

**PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DE PRECIPITACIONES EXTREMAS
CON EL ÍNDICE PROBN EN DIFERENTES PERÍODOS NORMALES EN LAS PROVINCIAS
DEL NOROESTE ARGENTINO**

**Liliana N. Núñez, Ma. Eugenia Bontempi, É. Carolina González Morinigo, Natalia S.
Bonel**

Departamento de Agrometeorología, Servicio Meteorológico Nacional, Argentina 25 de mayo 658,
Ciudad Autónoma de Buenos Aires. Tel: (011) 5167-6767 interno 18270 Mail de contacto:
agro@smn.gov.ar

RESUMEN

La actividad económica de la región del noroeste argentino se basa en la agricultura, en las agroindustrias asociadas y en la minería. De ellas, las dos primeras dependen fuertemente del clima y principalmente de la precipitación, ya que su variabilidad es una de las principales causas de incertidumbre y riesgo para la producción agropecuaria. Las precipitaciones extremas, aquellas que ocurren fuera de las condiciones promedio y de la típica variabilidad de sus promedios, pueden afectar severamente a la economía. El objetivo de este trabajo es contribuir al conocimiento de los recursos hídricos en esta región, en particular de las precipitaciones extremas. Para ello se calculó la probabilidad de ocurrencia (Prob10ds) de las precipitaciones extremas de las series de precipitación acumulada en 10 días. Esto se hizo para algunas estaciones de la región, en el período normal estándar 1961-1990 y en el último período normal 1981-2010. Con ello se pudieron identificar los períodos de 10 días en que se registraron precipitaciones superiores a un umbral establecido, su probabilidad de ocurrencia y los cambios observados entre ambos períodos a lo largo del año.

INTRODUCCION

El noroeste argentino comprende las provincias de Jujuy, Salta, Catamarca, Tucumán, Santiago de Estero y La Rioja. La principal actividad económica que se desarrolla en la región es la agricultura, con el cultivo de caña de azúcar, cítricos, bananos y tabaco en la zona tropical, vid en los valles del oeste, aceitunas y nueces en Catamarca y La Rioja principalmente. También es importante la producción a nivel industrial y artesanal de productos derivados (aceites, vinos, azúcar, alcohol, papel, etc.). Existen además explotaciones mineras en gran escala y secundariamente, se desarrolla una ganadería de subsistencia con la cría de ovejas, alpacas y llamas. Con excepción de la minería, la productividad de las actividades mencionadas está fuertemente ligada a las condiciones meteorológicas, particularmente a la precipitación, determinante de la disponibilidad o excesos de agua. Las precipitaciones extremas, aquellas que ocurren fuera de las condiciones promedio y de su típica variabilidad, pueden afectar severamente a la economía.

Esta región presenta un régimen de lluvias caracterizado por los escasos o nulos montos en invierno y las precipitaciones abundantes en los meses cálidos. Los mayores montos acumulados de precipitación se producen en las laderas orientales de la cordillera, disminuyendo en las zonas ubicadas en las planicies hacia el este y en las localidades de altura que se encuentran en la región occidental.

Este trabajo se propone contribuir al conocimiento de los recursos hídricos en esta región, en particular mediante el estudio del comportamiento y variabilidad de las precipitaciones extremas.

METODOLOGÍA Y RESULTADOS

Se trabajó con series de datos de precipitación diaria, observada en estaciones meteorológicas pertenecientes al Servicio Meteorológico Nacional que se encuentran situadas dentro del área de estudio (Fig. 1). A partir de estas series se calcularon y graficaron las series de los montos acumulados de 10 días móviles (Mov10d): para cada día del período 1961-2010 se acumuló la precipitación del día más la de los 9 días previos (Fig. 2a a 7a).

