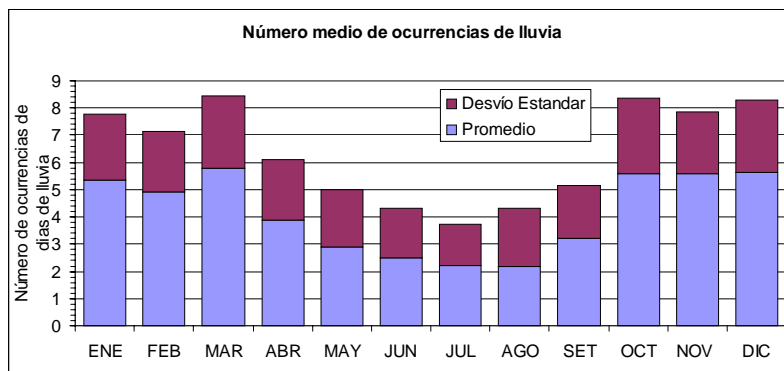
Tabla 7. Estadísticas de lluvias mensuales. Estación Chovet.

Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1933	102	82	127	107	82	0	11	0	117	277	52	46	1003
1934	40	24	184	35	7	51	55	44	42	82	152	29	745
1935	50	30	34	101	24	0	0	51	25	157	104	149	725
1936	87	0	70	235	25	72	98	20	42	63	86	261	1059
1937	8	12	101	61	153	0	0	7	197	63	105	90	797
1938	151	130	330	106	104	24	0	12	34	133	62	4	1090
1939	99	173	153	49	0	25	0	75	99	232	7	9	921
1940	115	17	84	108	0	73	64	55	85	16	110	473	1200
1941	94	92	31	76	36	6	111	37	0	114	152	88	837
1942	63	127	77	40	23	6	0	108	0	62	55	53	614
1943	0	8	102	35	163	108	32	0	0	93	185	103	829
1944	87	61	192	50	87	30	13	19	6	273	58	41	917
1945	5	80	52	57	0	0	63	49	269	49	20	70	714
1946	56	41	113	72	80	124	32	24	44	62	118	115	881
1947	114	109	210	181	20	4	16	0	28	32	118	146	978
1948	280	42	241	63	81	17	0	0	115	0	35	75	949
1949	115	167	121	36	51	43	108	6	52	39	23	64	825
1950	0	94	99	50	137	0	51	0	77	72	58	108	746
1951	87	166	95	30	76	19	0	9	23	78	214	80	877
1952	117	39	131	0	38	89	34	25	69	84	45	25	696
1953	153	36	192	54	0	70	14	10	12	124	140	92	897
1954	172	60	138	142	17	75	31	81	23	74	66	77	956
1955	56	329	61	204	38	12	0	57	18	64	109	51	999
1956	254	108	109	83	23	85	59	75	128	218	33	25	1200
1957	62	120	13	92	102	20	25	14	7	57	134	123	769
1958	96	167	85	23	0	41	116	37	30	4	69	143	811
1959	54	156	167	103	39	121	29	20	25	150	181	21	1066
1960	84	93	0	40	0	62	86	0	40	188	93	55	741
1961	202	71	211	108	8	28	30	35	38	99	98	183	1111
1962	86	0	78	126	0	0	72	39	44	13	125	79	662
1963	129	74	262	103	41	15	35	26	42	118	86	156	1087
1964	18	169	320	62	68	19	0	44	51	28	51	118	948
1965	47	42	30	128	52	53	15	0	37	98	68	100	670
1966	148	50	470	87	7	0	38	17	0	35	158	182	1192
1967	105	78	93	26	15	0	55	48	58	245	24	59	806
1968	93	96	117	0	0	66	5	58	30	68	48	159	740
1969	67	138	216	139	73	18	14	0	36	70	133	13	917
1970	118	41	152	19	21	0	54	31	76	119	31	156	818
1971	136	186	301	129	14	22	51	48	127	40	119	68	1241
1972	76	61	62	20	10	86	37	103	161	88	102	95	901
1973	174	187	104	146	0	58	52	0	0	120	45	62	948
1974	130	95	30	25	22	152	37	21	50	10	28	47	647
1975	53	170	270	139	58	44	5	85	100	45	90	27	1086
1976	230	43	141	70	58	4	45	60	6	155	135	305	1252
1977	135	270	125	20	35	34	19	37	108	95	88	165	1131
1978	220	155	220	35	0	25	178	8	225	114	130	242	1552
1979	40	104	166	45	0	16	45	37	66	58	170	141	888
1980	33	126	155	136	75	13	40	15	32	126	109	125	985
1981	320	61	42	77	135	0	51	0	20	60	185	69	1020
1982	135	172	116	86	109	10	35	0	202	67	90	45	1067
1983	50	99	101	37	37	3	0	43	20	121	50	105	666
1984	132	502	38	75	12	14	0	15	78	78	49	55	1048
<b>PROM</b>	<b>105.35</b>	<b>106.79</b>	<b>137.15</b>	<b>78.29</b>	<b>43.38</b>	<b>35.71</b>	<b>37.71</b>	<b>30.87</b>	<b>61.81</b>	<b>94.81</b>	<b>92.23</b>	<b>103.31</b>	<b>927.40</b>
<b>DESV</b>	<b>69.78</b>	<b>87.40</b>	<b>92.21</b>	<b>51.28</b>	<b>43.73</b>	<b>37.72</b>	<b>36.72</b>	<b>28.15</b>	<b>60.94</b>	<b>65.72</b>	<b>49.97</b>	<b>82.55</b>	<b>189.92</b>
<b>CV</b>	<b>0.66</b>	<b>0.82</b>	<b>0.67</b>	<b>0.66</b>	<b>1.01</b>	<b>1.06</b>	<b>0.97</b>	<b>0.91</b>	<b>0.99</b>	<b>0.69</b>	<b>0.54</b>	<b>0.80</b>	<b>0.20</b>

