

ESTUDIO DE PRECIPITACIONES EN LA CIUDAD DE TRELEW, ANÁLISIS ESTADÍSTICO Y ECUACIÓN DE LLUVIA

María Jesús Chachero

Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco.
Av. 9 de Julio 25, CP 9100, Trelew, Peia. del Chubut, Argentina. Tel: 0280-442-8403
e_mail: dich1@tw.unp.edu.ar – www.dich.edu.ar

RESUMEN

El presente trabajo tiene por objeto ordenar y sistematizar la información pluviométrica en el área de influencia de la ciudad de Trelew y actualizar las ecuaciones de lluvia para la serie de datos disponible a la fecha. Los estudios estadísticos de tormentas, que determinan las relaciones de Intensidad-Duración-Recurrencia (I-d-T), constituyen la base de cálculo para la determinación de la tormenta de diseño en un sinnúmero de problemas de la ingeniería hidráulica y ciencias afines. Por tratarse de variables dinámicas conviene un análisis continuo y ajuste permanente, principalmente en las variables más sensibles, como es la precipitación máxima, por lo que se buscaron nuevas relaciones funcionales que resultaron algo distintas a las hasta hoy existentes en términos de períodos de retornos asociados. La interpretación y uso, debe hacerse en el marco estricto de las hipótesis del método probabilístico, con sus limitaciones y restricciones. Las nuevas relaciones funcionales ajustadas son las que se recomiendan utilizar en la determinación del evento o los eventos de lluvia que servirán de base en el estudio técnico y diseño de obras. La información sistematizada intenta además lograr un mecanismo de difusión que contribuya al conocimiento de los posibles usuarios y pueda ser utilizada por los sectores interesados en el tema.

Palabras clave: Intensidad máxima, Período de Retorno, Curvas IdT, registros pluviométricos.

ABSTRACT

This paper aims to organize and systematize rainfall data for the Trelew catchment area, and update the rain equations for the series of data available to date. Statistical studies of storms, which determine the relations of intensity-duration-frequency (I-d-F curves), form the basis of calculation for determining storm design in innumerable problems of hydraulic engineering and related sciences. Dynamic variables should be subject to continuous analysis and permanent adjustment, especially in the most sensitive variables, such as maximum rainfall, hence new functional relationships can be found, which prove to be different to those existing, in terms of the associated return periods. The interpretation and use must be made strictly within the framework of the assumptions of the probabilistic method with its limitations and restrictions. The new, adjusted functional relationships are those recommended to be used in determining the rainfall event or events that form the base of technical study and the design of works. The systematized information attempts to achieve a dissemination mechanism that contributes to the knowledge of potential users and can be used by the different sectors with interests in the field.

Key words: Maximun Intensity, Rain return, IdF curves, pluviometric records.

INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso fundamental para la vida y un factor esencial para el sector productivo, por lo que la caracterización de precipitaciones en la ciudad de Trelew tiene especial importancia, ya que permite obtener una información valiosa que constituye la base de cálculo para la determinación de la tormenta de diseño en muchos problemas de la ingeniería hidráulica y ciencias afines, a cuyas estimaciones proveyeron distintos estudios e investigadores.

Se pretende sistematizar la información existente para que sea de utilidad en caracterizaciones o informes. Debe señalarse también la importancia de las precipitaciones como factor principal en la formación de escorrentías, incidiendo en forma directa en el balance hidrológico, siendo por tanto un elemento de diseño hidráulico.

La estimación de caudales resulta fundamental en el diseño de infraestructuras, planificación del territorio, caracterización de sistemas fluviales y para ello, los modelos hidrometeorológicos son una herramienta imprescindible. Estos modelos requieren a su vez, conocer la precipitación máxima diaria anual para distintos períodos de retorno y las leyes Intensidad – Duración – Recurrencia.

En este trabajo se plantea una revisión en profundidad de estas leyes para incorporar los nuevos registros que se han producido, utilizar nuevas funciones de distribución y mediante diferentes pruebas, seleccionar los mejores resultados.

Las investigaciones más relevantes se inician en la década del '80, cuando la antigua Dirección General de Estudios y Proyectos del Ministerio de Economía, Servicios y Obras Públicas de la Provincia del Chubut (MESOP), se proponía analizar los riesgos crecientes de inundaciones torrenciales por lluvias locales en diferentes urbanizaciones del Valle Inferior del Río Chubut.

En ese contexto se desarrolla un primer estudio de precipitaciones (Vicenty, 1984), con una serie disponible de 10 años de información en fajas pluviográficas, de la Estación Experimental del INTA en la ciudad de Trelew.

En el período 1992-1995, se procede a un nuevo análisis de las precipitaciones en la región del Valle Inferior del Río Chubut (VIRCh), incluyendo la revisión de la documentación original y el método de análisis

de tormenta, ampliando la serie a 14 años de datos, y el desarrollo de software de apoyo apropiado para la producción de funciones Precipitación – Duración – Recurrencia (PDR) e Intensidad – Duración – Recurrencia (IDR). Los resultados fueron oportunamente publicados en el Congreso Nacional del Agua de La Plata en el año 1994 (Villegas et al., 1994).

En Abril de 1998 ocurre un evento de características extraordinarias que abarca toda la región del VIRCh. La lluvia caída alcanzó 230.1 mm en sólo 54 horas, (según datos del Servicio Meteorológico Nacional para la ciudad de Trelew). Esta lluvia, caída en poco más de 2 días, es de una magnitud equivalente a la precipitación normal de un año y medio. No menos impactante resultó la máxima lluvia en 24 horas (151 mm). La recurrencia de la tormenta estimada en base a los estudios existentes -sin tener en cuenta esta tormenta-, era de 170 años para la máxima diaria, y de 300 años para la máxima en 18 horas.

A raíz de este importante evento, en 1998 se revisan las ecuaciones de tormenta incorporando cinco años de datos pluviográficos, y esta tormenta en particular. Asimismo, en esta oportunidad se cuenta con la serie de tormentas diarias máximas de la estación Trelew - Aeropuerto del Servicio Meteorológico Nacional del período 1933-1998 (50 años completos). La incorporación de estos nuevos datos modifica sustancialmente las estimaciones de IDF, y de lluvias máximas diarias (Chachero, 1998).

En esta oportunidad, se ha obtenido más información del Servicio Meteorológico Nacional, contando por tanto con 72 años de datos completos para el período 1933-2010. Asimismo, la longitud de la serie de datos pluviográficos es ahora de 26 años. En virtud de este nuevo y significativo incremento de la información y considerando la importancia de un análisis continuo y ajuste permanente de las variables más sensibles, como es la precipitación máxima, se buscan nuevas relaciones funcionales que resultan algo distintas a las hasta hoy existentes en términos de períodos de retornos asociados.