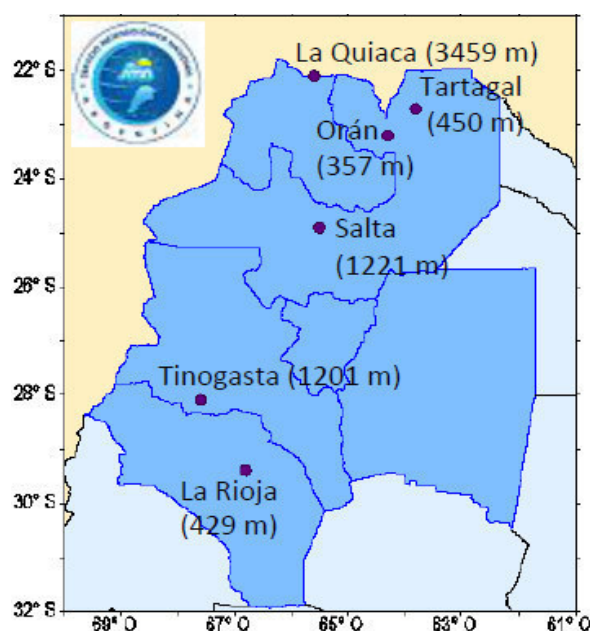


Figura 1.- Ubicación y altura sobre el nivel del mar de las estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio

Se calculó para cada estación meteorológica el valor del decil 9, valor que iguala o supera al 90% de los datos, correspondiente al periodo 1961-2010 (Tabla 1). Se aprecia, a partir de estos valores, que las estaciones más occidentales (Tinogasta, La Quiaca) tienen como extremos valores considerablemente inferiores a los de las estaciones más orientales (Tartagal, Orán).

Tabla 1.- Valor del decil 9 de Mov10d correspondiente al periodo 1961-2010 para cada estación meteorológica

Estación meteorológica	La Quiaca	Tartagal	Orán	Salta	Tinogasta	La Rioja
Decil 9 1961-2010	30.8 mm	83.7 mm	80.9 mm	62.2 mm	13.5 mm	33.9 mm

Para cada estación, se utilizó este valor como umbral para el cálculo del Prob10ds (Núñez, 2009, 2010, 2011, 2012; SMN, 2013). El Prob10ds representa la probabilidad de ocurrencia de precipitaciones acumuladas en 10 días mayores o iguales a un valor umbral, o la frecuencia relativa con que se registró dicho monto.

Este índice se calculó, para cada día del año, para el período normal estándar 1961-1990 y, para su comparación, también para el último período normal 1981-2010 (Fig. 2b a 7b).

En La Quiaca, los mayores máximos anuales registrados (superiores a 100 mm, Fig. 2a) se produjeron con posterioridad al año 1987; sólo un evento en el periodo 1961-1990 y seis entre 1981 y 2010.

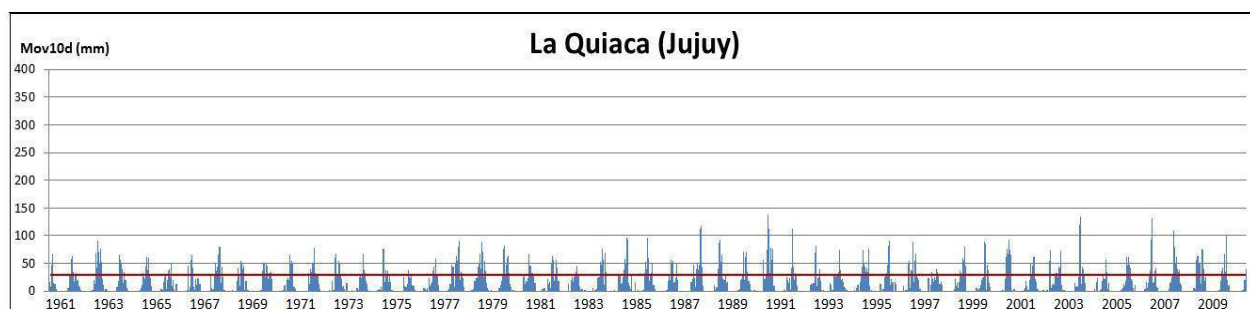


Figura 2a.- La Quiaca (provincia de Jujuy): serie de Mov10d 1961-2010 (l) con el valor del decil noveno (-)

En la Figura 2b, comparando los dos períodos considerados, se observa un incremento del Prob10ds, o de la frecuencia de Mov10d extremos, en los meses cálidos, con excepción del mes de febrero que presenta, en el último período estudiado, un mínimo en el índice. Asimismo, se retrasó el inicio del periodo con Prob10ds superiores al 10% desde los últimos días de noviembre para 1961-1990 hacia mediados de diciembre para 1981-2010.