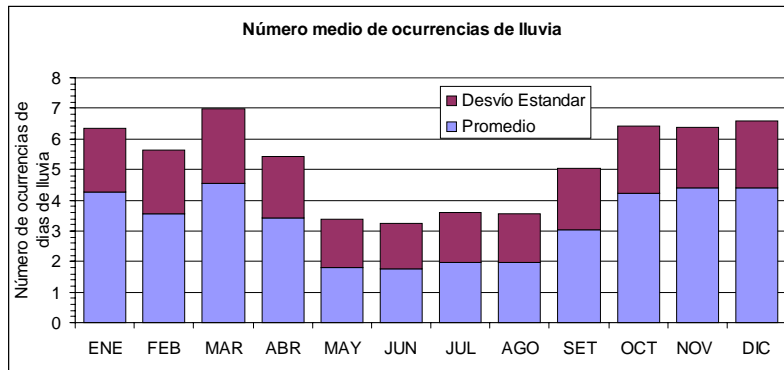
**Tabla 8.** Estadísticas de lluvias mensuales. Estación Santa Teresa.



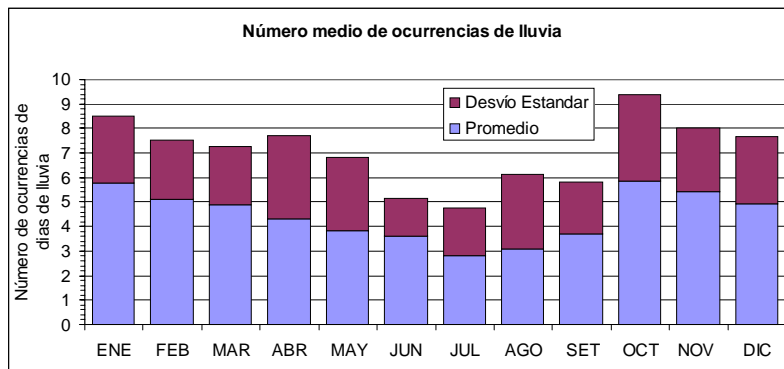
**Figura 5.** Número medio mensual de ocurrencias de lluvias. Estación Bombal.



**Figura 6.** Número medio mensual de ocurrencias de lluvias. Estación Chovet.



**Figura 7.** Número medio mensual de ocurrencias de lluvias. Estación Santa Teresa.



**Figura 8.** Número medio mensual de ocurrencias de lluvias. Estación Empalme.

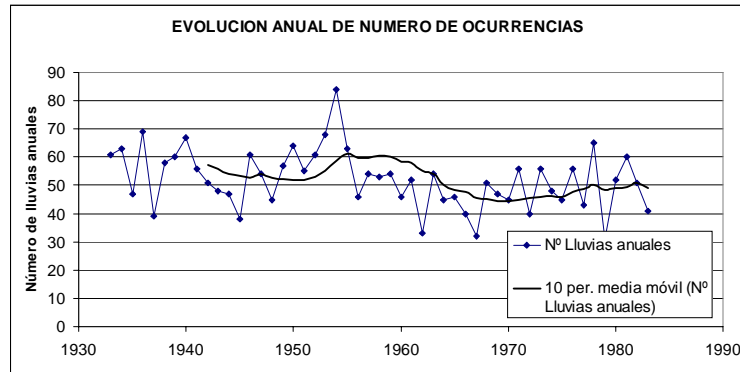


Figura 9. Evolución de las ocurrencias de eventos lluviosos. Estación Bombal.

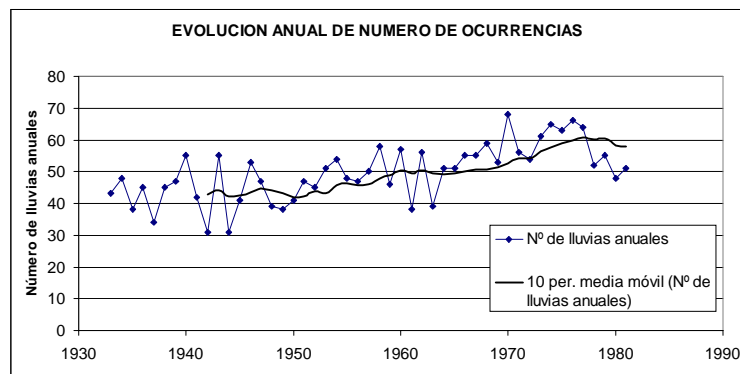


Figura 10. Evolución de las ocurrencias de eventos lluviosos. Estación Chovet.

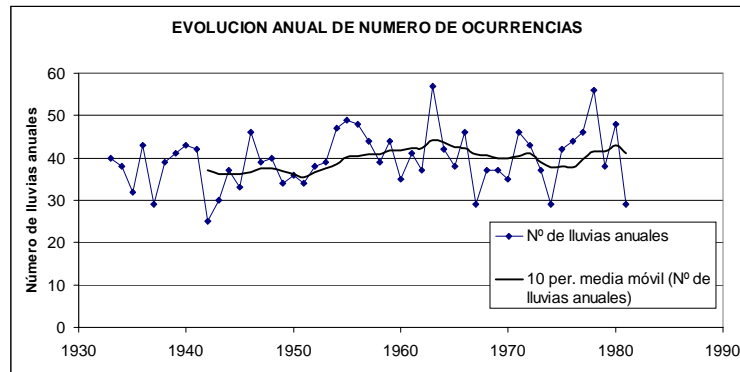


Figura 11. Evolución de las ocurrencias de eventos lluviosos. Estación Santa Teresa.