La interpretación y uso de estas expresiones, debe hacerse en el marco estricto de las hipótesis del método probabilístico, con sus limitaciones y restricciones.

OBJETIVOS

El objetivo de este trabajo es ordenar y sistematizar la información pluviométrica de la ciudad de Trelew y

actualizar las ecuaciones de tormenta (Precipitación - Duración - Recurrencia e Intensidad - Duración - Recurrencia) en la región del Valle Inferior del Río Chubut para la serie de datos disponibles hasta la fecha.

METODOLOGÍA

El conocimiento de las características de las precipitaciones intensas es de gran importancia para el dimensionamiento de obras hidráulicas tales como canales, vertederos, presas, etc. Las relaciones entre Intensidad - Duración - Recurrencia de las precipitaciones, deben ser deducidas a partir de observaciones de precipitaciones ocurridas durante un largo período de tiempo.

Recopilación y Valoración de Antecedentes

Se detalla la información recopilada, que se considera de interés. Los emplazamientos e información general de las estaciones con las que se ha trabajado son los siguientes:

□ Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria-Estación Experimental Trelew (INTA)

Ubicada en la zona de riego en estudio (Valle del río Chubut), aproximadamente a 5 km de Trelew, con latitud Sur: 43° 16' 20''; longitud Oeste: 65° 21' 40'' y altitud 10 m. En el sitio existió una Estación Meteorológica Completa en el período 1970/96. En el año 1996 se instaló una estación automática Monitor II de Davis Instruments configurada con paso horario, aunque se siguió registrando la precipitación en la forma tradicional. En el año 2001 se reemplazó la estación existente, por una estación automática GroWeather Link de Davis Instruments configurada también con paso horario.

Asimismo, se contó con la información básica utilizada en el "Estudio de Precipitaciones en el VIRCH" (Villegas et al., 1994). En éste se analizaron las fajas pluviográficas de la Estación de INTA - Trelew para el período 1975/88.

En resumen, se dispone de información diaria en el período 1970-2008, e información pluviográfica de 14 años.

□ Estación del Departamento de Física de la Facultad de Ingeniería UNPSJB (EFísica)

Estación automática emplazada en la ciudad de Trelew, en el predio de la Universidad Nacional de la Patagonia, con coordenadas: Latitud 43° 14' 59''S;

Longitud: 65° 18' 30''W y altitud 14 m. La estación es Monitor II de Davis Instruments con paso de minuto, y registra información pluviográfica desde noviembre de 1998. Se dispone de la información 12 años completos (1999-2010), con registro cada minuto.

□ Servicio Meteorológico Nacional (SMN)

La estación del Servicio Meteorológico Nacional estaba ubicada en coordenadas 43° 14' S, 65° 18' W, hasta el año 1975, que trasladó su emplazamiento a coordenadas 43° 12' S, 65° 17' W. Presenta una importante información de largo período, se dispone de la serie de precipitación diaria del período 1933-2010, con algunos faltantes (72 años completos).

Análisis de la información

Primeramente se efectúa un análisis de consistencia de la información, descartando datos erróneos o poco confiables. Una vez depuradas y contrastadas las series, se procede a la sistematización de la información, y obtención de los estadísticos más usuales. De ellos se puede obtener un conocimiento más preciso de los datos, que el que se obtiene a partir de las tablas y gráficos de datos cronológicos. Las características descriptivas más importantes del conjunto de datos son: la precipitación media, mínima y máxima mensual; número de días de lluvia medio mensual; precipitación máxima diaria e identificación de eventos extraordinarios. Asimismo, entre los estadísticos usuales se calcula la mediana, moda, rango, varianza, coeficiente de variación, sesgo y curtosis.

En el análisis estadístico de lluvias máximas suelen emplearse modelos de series anuales de máximos, con lo que sólo se considera el mayor valor de cada uno de los años con datos, y métodos paramétricos que utilizan diversas leyes de distribución cuyos parámetros son ajustados a partir de los datos (Ferrer Polo, 1993).

Esta modelación requiere la elección de:

- Ley de distribución de la población.
- Método de estimación de parámetros.

Para asignar la frecuencia a la información disponible, se empleó la expresión de Gringorten:

$$F_{\text{exp}} = \frac{m - 0,44}{n + 0,12} \quad (1)$$

Siendo m, el número de orden del valor considerado dentro de la serie de n valores.

Dentro de un amplio conjunto de posibilidades, los modelos elegidos en este trabajo se resumen en la Tabla 1, ecuaciones (2) a (7).

Para utilizar estos modelos probabilísticos, se deben calcular sus parámetros, que según las diferentes funciones, son los que se indican en la Tabla 1.

Tabla 1. Definición de Modelos Estadísticos.

Distribución	F(x) o f(x)	Parámetros	Métodos de ajuste
Normal	$f_x = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}\right)$ (2)	\bar{X} Localización σ Escala	Momentos
Gumbel	$F_{(x)} = \exp\left[-\exp\left(-\frac{x-x_0}{\alpha}\right)\right]$ (3)	x_0 Localización α Escala	Momentos Momentos Ponderados Máxima Verosimilitud
Frechet	$F_{(x)} = \exp\left[-\exp\left(-\frac{\ln(x)-x_0}{\alpha}\right)\right]$ (4)	x_0 Localización α Escala	Momentos Momentos Ponderados Máxima Verosimilitud
SQRT - ET _{MAX}	$F_{(x)} = \exp\left[-k \cdot (1 + \sqrt{\alpha \cdot x}) \cdot \exp(-\sqrt{\alpha \cdot x})\right]$ (5)	k Forma α Escala	Máxima Verosimilitud
GEV (Valores extremos generalizados)	$F_{(x)} = \exp\left[-\left(1 - k \frac{x-x_0}{\alpha}\right)^{1/k}\right]$ (6)	x_0 Localización k Forma α Escala	Momentos Momentos Ponderados Máxima Verosimilitud
Log Pearson III	$f_x = \frac{1}{\alpha \cdot \Gamma(r)} \cdot (x-x_0)^{r-1} \cdot \exp\left(-\frac{x-x_0}{\alpha}\right)$ (7)	x_0 Localización r Forma α Escala	Momentos

En la distribución Normal (2), los parámetros son la media (\bar{X}) y la varianza (σ).

En la distribución de Gumbel (3), los parámetros son x_0 y α , que mediante el método de los momentos se determinan con las expresiones (8) y (9):

$$x_0 = \bar{x} - 0.45 \cdot \sigma \quad (8)$$

$$\alpha = \frac{\sqrt{6}}{\pi} \cdot \sigma \quad (9)$$

Siendo \bar{X} y σ , la media y el desvío de la variable x.

La distribución de Frechet (4), difiere de la de Gumbel en la determinación de la variable, que se determina como el logaritmo natural del dato y los parámetros se determinan en la misma forma que en aquella (expresiones (8) y (9)).