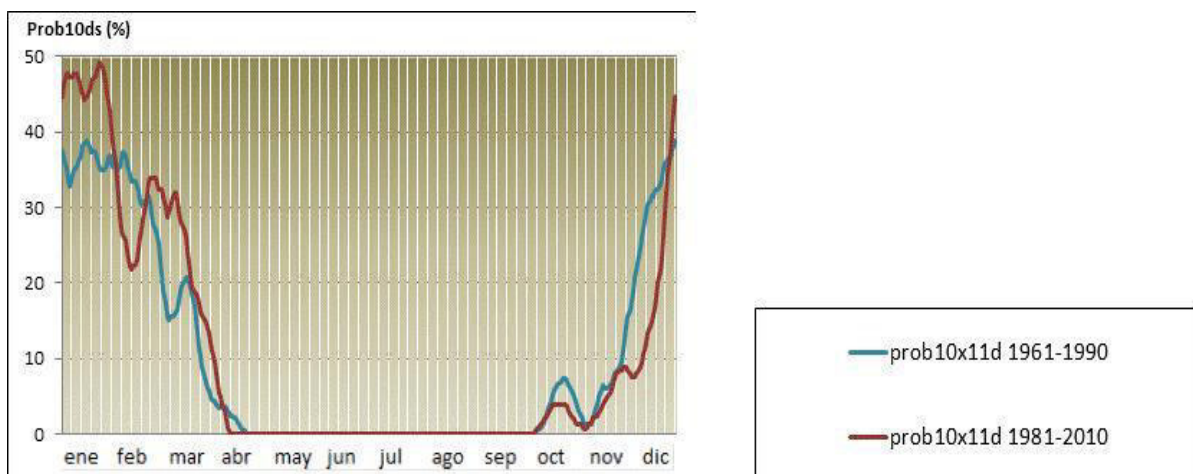


Figura 2b.- La Quiaca (provincia de Jujuy): marcha anual del índice Prob10ds de 30.8 mm (valor del decil 9) para los períodos normales 1961-1990 y 1981-2010

En la estación Tartagal no se aprecia una variación importante en los montos máximos a lo largo del período 1961-2010 (Fig. 3a)

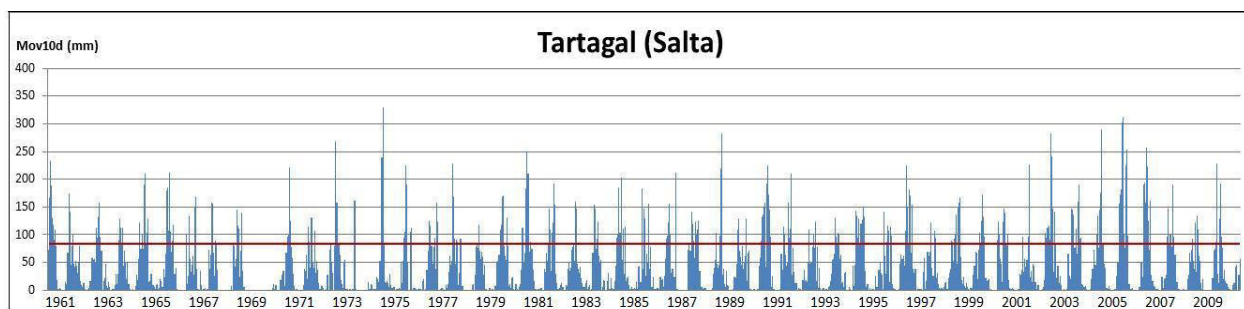


Figura 3a.- Tartagal (provincia de Salta): serie de Mov10d 1961-2010 (I) con el valor del decil noveno (-)

Nuevamente comparando ambos períodos, a partir del Prob10ds (Fig. 3b) se observa en diciembre un adelantamiento del comienzo de ocurrencia de los mayores montos. En enero, se registra una reducción en su ocurrencia, y en febrero y marzo un importante incremento del índice, con valores del Prob10ds tan importantes como los de enero en el último mes.