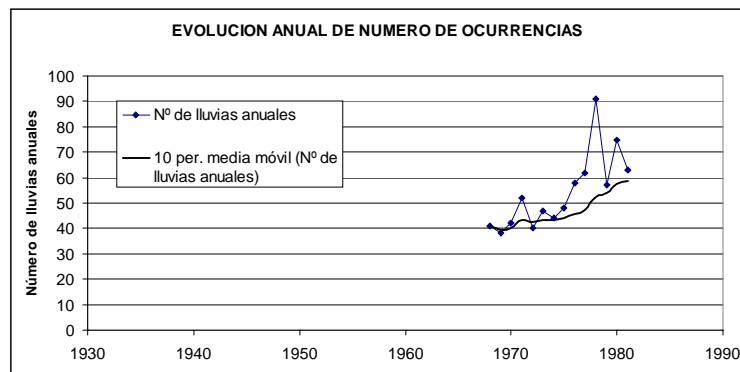
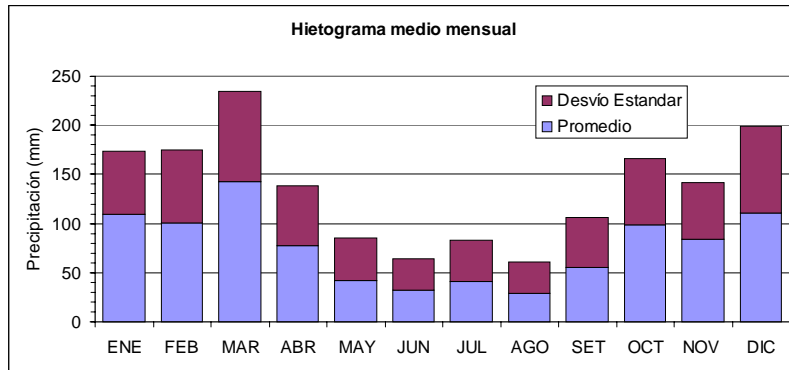
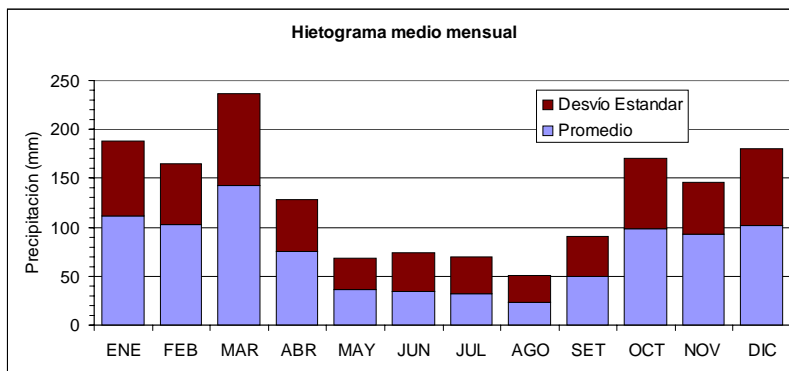


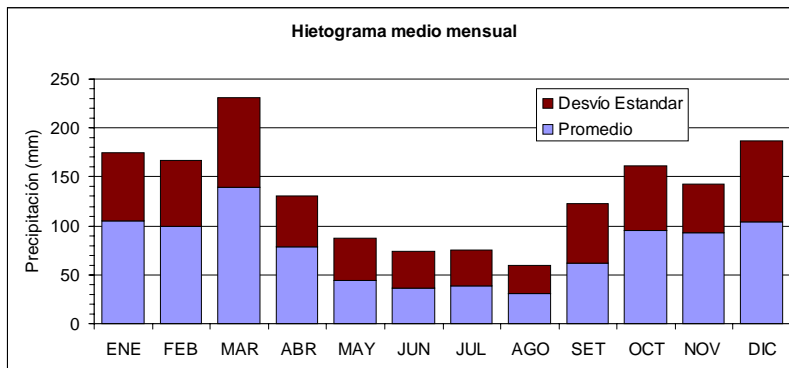
Figura 12. Evolución de las ocurrencias de eventos lluviosos. Estación Empalme.



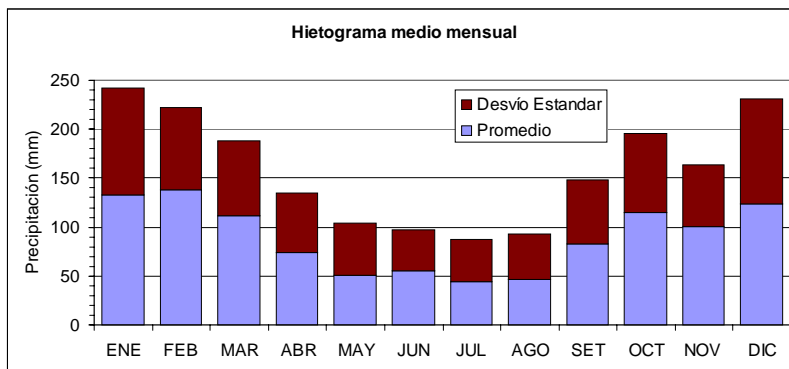
**Figura 13.** Hietograma medio mensual. Estación Bombal



**Figura 14.** Hietograma medio mensual. Estación Chovet.



**Figura 15.** Hietograma medio mensual. Estación Santa Teresa.



**Figura 16.** Hietograma medio mensual. Estación Empalme.

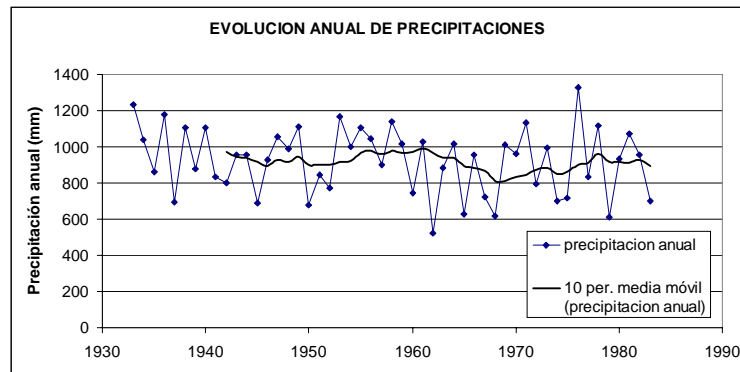


Figura 17. Evolución de lluvias anuales. Estación Bombal.