La distribución SQRT-ET_{MAX} (5), originalmente propuesta en el contexto de precipitaciones máximas en Japón, ha venido siendo recomendada por la Dirección General de Carreteras de España, para la modelización de las precipitaciones máximas (Ferrer Polo y Ardiles, 1994). La estimación directa de los parámetros de la función SQRT-

ET_{MAX} no se puede hacer de forma analítica, ya que F(x) carece de primitiva conocida. Por esto, se debe realizar de forma aproximada mediante métodos numéricos (Sáez Castillo, 2009; Zorraquino Junquera, 2004).

Los parámetros de la distribución de valores extremos generalizada, GEV (6), ajustan el dominio según:

$$\begin{aligned} k < 0 & \quad x > \mu + \frac{\alpha}{k} \\ k > 0 & \quad x < \mu + \frac{\alpha}{k} \end{aligned} \quad (10)$$

En la distribución Log Pearson tipo III (7) el parámetro de posición x_0 , cumple:

$$\begin{aligned} x_0 & \leq x < \infty \\ -\infty & < x_0 < \infty \end{aligned} \quad (11)$$

Mientras que los parámetros de forma (r) y de escala (α), están definidos entre 0 e infinito.

Determinando los parámetros mediante el método de los momentos, resulta:

$$x_0 = \bar{x} \cdot \ln x - \frac{2\sigma_{\ln x}}{C_{\ln x}} \quad (12)$$

$$r = \frac{4}{C_{\ln x}^2} \quad (13)$$

$$\alpha = \frac{C_{\ln x} \cdot \sigma_{\ln x}}{2} \quad (14)$$

Siendo respectivamente \bar{X} , $\sigma_{\ln x}$ y $C_{\ln x}$ la media, la desviación estándar y el sesgo del logaritmo natural de la variable x .

El proceso de análisis anterior puede llevarse igualmente a cabo para duraciones distintas de la diaria en caso de disponer de registros pluviográficos que permitan obtener las correspondientes series de máximos anuales.

Se denominan curvas Intensidad-Duración-Recurrencia (I-d-T) a aquellas que resultan de unir los puntos representativos de la intensidad en intervalos de diferente duración, para un mismo período de retorno.

En la construcción de las curvas I-d-T es necesario ajustar una distribución estadística a los mayores valores anuales de precipitación para cada duración. La selección de las duraciones depende de la discretización y de la representatividad deseada.

Las curvas I-d-T permiten mediante operadores estadísticos determinar la Ecuación Regional de lluvias, para intensidades y duraciones variables y sus respectivos períodos de retorno en años.

Además de su aplicabilidad a diversos estudios e investigaciones hídricas, su aplicación más directa resulta de interés en estudios y proyectos hidráulicos y, particularmente, en el diseño de estructuras de control de crecidas y desagües pluviales, con criterio probabilístico.

Las distribuciones estadísticas utilizadas son las mismas que para el análisis de la precipitación máxima diaria.

Pruebas de bondad del ajuste

Las pruebas de bondad de ajuste, son métodos de cálculo, que otorgan elementos de juicio con la finalidad de discernir si una ley de distribución teórica de probabilidades representa adecuadamente la muestra de la población analizada (Orsolini et al., 2000).

Consisten en comparar gráfica y estadísticamente, si la frecuencia empírica de la serie analizada, se ajusta a una determinada función de probabilidades teórica, seleccionada a priori, con los parámetros estimados con base en los valores muestrales.

Las pruebas estadísticas, tienen por objeto medir la certidumbre que se obtiene al hacer una hipótesis estadística sobre una población, es decir, calificar el hecho de suponer que una variable aleatoria, se distribuya según una cierta función de probabilidades.

En este trabajo se han empleado los siguientes métodos para ese fin:

- Análisis gráfico

Consiste en comparar gráficamente la función acumulada de la serie de datos, con la función acumulada teórica. La función teórica que más se apegue visualmente a los datos medidos será la de mejor ajuste.

- Error cuadrático mínimo

Consiste en calcular el error cuadrático (C) de cada distribución.

$$C = \left[\sum_{i=1}^n (x_{e_i} - x_{o_i})^2 \right]^{1/2} \quad (15)$$

Donde x_{e_i} es el i -ésimo dato estimado y x_{o_i} es el i -ésimo dato calculado con la función de distribución bajo análisis. Según este criterio, la de mejor ajuste será la que tenga el error cuadrático más pequeño.

- Prueba Chi – cuadrado

La prueba Chi-cuadrado (χ^2) se basa en el cálculo de frecuencias, tanto de los valores observados, como de los valores esperados, para un número determinado de intervalos.

Para aplicar la prueba deben dividirse los datos en un número k de intervalos de clase, para luego calcular el parámetro estadístico D (Aparicio Mijares, 1999).

$$D = \sum \frac{(\theta_i - \varepsilon_i)^2}{\varepsilon_i} \quad (16)$$

Donde θ_i es el número observado de eventos en el intervalo i y ε_i es el número esperado de eventos en el mismo intervalo.

Una vez calculado el parámetro D para cada función de distribución considerada, se determina el valor de una variable aleatoria con distribución χ^2 para $v = k-1-m$ grados de libertad y un nivel de significancia α , donde m es el número de parámetros estimados a partir de los datos.

Para aceptar una función de distribución dada, se debe cumplir:

$$D \leq \chi^2_{1-\alpha, v} \quad (17)$$

El valor de $\chi^2_{1-\alpha, v}$ se obtiene de tablas de la función de distribución Chi – cuadrado.

- Prueba de Kolmogorov – Smirnov

Esta prueba consiste en comparar el máximo valor absoluto de la diferencia Δ entre la función de distribución de probabilidad experimental basada en n observaciones $F_o(xn)$ y la función teórica bajo prueba $F(xn)$, con un valor crítico d que depende del número de datos y el nivel de significancia seleccionado.

$$\Delta = \max |F_o(xn) - F_{xn}| \quad (18)$$

RESULTADOS

Como material base para la sistematización de la información, se utiliza la información de la Estación del Servicio Meteorológico Nacional, y de la Estación Experimental Agropecuaria del INTA, distantes aproximadamente 5 km, ambas en las cercanías de la ciudad de Trelew, caracterizando la primera el ambiente de meseta y la segunda la zona del valle bajo riego.

La información pluviométrica de la estación del SMN cubre el período 1933/2010, con algunos años faltantes, totalizando 72 años de datos pluviométricos diarios; la estación del INTA cubre el período 1970/2008, de información continua de precipitaciones diarias.

La información pluviográfica que se utiliza para el presente, fue la elaborada en el "Estudio de Precipitaciones en el VIRCH" (Villegas et al., 1994). En éste se analizaron las fajas pluviográficas de la Estación de INTA - Trelew para el período 1975/88 (14 años), discretizando las tormentas resultando un valor máximo anual para cada intervalo de duración; estos datos fueron los que se emplearon y reelaboraron en el presente trabajo.