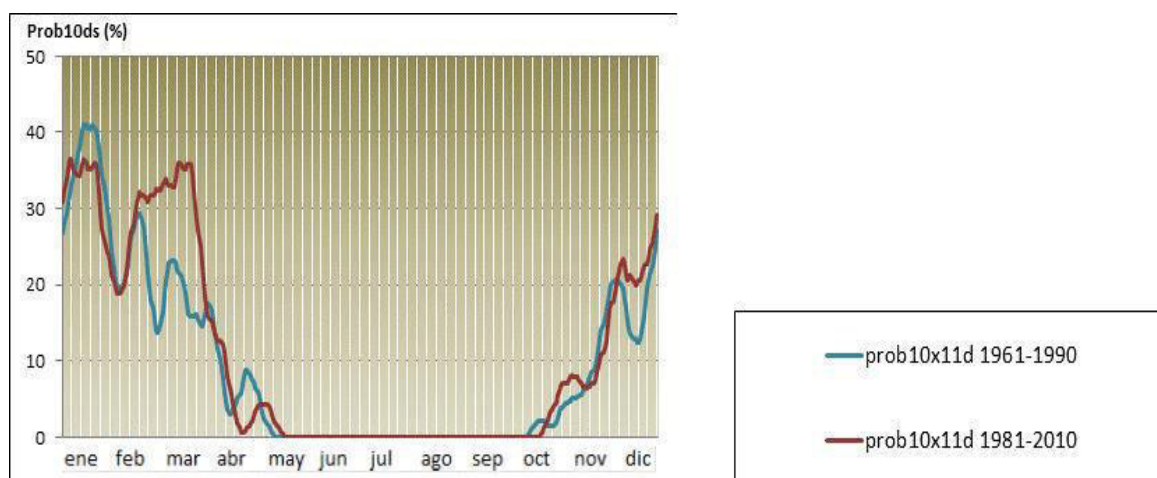


Figura 3b.- Tartagal (provincia de Salta): marcha anual del índice Prob10ds de 83.7 mm (valor del decil 9) para los períodos normales 1961-1990 y 1981-2010

Por su ubicación geográfica, Orán es, seguida por Tartagal, la estación que presenta los mayores valores de Mov10d entre las estudiadas (Fig. 4a). Los montos más extremos ocurrieron en los veranos de 1982-1983 y 1986-1987.

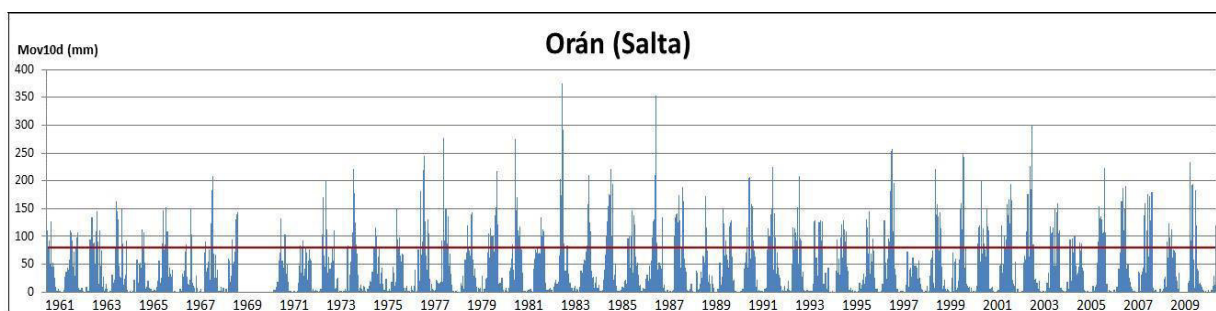


Figura 4a.- Orán (provincia de Salta): serie de Mov10d 1961-2010 (l) con el valor del decil noveno (-)

En esta estación se observa, al comparar los periodos 1961-1990 y 1981-2010 (Fig. 4b), un aumento en el Prob10ds en casi todo el período húmedo, siendo de alrededor del 10% en el cuatrimestre cálido.