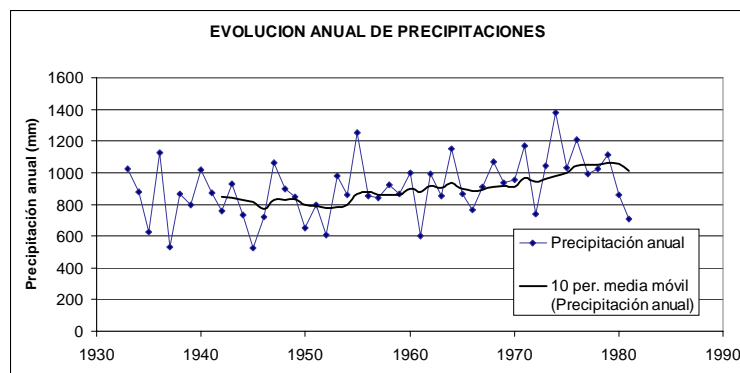


Figura 18. Evolución de lluvias anuales. Estación Chovet.

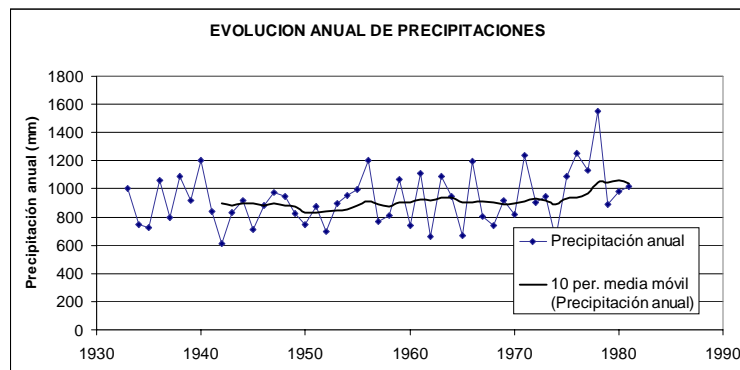


Figura 19. Evolución de lluvias anuales. Estación Santa Teresa.

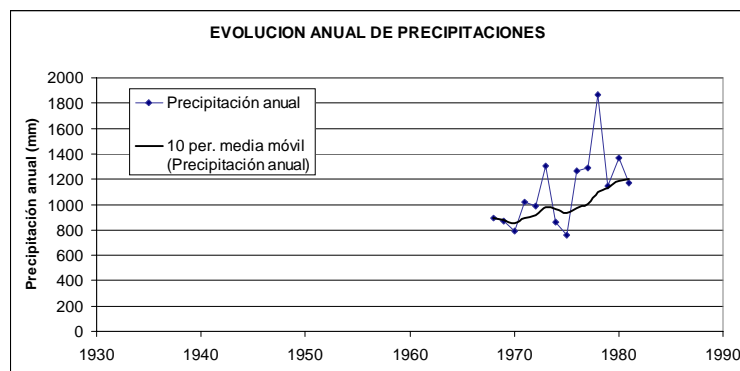


Figura 20. Evolución de lluvias anuales. Estación Empalme.

### **Análisis de estadísticos.**

Respecto a las ocurrencias de eventos lluviosos, pudo observarse un comportamiento semejante en las estaciones de medición.

En principio, los coeficientes de variación para los números de eventos mensuales oscilan entre el 40% y el 100%, lo cual pone de manifiesto una dispersión importante alrededor de los valores medios. Esto se vé acentuado durante los meses invernales, ya que los CV son superiores (casi duplican) a sus respectivos estivales.

Este aspecto descriptivo de las muestras analizadas, evidencia la dificultad de pronosticar correctamente el número de ocurrencias de lluvias si ésta fuese considerada como una variable aleatoria independiente.

Un pronóstico de  $N$  utilizando técnicas de generación aleatoria, como por ejemplo el método de Monte Carlo, resultaría en un amplio rango de valores para  $N$ . La posibilidad de condicionar el valor del número de ocurrencias a la precipitación mensual, como se propone en este trabajo, restringe grados de libertad a la variable y posibilita un mejor pronóstico. Las Figuras 5 a 8 presentan en diagramas de barras los números medios de ocurrencias de lluvia mensual para cada estación. En la parte superior de cada barra se representa la magnitud del desvío estándar.

Se han graficado también las evoluciones anuales de las ocurrencias de lluvia para cada estación junto a sus medias móviles tomando 10 períodos de amplitud (Figs. 9 a 12). Puede observarse que, salvo para la estación Bombal donde el carácter es aproximadamente estacionario, el número de ocurrencias se manifestó de una manera creciente durante los últimos años.

Respecto a las precipitaciones mensuales, son válidas las observaciones realizadas anteriormente. La variabilidad de las precipitaciones mensuales es incluso superior a la registrada para las ocurrencias de lluvia. No obstante, dado que esta variable representa un input del modelo no afectará el desenvolvimiento del mismo.

Las Figuras 13 a 16 presentan los hietogramas medios mensuales para cada estación. Al igual que en el caso anterior en la parte superior de cada barra se representa la magnitud del desvío estándar. Como características generales, las lluvias son mayoritariamente estivales, siendo marzo el mes más lluvioso (excepto en la estación

Empalme).

Se han graficado también las evoluciones de la precipitación anual para cada estación junto a sus medias móviles tomando 10 períodos de amplitud (Figs. 17 a 20). Puede observarse que, salvo para la estación Bombal donde el carácter es aproximadamente estacionario, el módulo pluviométrico se ha mostrado creciente durante los últimos años, y las medias móviles han superando el umbral de los 1000 mm.

### **Análisis paramétrico**

Los estadísticos calculados para las estaciones de registro pluviométrico permiten determinar los valores de los parámetros  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$  sabiendo que el primero representa el número medio mensual de ocurrencias de lluvia y el segundo puede estimarse aplicando la ecuación (5).

Con el fin de que  $\lambda_1$  sea comparable a resultados alcanzados por otros autores se los ha referido a intervalos diarios, es decir número medio de ocurrencias de lluvia en un período de un día.