Se efectuó un proceso de contraste y verificación de información, y cálculo de coeficientes de correlación a nivel mensual entre la estación de INTA y la estación de Física, resultando éste del orden del 98%. También se realizaron correlaciones a nivel diario y los resultados fueron superiores a los de correlación mensual. Esto obedece a la gran cantidad de días con lluvia cero (concepto diferente a “sin dato”), por lo que también se procedió a la comparación de los días con información obteniendo resultados muy satisfactorios. Se efectuaron estos análisis porque se entiende que el hecho de que haya buena correlación entre datos mensuales no es condición suficiente para que en duraciones menores también lo sea, pero se privilegió la opción de contar con series de mayor longitud logradas con los registros de ambas estaciones.

De este modo, se decidió sumar a la información pluviográfica disponible la recogida por la Estación de Física, agregando 12 años de datos, totalizando de este modo series de 26 años de datos para cada una de las duraciones elegidas.

Precipitación Media Mensual

A continuación se efectúa un análisis preliminar de la información de las estaciones. Las estaciones cubren períodos de registro diferente, aunque se han realizado correlaciones entre períodos comunes, resultando altamente satisfactorias y ajustando a rectas de regresión de pendiente próxima a 1.

La precipitación media mensual tiene la marcha que se indica en la Tabla 2 y Figura 1 siguientes, para las tres estaciones en estudio.

Tabla 2. Precipitación Media Mensual (mm).

		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año
INTA	1970-2008	12.3	17.8	22.2	24.6	21.2	17.4	11.6	12.5	13.1	16.5	10.3	13.9	193.3
SMN	1933-2010	10.8	15.9	19.3	17.6	22.9	15.3	15.4	14.2	13.7	15.3	13.9	15.8	189.7
Efísica	1999-2010	20.5	23.4	12.7	13.1	27.8	17.7	15.1	11.3	21.5	17.4	17.8	10.1	208.4

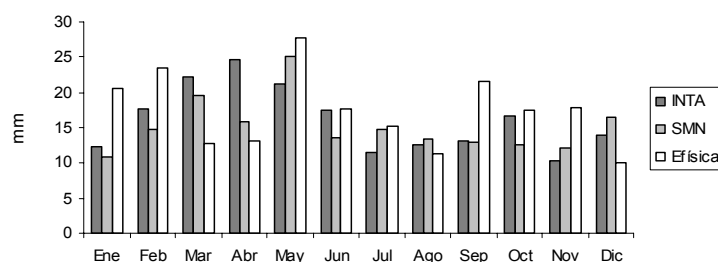


Figura 1. Precipitación Media Mensual.

Estadísticos más usuales

En la Tabla 3, se adjuntan algunos estadísticos de la estación del Servicio Meteorológico Nacional, que pueden ser de utilidad para calificar la información.

observa la importancia y representatividad de las series más extensas, existiendo para ambas estaciones (SMN e INTA), ausencia total de lluvia para todos los meses del año, en alguna oportunidad del período estudiado.

Precipitación Mínima Mensual

La precipitación mínima mensual tiene la marcha que se indica en la Tabla 4 y Figura 2, donde se

Precipitación Máxima Mensual

La precipitación máxima mensual tiene la marcha que se indica en Tabla 5 y Figura 3.

Tabla 3. Estadísticos Usuales (SMN).

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Mediana	6.65	9.25	11.30	9.60	15.20	10.35	8.15	9.50	7.95	10.25	9.95	8.35	178.30
Moda	0.00	0.10	10.00	0.00	15.00	9.00	1.00	1.90	0.00	0.00	0.00	0.00	
Max	58.60	140.90	74.50	244.80	118.80	108.40	66.00	61.00	60.50	99.10	54.50	102.20	368.60
Min	0.00	0.00	0.00	0.00	0.60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	78.80
Rango	58.60	140.90	74.50	244.80	118.20	108.40	66.00	61.00	60.50	99.10	54.50	102.20	289.80
Desv.Est	11.94	22.10	18.43	32.30	21.53	16.50	15.82	13.73	14.70	18.41	14.04	21.16	72.45
Curtosis	3.75	15.01	1.06	37.49	5.04	14.50	1.64	1.84	1.12	7.63	0.92	6.51	-0.29
CoefVar	1.10	1.39	0.96	1.83	0.94	1.08	1.03	0.97	1.07	1.21	1.01	1.34	0.38
Sesgo	1.83	3.34	1.27	5.59	1.93	3.14	1.51	1.53	1.35	2.47	1.17	2.48	0.72

Tabla 4. Precipitación Mínima Mensual (mm).

Precip Mín Mensual	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
INTA 1970-2008	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SMN 1933-2010	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Efísica 1999-2010	0	1.4	4.2	4.8	5.2	6	1.2	4.8	6	2.4	1.8	1.2

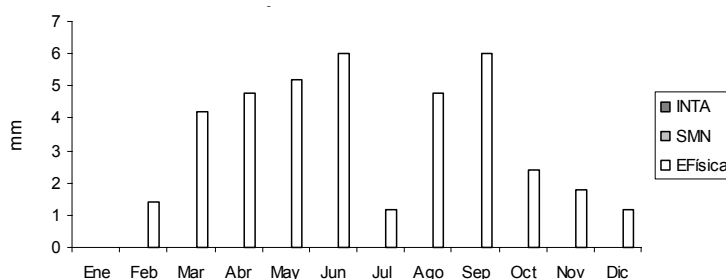


Figura 2. Precipitación Mínima Mensual.

Tabla 5. Precipitación Máxima Mensual (mm).

Precip. Máx. Mensual		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
INTA	1970-2008	45.5	135	73.6	251	105	76.6	48.6	55.2	51.2	102	46.1	88.9
SMN	1933-2010	58.60	140.90	74.50	244.80	118.80	108.40	66.00	61.00	60.50	99.10	54.50	102.20
Efísica	1999-2010	33.8	36.6	19.8	20.6	56.4	29.4	37.2	31.2	44.4	30.6	32	33.4

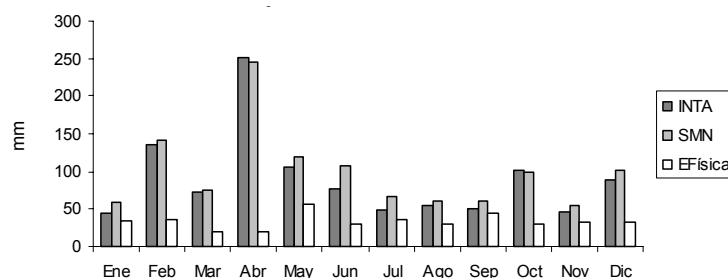


Figura 3. Precipitación Máxima Mensual.