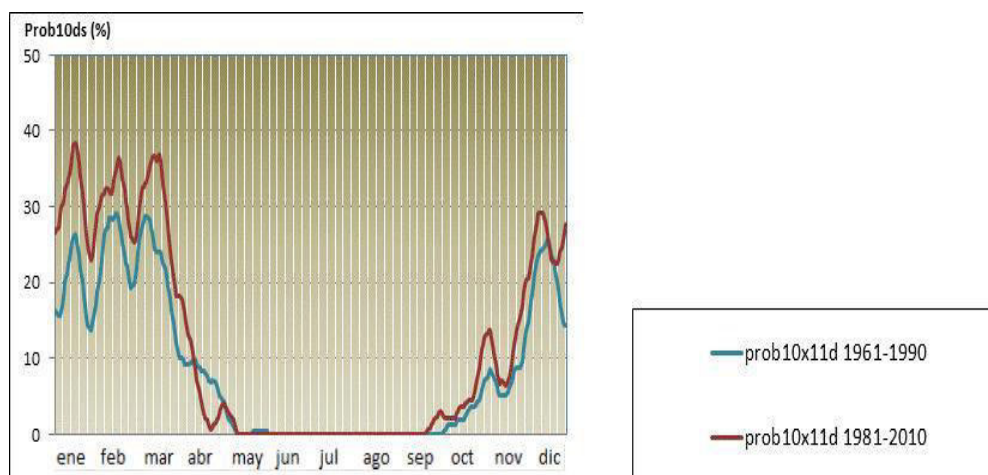


Figura 4b.- Orán (provincia de Salta): marcha anual del índice Prob10ds de 80.9 mm (valor del decil 9) para los periodos normales 1961-1990 y 1981-2010

En Salta, si bien los montos decádicos acumulados máximos no presentaron variaciones destacables a lo largo de los años 1961-2010 (Fig. 5a), sí se registró (Fig. 5b) un incremento importante en el Prob10ds desde fin de diciembre hasta los primeros días de febrero y un descenso posterior hasta principios de marzo.

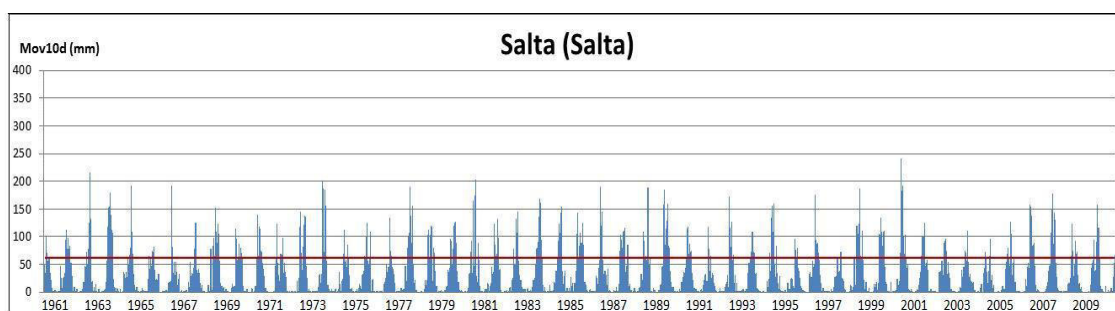


Figura 5a.- Salta (provincia de Salta): serie de Mov10d 1961-2010 (l) con el valor del decil noveno (-)