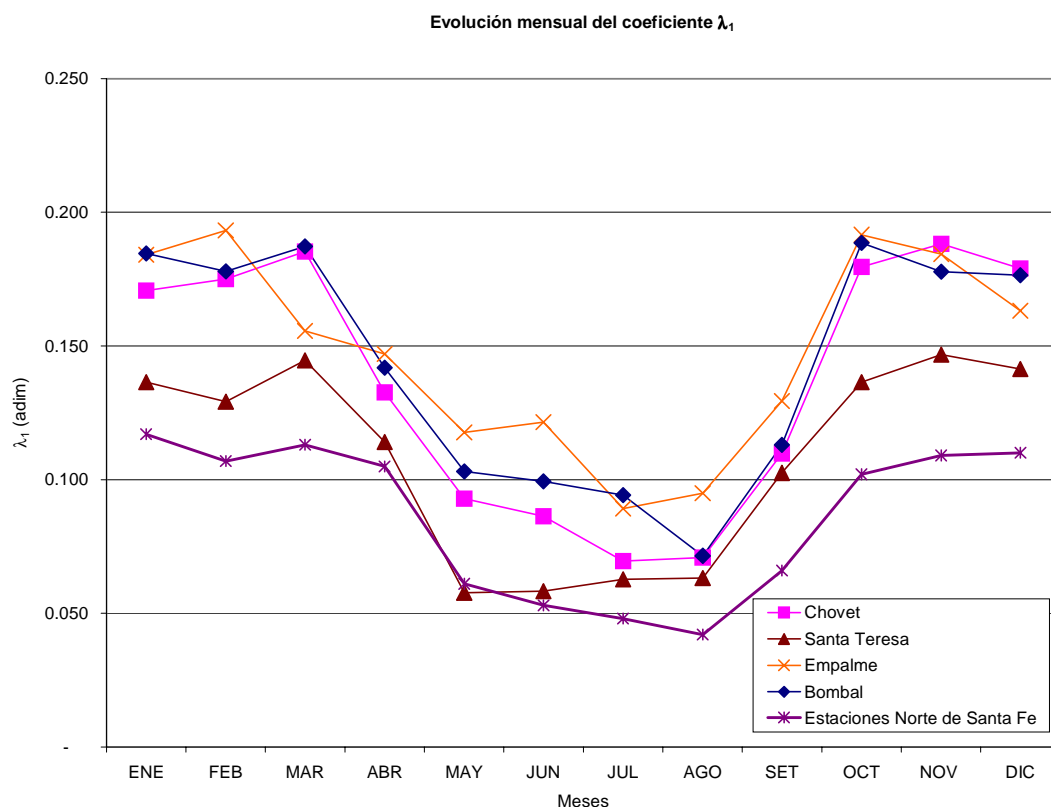
Las Tablas 9 y 10 presentan los valores de los parámetros mencionados para cada estación.

Los mismos fueron comparados con valores promedios obtenidos por Vanlesberg y Silber (1999) para seis estaciones pluviométricas ubicadas en la zona norte de la provincia de Santa Fe. Estos autores utilizaron los mismos modelos probabilísticos que Antigüedad, García Muñiz y Llamas (1995), e iguales a los que se presentan en este trabajo. Graficamente estas evoluciones se representan en las Figuras 21 y 22.

Puede observarse que los números medios de eventos mensuales  $\lambda_1$  en el caso de las estaciones del norte santafecino son inferiores a las del sur santafecino. Como en esencia no hay gran variabilidad de los módulos pluviométricos en ambas regiones, esto puede deberse a los criterios empleados para la selección de eventos. Probablemente, para las estaciones seleccionadas por Vanlesberg y Silber se desestimaron tormentas pequeñas reduciéndose el número de eventos considerados. En el caso de las estaciones seleccionadas para este trabajo, se consideraron todos los eventos que fueron volcados a las planillas. Consecuentemente, considerando la ecuación (5), los valores de  $\lambda_2$  también resultan inferiores para las estaciones del norte santafecino.

Estación	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
Bombal	0.185	0.178	0.187	0.142	0.103	0.099	0.094	0.071	0.113	0.188	0.178	0.176
Chovet	0.172	0.175	0.187	0.130	0.093	0.083	0.071	0.070	0.107	0.180	0.186	0.182
S. Teresa	0.137	0.127	0.146	0.114	0.058	0.059	0.064	0.064	0.101	0.137	0.147	0.142
Empalme	0.185	0.183	0.157	0.144	0.123	0.121	0.091	0.099	0.123	0.190	0.181	0.159
<b>Promedio</b>	<b>0.170</b>	<b>0.166</b>	<b>0.169</b>	<b>0.133</b>	<b>0.094</b>	<b>0.091</b>	<b>0.080</b>	<b>0.076</b>	<b>0.111</b>	<b>0.174</b>	<b>0.173</b>	<b>0.165</b>
Norte de Santa Fe	0.117	0.107	0.113	0.105	0.061	0.053	0.048	0.042	0.066	0.102	0.109	0.110