Ajuste Precipitación Media Anual

Se procedió a ajustar la Precipitación Media Anual de la serie del SMN mediante las distintas funciones de distribución desarrolladas en la Metodología (Tabla 1).

Por tratarse de valores medios, se logra un adecuado ajuste a través de la función Normal, que se observa en el siguiente gráfico acompañado por los valores esperables para diferentes recurrencias (Tabla 6 y Figura 4).

Tabla 6. Precipitación Media Anual – Recurrencia.

T	P(mm)
2	189
5	248
10	279
25	312
50	334
100	353
200	370
500	392

Precipitación Máxima diaria

Se determinó la máxima precipitación diaria para cada mes de las series del SMN y de Física.

Obsérvese que los mayores valores se presentan entre octubre y mayo, resultando los meses de invierno, libres de registros extraordinarios.

Los valores de precipitación máxima diaria para cada estación, son los que se indican en la Tabla 7.

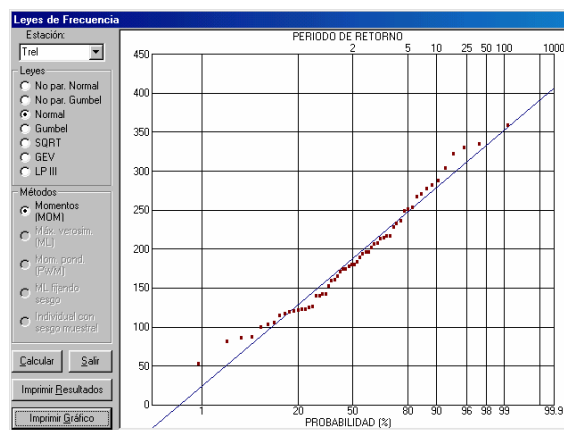


Figura 4. Precipitación Media Anual – Recurrencia.

Tabla 7. Precipitación Máxima Diaria (mm).

		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
SMN	1933-2010	41.6	89.9	97.9	151.4	64	31	46	30.6	36	58.2	33	52
Efísica	1999-2010	19.2	19	10	18	22.8	13.2	21	12.6	20.2	18.4	22.2	17.2

Determinación de la lluvia diaria máxima

Para el análisis estadístico de lluvia diaria máxima se empleó un modelo de serie anual de

máximos, con lo que sólo se considera el mayor valor de precipitación diaria de cada uno de los años con datos, totalizando una serie de 72 valores.

Esta modelación requiere la elección de:

- Ley de distribución de la población.
- Método de estimación de parámetros.

Dentro de un amplio conjunto de posibilidades, los modelos elegidos en este trabajo son los que se resumen en la Tabla 1.

Para asignar la frecuencia a la información disponible, se empleó la expresión de Gringorten (ecuación (1)).

El software aplicado es el CHAC, diseñado por el Centro de Experimentación de Obras Públicas de España (Cedex) y disponible en Internet.

En la Tabla 8 se resumen los resultados de los diferentes ajustes.

Tabla 8. Precipitación Máxima Diaria (mm) según diferentes Funciones de Distribución.

Función	Parám.	Recurrencia (años)										
		2	5	10	25	50	100	200	500	1000	2000	5000
Normal		31	50	59	69	76	82	87	94	99	103	108
Gumbel	Mom	28	47	60	76	88	100	112	127	139	151	166
Gumbel	ML	28	40	49	59	67	75	83	93	101	109	119
Gumbel	PWM	28	44	55	68	78	88	97	110	120	130	142
SQRT		26	39	49	63	74	85	98	116	130	146	167
GEV	Mom	26	43	56	75	92	111	132	164	193	225	274
GEV	ML	25	39	52	74	95	123	159	221	283	363	504
GEV	PWM	25	38	51	74	97	127	165	234	304	395	558
LPIII		25	40	53	76	98	125	158	212	269	336	452
Frechet	MOM	25	39	53	78	104	138	183	265	352	466	676

Pruebas de bondad del Ajuste

Se observa que la diferencia entre una y otra función puede ser apreciable, por lo que debe seleccionarse la de mejor ajuste. En este trabajo se han empleado los siguientes métodos para ese fin:

- Análisis gráfico

Consiste en dibujar las funciones junto con los puntos medidos. La que más se apegue visualmente a los datos medidos será la de mejor ajuste.

Con este criterio se seleccionaron las funciones de Valores Extremos Generalizados, GEV (6), ajustando los parámetros por el método de los momentos ponderados, y la expresión de Frechet (4), con ajuste por el método de los momentos (Figuras 5 y 6).

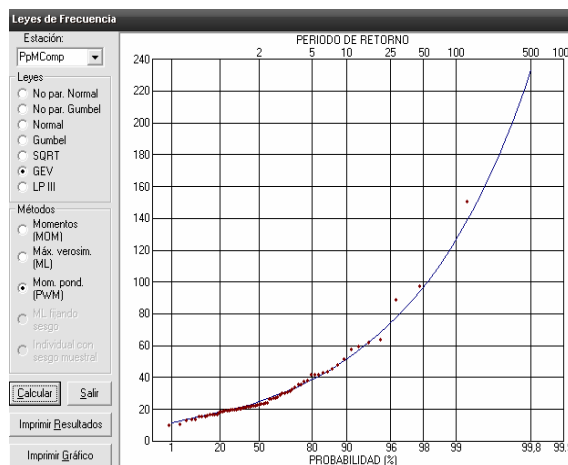


Figura 5. Ajuste Precipitación Máxima Diaria. GEV.

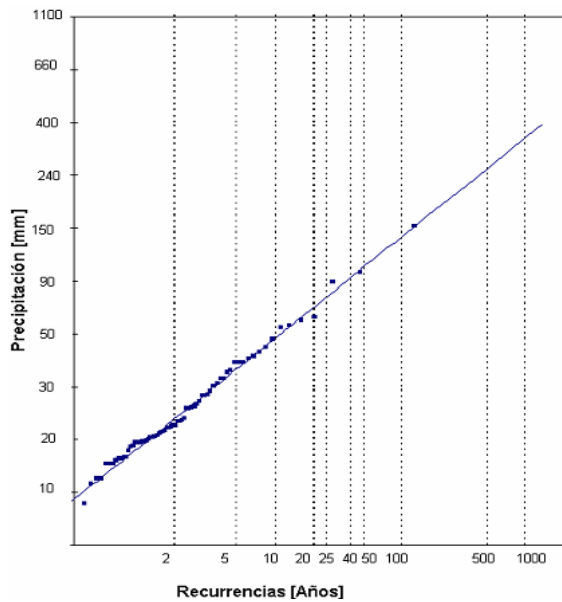


Figura 6. Ajuste Precipitación Máxima Diaria. Frechet.