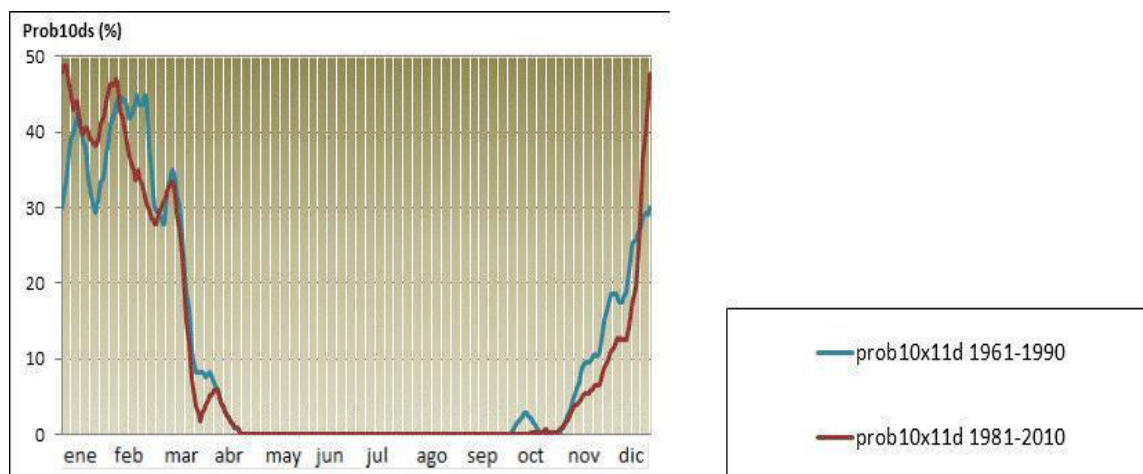


Figura 5b.- Salta (provincia de Salta): marcha anual del índice Prob10ds de 62.2 mm (valor del decil 9) para los períodos normales 1961-1990 y 1981-2010

Tinogasta (Fig. 6a) registró los acumulados decádicos más extremos entre 1988 y 1991, y se destacan los períodos 1964-1970 y 2001-2010, en los cuales el valor de Mov10d nunca superó los 50 mm, y 2001-2007, donde sólo se superó el decil 9 (13.5 mm) en 6 oportunidades.

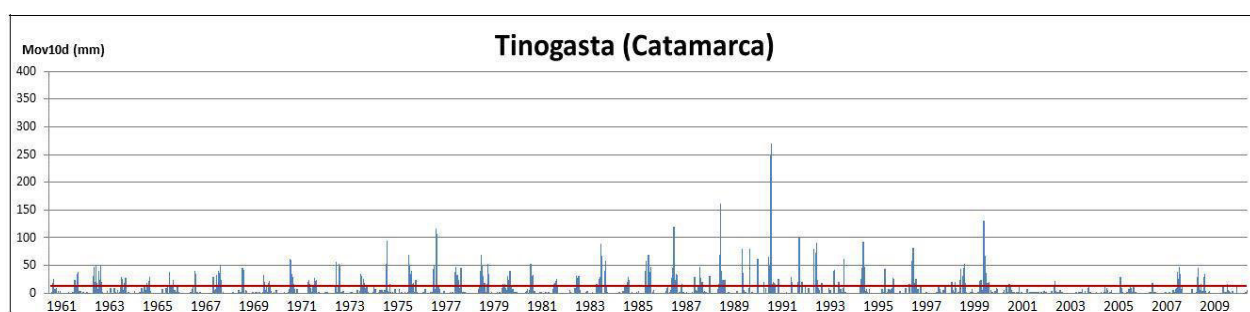


Figura 6a.- Tinogasta (provincia de Catamarca): serie de Mov10d 1961-2010 (l) con el valor del decil noveno (-)

Se produjo una disminución marcada del Prob10ds (Fig. 6b) en febrero-abril en 1981-2010 respecto de 1961-1990. Asimismo, en 1981-2010 se registraron algunos eventos con montos de lluvia acumulada superiores a 13.5 mm durante agosto y septiembre, mientras que en 1961-1990 nunca se habían observado estos valores. Cabe destacar el máximo que se registra en julio y que es común a ambos períodos.