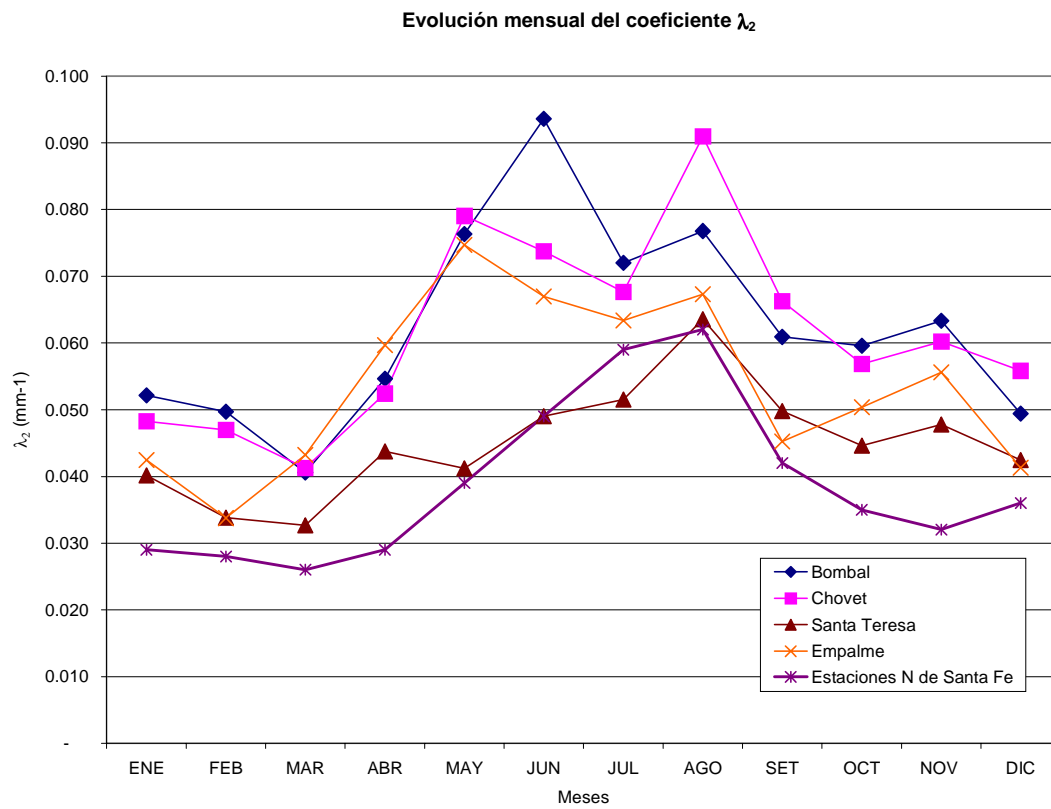
**Tabla 9.** Evolución mensual del coeficiente  $\lambda_1$



**Figura 21.** Evolución mensual del coeficiente  $\lambda_1$

Estación	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
Bombal	0.052	0.050	0.041	0.055	0.076	0.094	0.072	0.077	0.061	0.060	0.063	0.049
Chovet	0.048	0.048	0.041	0.052	0.079	0.073	0.068	0.093	0.065	0.057	0.060	0.055
S. Teresa	0.041	0.036	0.033	0.044	0.041	0.049	0.052	0.064	0.049	0.045	0.047	0.042
Empalme	0.043	0.037	0.044	0.058	0.075	0.065	0.064	0.067	0.045	0.051	0.054	0.040
<b>Promedio</b>	<b>0.046</b>	<b>0.043</b>	<b>0.040</b>	<b>0.052</b>	<b>0.068</b>	<b>0.070</b>	<b>0.064</b>	<b>0.075</b>	<b>0.055</b>	<b>0.053</b>	<b>0.056</b>	<b>0.047</b>
Norte de Santa Fe	0.029	0.028	0.026	0.029	0.039	0.049	0.059	0.062	0.042	0.035	0.032	0.036

**Tabla 10.** Evolución mensual del coeficiente  $\lambda_2$



**Figura 22.** Evolución mensual del coeficiente  $\lambda_2$

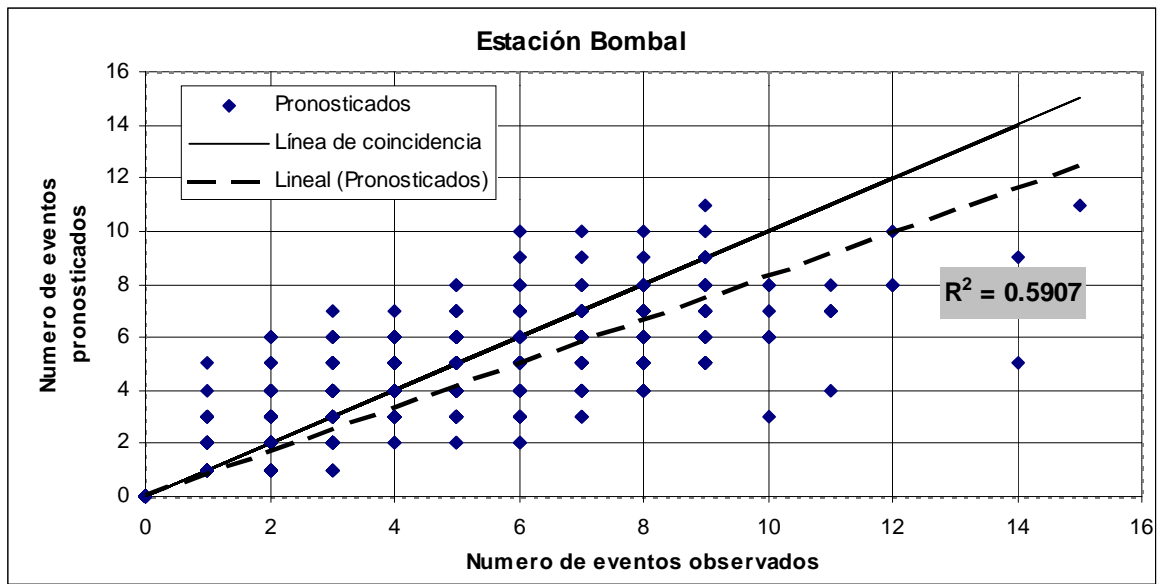
**Resultados obtenidos al aplicar la metodología.**

El método propuesto se aplicó a las series mensuales de precipitación de cada estación y en base a los parámetros obtenidos de los estadísticos, según se describió en el párrafo anterior.