-Error cuadrático mínimo

Consiste en calcular el error cuadrático (C) de cada distribución, mediante la expresión (15). Según este criterio, la de mejor ajuste será la que tenga el error cuadrático más pequeño. En este trabajo se empleó el error relativo, que surge del cociente entre dicha diferencia y el valor medido. Los resultados son los que se exponen en la Tabla 9.

-Prueba Chi – cuadrado

Para aplicar la prueba deben dividirse los datos en un número k de intervalos de clase, para luego calcular el parámetro estadístico D, según la expresión (16).

Así, seleccionando un nivel de significancia igual a 0.05, se tiene, para funciones de dos parámetros (Normal, Gumbel, SQRT y Frechet):

$$\chi^2_{0,95,3} = 7.81 \tag{19}$$

Y para funciones de tres parámetros (GEV y Log Pearson III):

$$\chi^2_{1-\alpha,v} = 5.99 \tag{20}$$

Los resultados son los que se exponen en la Tabla 9, donde se observa que satisfacen este test las funciones de Valores Extremos Generalizados y la función de Frechet.

-Prueba de Kolmogorov–Smirnov

Esta prueba consiste en comparar el máximo valor absoluto de la diferencia D entre la función de distribución de probabilidad observada $F_o(x_n)$ y la estimada $F(x_n)$, con un valor crítico d que depende del número de datos (n) y el nivel de significancia seleccionado (α), según la expresión (17).

Para $n = 72$ y $\alpha = 0.05$, el valor de d correspondiente es:

$$d = \frac{1.36}{\sqrt{n}} = 0.16 \tag{21}$$

Los resultados son los que se exponen en la Tabla 9, donde se observa que las Leyes de frecuencia Normal y Gumbel con determinación de parámetros por momentos y máxima verosimilitud, no satisfacen el test de bondad, por lo que quedan descartadas.

Tabla 9. Análisis de bondad de los ajustes.

Func. de Distrib.	Determ. Parámet.	Error Cuadrático Relativo	Chi Cuadrado	Kolmogoroff
Normal			36.7	0.187
Gumbel	MOM	167.2	14.8	0.176
	ML	252.0	15.0	0.154
	PWM	179.7	11.0	0.152
SQRT		174.3		0.112
	GEV			
	MOM	62.2	5.4	0.132
	ML	18.2	3.7	0.073
	PWM	13.6	3.7	0.062
LPIII		0.1	4.0	0.070
Frechet	MOM	19.4	3.4	0.063

Luego de observar los resultados de los diferentes test de bondad, se concluye que los mejores ajustes para los valores de precipitación máxima diaria se obtienen al aplicar el método de Valores Extremos Generalizados (GEV), determinando los parámetros por el método de los momentos ponderados y la expresión de Frechet calculando los parámetros mediante el método de los momentos.

Se decide el empleo del ajuste por Frechet por ser ésta una expresión que requiere sólo dos parámetros de ajuste (Localización y escala) y Valores Extremos Generalizados requiere tres (Localización, escala y forma).

Además, con los resultados obtenidos mediante Frechet, para su empleo como valores de diseño, los cálculos resultan del lado de la seguridad.

Análisis de Precipitación-Duración-Recurrencia e Intensidad-Duración-Recurrencia

Para duraciones inferiores a 24 horas la serie en estudio es la compuesta por la información de la Estación de INTA basado en datos de 14 años de fajas pluviográficas, a la que se adicionan los 12 años correspondientes a la EFísica, lo que incrementa sensiblemente la longitud de la serie. Para tener en cuenta ambas estaciones e incrementar así la longitud de las series, se hicieron correlaciones a nivel mensual y diario, para el período de 10 años comunes (1999-2008), obteniendo resultados satisfactorios.

La información pluviográfica correspondiente a la estación de INTA utilizada, fue la elaborada en el "Estudio de Precipitaciones en el VIRCH" (Villegas et al., 1994). En éste se analizaron las fajas pluviográficas de la Estación de INTA - Trelew para el período 1975/88, discretizando las tormentas resultando un valor máximo anual para cada intervalo de duración; estos datos fueron los que se emplearon y reelaboraron en el presente trabajo.

Para los años correspondientes a la EFísica, se procedió de igual forma, pero en este caso elaborando y procesando la información de la estación automática de modo de conseguir los valores máximos para diferentes intervalos de duración.

A pesar de obtener una serie suficientemente extensa para este tipo de estudio (26 años), se observa que la serie de valores máximos diarios del SMN, cuenta con 72 años de información. Es lógico, por tanto, que en esta importante serie, se presenten valores extremos más significativos que en la de INTA – Efísica. En este caso también se procedió a efectuar un análisis de correlación entre la estación combinada INTA – Efísica y la del SMN, para el período común. Los valores correlacionados corresponden a

registros de INTA y SMN, en el período 1970/2008 y EFísica-SMN en el período 1999/2010.

Al analizar la precipitación máxima en 24 horas, efectuando un estudio independiente de los registros de los pluviómetros del SMN e INTA (con diferente información tanto en número de datos como del dato propiamente dicho) resultan diferentes los valores del ajuste de precipitación diaria para una misma recurrencia.

Para salvar esta aparente incongruencia se procedió a hallar una relación directa entre los resultados de los ajustes de precipitación diaria para cada recurrencia de ambas estaciones, empleándolo como factor de corrección para todas las duraciones.

De este modo se pueden aprovechar las distribuciones de duraciones diferentes a la diaria, que ofrecen una confiabilidad inferior, no sólo por los resultados de los tests de ajuste, sino también por tratarse de series de sólo 26 años de duración.

No se exponen los resultados obtenidos para los diferentes ajustes con la intención de no sobreabundar la información. Si se decidió incorporar los resultados de los test de bondad, que es un volumen de información mucho más pequeño y justifican la selección de las funciones escogidas.

Resultados de los test de Bondad de Ajuste

Se aplicaron los diferentes test de ajustes expuestos para cada una de las duraciones seleccionadas (10, 20, 30, 60, 120, 180, 360, 720 y 1440 minutos). Los resultados de los métodos aritméticos se exponen en la Tabla 10 (Error Medio Relativo), Tabla 11 (Chi cuadrado) y Tabla 12 (Kolmogorov). Aunque no se exponen los ajustes gráficos, los resultados de éstos también conducen a seleccionar las mismas funciones de ajuste que surgen del empleo de las pruebas mencionadas.

Tabla 10. Análisis de bondad de los ajustes. Error Medio Relativo.