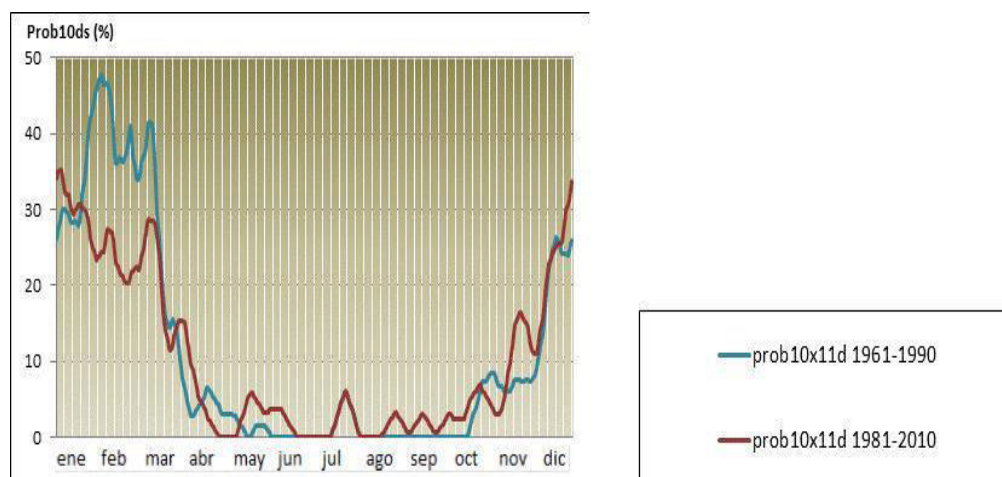


Figura 6b.- Tinogasta (provincia de Catamarca): marcha anual del índice Prob10ds de 13.5 mm (valor del decil 9) para los períodos normales 1961-1990 y 1981-2010

En la estación de La Rioja (Fig. 7a) se observan los montos máximos más pequeños de la serie entre los años 1968 y 1973.

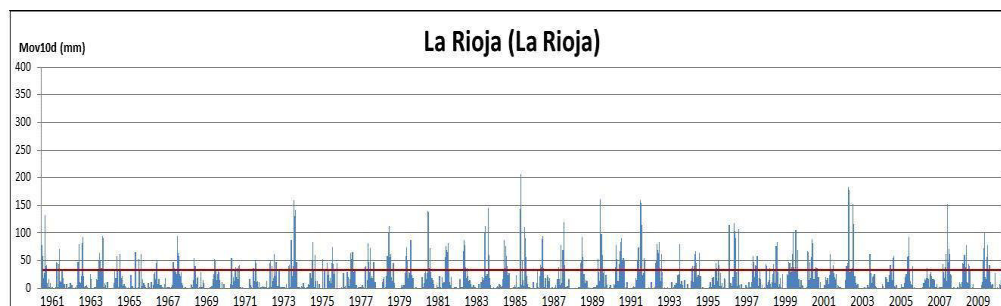


Figura 7a.- La Rioja (provincia de La Rioja): serie de Mov10d 1961-2010 (l) con el valor del decil noveno (-)

Con respecto a la Fig. 7b, a mediados de enero, donde para el período 1961-90 se observa un mínimo relativo en el Prob10ds, puede verse en el último período normal el máximo absoluto, lo que se invierte en los últimos días del mismo mes y principios de febrero.