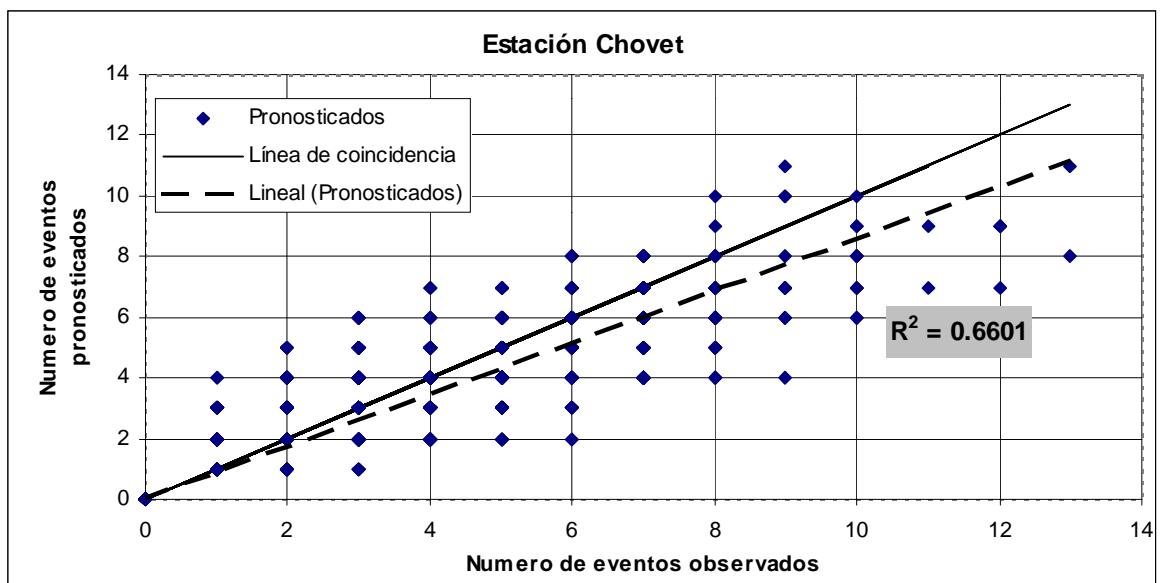
Como consecuencia de ello los resultados obtenidos se presentan en la tabla adjunta y se grafican en las Figuras 23 a 26.

Estación	N Observado	N Pronosticado	Coefic. de Correlación
Bombal	2658	2410	0.769
Santa Teresa	2043	1874	0.757
Chovet	2540	2343	0.812
Empalme	910	854	0.674

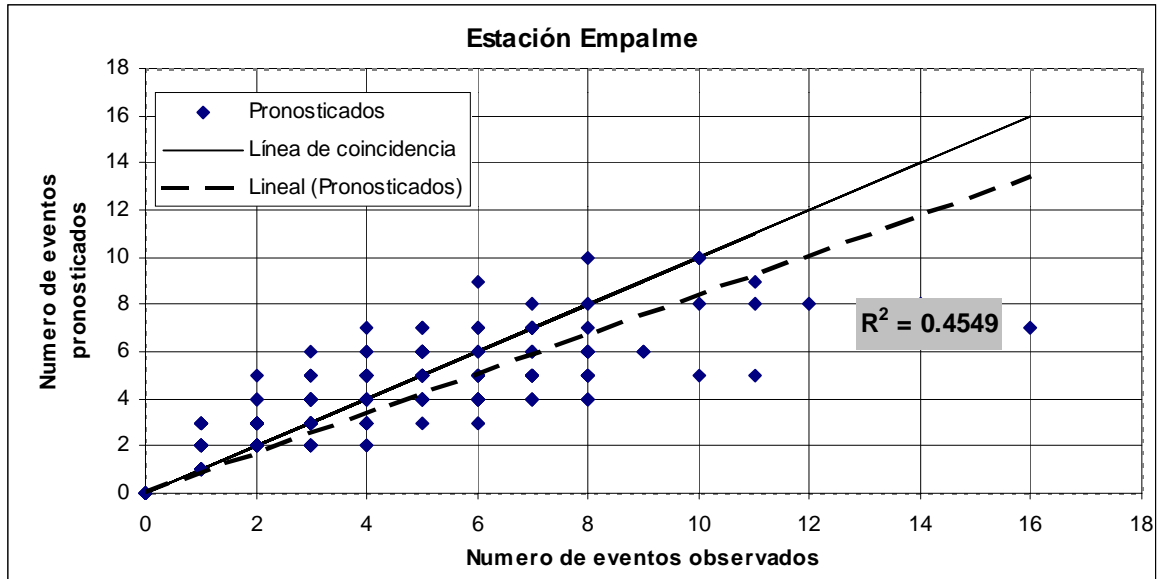
Como se observa en las rectas de ajuste (líneas de trazo) y en la tabla adjunta, se evidencia una tendencia general a subestimar el número de



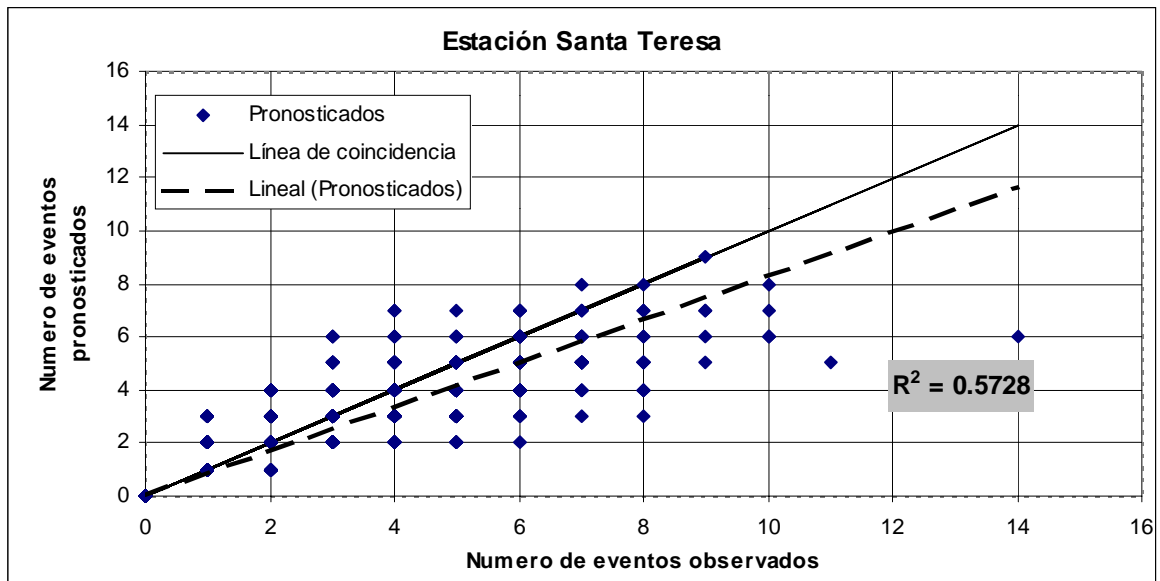
**Figura 23.** Número de ocurrencias de eventos de lluvia pronosticados y observados en estación Bombal