Duración	Normal	Gumbel			SQRT	GEV			Frechet
		MOM	ML	PWM		MOM	ML	PWM	
10	0.4	0.1	0.1	0.1	0.8	0.1	0.1	0.0	11.8
20	0.5	0.5	0.5	0.4	2.3	0.5	0.4	0.4	16.0
30	0.4	0.4	0.4	0.7	2.8	0.3	0.3	0.6	10.9
60	0.9	0.2	0.2	0.1	0.8	0.2	0.2	0.1	9.9
120	9.1	4.3	7.8	5.0	2.5	3.5	3.8	1.9	1.2
180	15.5	8.1	16.9	11.4	7.2	6.7	9.2	4.5	0.6
360	36.8	21.2	42.4	31.0	18.4	17.6	26.1	13.4	3.3
720	43.8	23.1	50.9	33.9	19.3	18.8	26.3	10.1	3.0
1080	44.7	22.0	55.0	33.6	21.4	17.7	22.9	7.3	2.5
1440	9.8	6.8	5.1	5.9	3.8	4.7	3.3	3.2	2.2

Tabla 11. Análisis de bondad de los ajustes. Chi cuadrado.

Duración	Normal	Gumbel			SQRT	GEV			Frechet
		MOM	ML	PWM		MOM	ML	PWM	MOM
10	-26.27	1.07	0.95	0.92	0.52	1.41	1.35	1.11	1.59
20	-26.51	9.19	8.52	7.72	8.61	7.58	8.33	7.99	13.22
30	4.18	3.55	2.89	2.37	3.12	2.71	2.93	2.35	17.05
60	4.49	2.46	2.33	1.92	3.33	2.22	2.37	1.93	17.55
120	21.41	4.89	7.76	5.20	4.52	4.33	4.92	4.71	8.20
180	154.13	13.05	32.84	17.24	8.71	8.31	9.86	6.56	3.87
360	67.47	12.80	24.20	15.25	7.72	8.00	9.37	5.75	3.91
720	58.75	11.37	24.78	14.43	8.30	8.54	9.74	7.08	4.20
1080	125.45	17.89	45.58	22.80	12.52	12.92	12.71	10.26	5.14
1440	91.68	13.33	34.92	17.26	9.20	9.60	9.80	8.92	4.04

Tabla 12. Análisis de bondad de los ajustes. Kolmogorov.

Duración	Normal	Gumbel	Gumbel	Gumbel	SQRT	GEV	GEV	GEV	Frechet
		MOM	ML	PWM		MOM	ML	PWM	MOM
10	0.125	0.087	0.095	0.100	0.143	0.082	0.083	0.095	0.230
20	0.191	0.121	0.121	0.121	0.114	0.141	0.126	0.115	0.180
30	0.129	0.098	0.105	0.111	0.141	0.095	0.097	0.110	0.188
60	0.113	0.070	0.071	0.057	0.082	0.077	0.072	0.061	0.112
120	0.152	0.087	0.087	0.089	0.068	0.067	0.062	0.079	0.102
180	0.218	0.148	0.132	0.148	0.112	0.122	0.110	0.110	0.124
360	0.239	0.168	0.158	0.165	0.130	0.140	0.131	0.162	0.181
720	0.285	0.220	0.220	0.230	0.191	0.193	0.190	0.144	0.175
1080	0.305	0.243	0.247	0.255	0.213	0.221	0.210	0.155	0.166
1440	0.294	0.230	0.231	0.241	0.198	0.207	0.195	0.140	0.149

Como solución de la aplicación de los test de bondad expuestos, y del análisis gráfico, que aunque no se agreguen los resultados, conducen a la misma conclusión, se observa que para duraciones menores (hasta 2 hs), los mejores ajustes se logran a través de la expresión de Valores Extremos Generalizada, con determinación de parámetros mediante el método de los Momentos Ponderados (PWM) mientras que para duraciones mayores el ajuste mediante la expresión de Frechet es el que satisface más adecuadamente los test de bondad.

Como ya se señaló al comienzo de este ítem, para aprovechar la longitud de la serie del SMN (72 años,

con una precipitación máxima diaria de 155 mm diarios) respecto a la de INTA – Efísica (26 años, con un máximo de 83 mm), se halló para cada recurrencia la relación entre la precipitación diaria de ambas estaciones y se le aplicó a los valores de precipitación de cada una de las duraciones correspondientes a dichas recurrencias.

Los resultados de las precipitaciones, para cada duración y recurrencia, expresadas en milímetros, son los que se muestran en la Tabla 13 y con éstos se hallan las intensidades correspondientes, expuestas en la Tabla 14 y Figura 7.

Tabla 13. Precipitación Máxima (mm) para diferentes duraciones y Recurrencias.

Recurrencia (años)	Duración (min)								
	10	20	30	60	120	360	720	1080	1440
2	6	8	11	13	15	21	24	24	25
5	9	13	15	20	22	31	37	38	39
10	11	16	18	22	27	41	49	52	53
25	13	19	21	27	34	57	70	76	78
50	15	21	23	30	41	74	92	101	104
100	16	23	25	33	46	94	120	134	138
200	17	26	28	37	53	121	157	178	183
500	19	28	30	40	64	168	223	258	265
1000	19	30	32	43	73	214	291	341	352

Tabla 14. Intensidad Máxima (mm/h), para diferentes duraciones y recurrencias.

Recurrencia (años)	Duración (minutos)									
	10	20	30	60	120	360	720	1080	1440	
2	36	25	21	13	8	4	2	1	1	
5	55	38	30	20	11	5	3	2	2	
10	67	47	36	22	13	7	4	3	2	
25	79	56	41	27	17	10	6	4	3	
50	90	64	47	30	20	12	8	6	4	
100	94	69	50	33	23	16	10	7	6	
200	104	77	55	37	27	20	13	10	8	
500	113	84	60	40	32	28	19	14	11	
1000	117	91	64	43	37	36	24	19	15	

Curvas Intensidad-duración para recurrencia constante

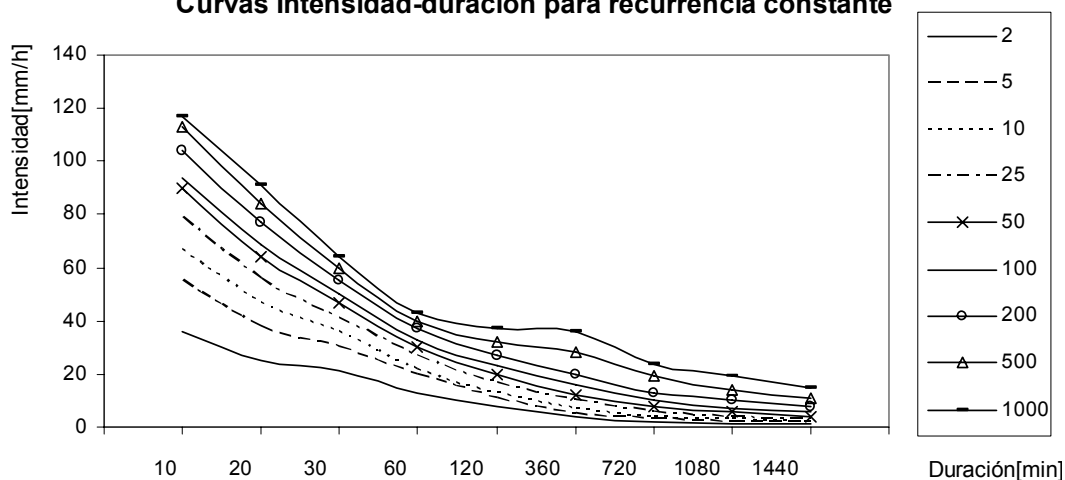


Figura 7. Intensidad (mm/h) para diferentes duraciones y recurrencias.