**Figura 24.** Número de ocurrencias de eventos de lluvia pronosticados y observados en estación Chovet



**Figura 25.** Número de ocurrencias de eventos de lluvia pronosticados y observados en estación Empalme



**Figura 26.** Número de ocurrencias de eventos de lluvia pronosticados y observados en estación Santa Teresa

eventos. La dispersión alrededor de las rectas de coincidencia demuestran que la precipitación mensual no es la única variable que controla el número de eventos de lluvia del mes. Se pone de manifiesto que existen complejos factores climatológicos que dominan la variable estudiado y que, necesariamente, están fuera del alcance en la metodología propuesta.

No obstante, teniendo en cuenta la simplicidad de la propuesta, y atendiendo a la información que frecuentemente está disponible, se puede considerar que la misma es satisfactoria.

Además, es una propuesta superadora a la de estimar el número de eventos  $N$  como una variable aleatoria pura.

La utilidad final de la metodología podrá evaluarse cuando se comparen las láminas de escurrimiento estimadas utilizando las precipitaciones observadas y las pronosticadas con este algoritmo. Para completar el cálculo podrá emplearse la metodología propuesta por Scozzafava y Tallini (2001) para estimar las láminas de los eventos de precipitación o bien deberá proponerse una metodología alternativa a la misma. Esta será una fase del trabajo a desarrollar.

## CONCLUSIONES

El balance hídrico mensual de Thornthwaite y Mather, aplicado en forma seriada para una secuencia de años, permite estimar excedentes de agua que no son almacenados en el perfil del suelo. En combinación con el método empírico del US-SCS, es posible deducir de los excedentes la porción destinada a la infiltración neta que alimentaría un acuífero freático.

Se propuso una metodología basada en el teorema de Bayes para estimar el número de ocurrencias de eventos lluviosos en un mes considerado condicionando el pronóstico a la lámina mensual. Se desarrolló un algoritmo para estimar el número más probable de eventos, el cual fue aplicado en cuatro estaciones de la región meridional de Santa Fe.

Los resultados obtenidos resultaron satisfactorios al compararse más de 2000 pronósticos de ocurrencias de lluvia con los registros observados. Dada la elevada varianza que presenta el número de ocurrencias de eventos lluviosos en los registros observados, considerar ésta variable en forma aleatoria e independiente puede dar lugar a desviaciones importantes entre pronósticos y observaciones, en consecuencia, se considera que

el método propuesto arroja resultados promisorios.

Deberá evaluarse a posteriori la performance del mismo mediante comparación de láminas de escurrimiento estimadas utilizando las precipitaciones observadas y las pronosticadas con el algoritmo.

## REFERENCIAS

- Antigüedad I, García Muñoz J, Llamas J. (1995) A mathematical model for precipitation in the Basque Country, Spain. *Hydrological Sciences Journal*. **40** (3). 291-301. IAHS Press. Wallingford. UK.
- Arnaud P, Lavabre J. (1999) Using a stochastic model for generating hourly hyetographs to study extreme rainfalls. *Hydrological Sciences Journal*. **44** (3). 433-445. IAHS Press. Wallingford. UK.
- Boughton WC (1989) A review of the USA-SCS curve number method. *Aust J Soil Research*. **27**. 511-523.
- Cox, D.R. and Isham, V. (1994). Stochastic models of precipitation. In: Statistics for the environment 2: Water related issues, (ed. V. Barnett and K. Turkman), 3-18. Wiley, Chichester.
- Chow VT, Maidment D, Mays L. (1995) Hidrología Aplicada; Edit Mc Graw-Hill Interamericana SA; ISBN 0-07-010810-2; Colombia.
- D'Elía M, Paris M, Tujchneider O, Pérez M. (2002) Groundwater recharge quantification in a west sector of the llanura pampeana, Argentina. In: International Conference on Balancing the Groundwater Budget. Darwin. Australia.
- Eagleson, P. S. (1972) Dynamics of floods frequency. *Water Resources Research*. **8** (4), 878-898.
- Hawkins RH, Hjelmfelt AT, Zevenbergen AW. (1985) Runoff probability, storm depth and curve numbers. *J. Irrig Drain Div. ASCE*. **111**. 330-340.
- Montgomery D y G Runger (1996). Probabilidad y Estadística Aplicadas a la Ingeniería. ISBN 970-10-1017-5. Edit. McGraw-Hill. México.
- Paris M, D'Elia M, Perez M y Tujchneider O (2002) Análisis estocástico de variables hidrometeorológicas para la estimación de recarga de acuíferos. In: XXXII IAH Congress. Mar del Plata. Argentina.

- Scozzafava M., Tallini M. (2001) Net Infiltration in the Gran Sasso Massif of central Italy using the Thornthwaite water budget and curve-number method. *Hydrogeology Journal*. **9** (5). 461-475. Springer-Verlag. Germany.
- Thornthwaite CW, Mather JR. (1957) Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. **10** (3). CW Thornthwaite Associates, Laboratory of Climatology, Elmer, NJ, USA.
- Todorovic P. (1967) Applied Probability Course Notes. Fort Collins, Colorado, USA.
- USDA-SCS (1986) National engineering handbook, sect 4, hydrology. US Department of Agriculture-Soil Conservation Service, Washington, DC, USA.
- Vanlesberg S. y Silber M. (1999) Modelo de Lluvia aplicado a la provincia de Santa Fe. Cuadernos del CURIHAM. **5** (2). 5-14. UNR Editora.
- Zimmermann E., Fava G., Gómez G. (1988) Estudio hidrológico del A° Pavón (Santa Fe). Informe de avance N°1. Departamento de Hidráulica. FCEIA. UNR. Inédito.