Funciones i-d-T

Se procura analizar las relaciones intensidad-duración-recurrencia de las lluvias observadas, buscando relacionar simultáneamente las tres variables en una familia de curvas cuya ecuación es:

$$i = \frac{k \cdot T^m}{d^n} \tag{22}$$

Donde *i* es la intensidad en mm/h; *T* es la recurrencia en años y *d* la duración en minutos (Monsalve Sáenz, 1999).

Los parámetros *k*, *m* y *n* son constantes calculadas mediante un análisis de correlación lineal múltiple.

El mejor ajuste se ha obtenido para períodos de retorno iguales o menores a 100 años, considerando que estas ecuaciones son suficientemente

adecuadas para los problemas de diseño más usuales. Para períodos mayores, se pierde precisión entre los datos y los valores calculados con las diversas ecuaciones posibles, o bien hay que crear tantos subgrupos que la ecuación única pierde utilidad.

La ecuación resultante es:

$$i = \frac{135.61 * T^{0.3204}}{d^{0.649}} \tag{23}$$

Esta ecuación representa la relación intensidad-duración-frecuencia de la estación en estudio para períodos de retorno inferiores a 100 años.

En la Figura 8 se correlacionaron los datos de intensidad en función de la duración para las distintas recurrencias (Tabla 14) con los obtenidos mediante la ecuación (23), resultando un coeficiente de determinación de 0.98.

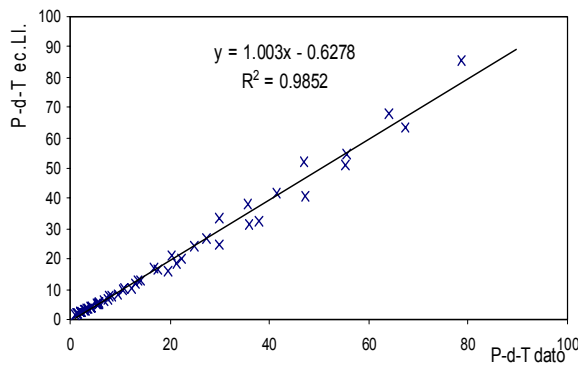


Figura 8. Correlación Ecuación de Lluvia.

El error relativo porcentual medio, es del orden del 7%, aunque si se eliminan los valores obtenidos para un período de retorno de 2 años, éste disminuye a un valor de 5%.

Debe tenerse en cuenta la metodología empleada y las simplificaciones realizadas por lo que el uso de estos resultados, debe hacerse en el marco estricto de las hipótesis del método probabilístico, con sus limitaciones y restricciones.

Días de lluvia

Se cuenta con esa información solamente en la estación del SMN y su relación mensual es la que se indica en la Tabla 15.

Tabla 15. Número de días de lluvia.

E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
5	5	6	6	8	8	7	7	7	7	6	6

Eventos Extraordinarios

En relación a eventos extraordinarios de precipitación, se han registrado marcas eventuales de precipitación diaria superiores a los 150 mm/día (151.4 mm abril de 1998) y la información diaria de tormentas importantes asciende a valores como 97.9 mm en marzo del año 1943, 89.3 mm en febrero de 1976, 64 mm en mayo de 1992, 62 mm en octubre de 1995; 58.2 mm en octubre de 1985 y 52 mm en diciembre de 1949. Estos 7 registros de precipitación diaria, seleccionados con el criterio de superar los 50 mm, corresponden a un registro de 72 años y son valores extraordinarios que ocasionan inconvenientes severos.

CONCLUSIONES

Las nuevas relaciones funcionales halladas a través de los estudios estadísticos de tormentas, que determinan el ábaco de Precipitación-Duración-Recurrencia (Curvas PDR) o de Intensidad-Duración-Recurrencia (curvas IDR) y las ecuaciones correspondientes, constituyen la base de cálculo para la determinación de la tormenta de diseño en un sinnúmero de problemas de la ingeniería hidráulica y ciencias afines, a cuyas estimaciones proveyeron distintos estudios e investigadores.

Las nuevas relaciones funcionales ajustadas son las que se recomiendan utilizar en la determinación del evento o los eventos de lluvia que servirán de base en el estudio técnico y de diseño de obras.

REFERENCIAS

Aparicio Mijares, F. 1999. Precipitación, y Probabilidad y estadística en hidrología. Capítulos VI y IX. En: *Fundamentos de hidrología de superficie*. Editorial Limusa. México DF.

Chachero, M. J. 1998. Actualización de las ecuaciones de tormenta en el Valle Inferior del Río Chubut. Secretaría de Ciencia y Técnica. UNPSJB.

Ferrer Polo, F. 1993. Análisis y Tratamiento de los datos pluviométricos. Capítulo II. En: *Recomendaciones para el cálculo hidrometeorológico de avenidas*. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. Gabinete de Formación y Documentación. Madrid, España.

Ferrer Polo, F. y Ardiles, L. 1994. Análisis estadístico de las series anuales de máximas lluvias diarias en España. *Ingeniería Civil/95*.

Monsalve Sáenz, G. 1999. Precipitación y Análisis de frecuencias hidrológicas. Capítulos II y III. En: *Hidrología en la Ingeniería*. Alfaomega. Santafé de Bogotá, Colombia.

Orsolini, H.; Zimmermann, E. y Basile, P. 2000. Estadística Hidrológica: Lluvias de diseño. Capítulo IX. En: *Hidrología: Procesos y Métodos*. UNR Editora, Rosário.

Sáez Castillo, A. 2009. Modelización estocástica de precipitaciones máximas para el cálculo de eventos extremos a partir de los períodos de retorno mediante R. Informe Técnico. Departamento de Estadística e Investigación Operativa, Universidad de Jaén.

Vicenty, O. 1984. *Estudio de Precipitaciones de la ciudad de Trelew*. Biblioteca de la Dirección General de Estudios y Proyectos de la provincia del Chubut.

Villegas, J.; Serra, J.; Ferraría, S. y Bulacio, M. 1994. Estudio de Precipitaciones en el Valle Inferior del Río Chubut. Congreso Nacional del Agua, La Plata, 1994.

Zorraquino Junquera, C. 2004. El modelo SQRT-ETMAX. *Revista de Obras Públicas* N° 3447. España.

Artículo recibido el 06/2011 y aprobado para su publicación el 08/2012.