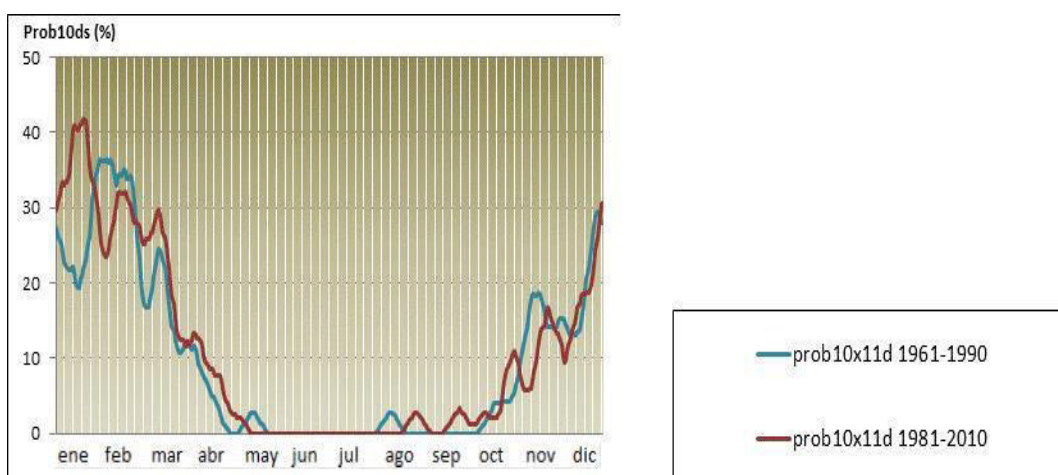


Figura 7b.- La Rioja (provincia de La Rioja): marcha anual del índice Prob10ds de 33.9 mm (valor del decil 9) para los períodos normales 1961-1990 y 1981-2010

CONCLUSIONES

Resumiendo los resultados obtenidos, se puede deducir que, en general, se produjo un aumento en el Prob10ds para diciembre-enero en 1981-2010 respecto de 1961-1990 en casi toda la región.

Se destaca lo encontrado en La Quiaca, donde se ve en la serie de Mov10d un incremento importante de los valores de los máximos a partir de mediados de la década 1981-1990.

En Tartagal, comparando ambos períodos, se observa en febrero y marzo un importante incremento de Prob10ds.

Orán, que es la estación que presenta los mayores valores de Mov10d entre las estudiadas, registró los montos más extremos en los veranos de 1982-1983 y 1986-1987.

En Salta los montos decádicos acumulados máximos no presentaron variaciones destacables a lo largo de los años 1961-2010.

En la estación de Tinogasta se observó un período (1988-1991) con máximos de Mov10d muy extremos, mientras que hubo un periodo anterior (1964-1970) y uno posterior (2001-2010) en que se registraron los menores máximos de la serie.

En La Rioja se puede ver que en la primera mitad del período 1961-1990 se registraron valores de Mov10d máximos algo inferiores al resto de la serie.

REFERENCIAS

Núñez, L. (2009). Overview of Drought Indices al Argentine National Meteorological Service. Inter.-Regional Workshop on Indices and Early Warning Systems for Drought. Lincoln, Nebraska. 8 al 11 de diciembre de 2009.

http://www.wmo.int/pages/prog/wcp/agm/meetings/wies09/wies09_present.html,

<http://www.wamis.org/agm/meetings/wies09/S38-Nunez.pdf>

Núñez, L. (2010). CAgM-XV (XV Sesión de la Comisión de Meteorología Agrícola de la OMM). Belo Horizonte, Brasil, 15-21 de Julio de 2010.

http://www.wmo.int/pages/prog/wcp/agm/cagm/cagm_15thsession.html,

http://www.wamis.org/agm/meetings/cagm15/OF_Nunez_Argentina.pdf

Núñez, L. (2011). MovN, MovN*N y ProbN : métodos para el análisis, la evaluación y la calificación de la precipitación y otras variables . - 1a ed. - Buenos Aires: Servicio Meteorológico Nacional, 2011.116 p. ISBN 978-987-22663-2-5. Sin publicar.

Núñez, L. (2012). Monitoring drought in Argentina. WCRP Global Drought Information System Workshop in Frascati, Italy, 11 al 13 de abril 2012.

<http://www.clivar.org/sites/default/files/Nunez.pdf>

SMN, (2013). Servicios Climáticos. Información Agrometeorológica. Referencias

<http://www.smn.gov.ar/serviciosclimaticos/?mod=agro&id=14#prob10d>

EVALUACIÓN DE LA PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA DE UN EVENTO PLUVIOMÉTRICO EXTRAORDINARIO EN LA CUENCA ARROYO “LOS CHORRILLOS”, PROVINCIA DE CÓRDOBA

Carlos Marcelo García^{1, 3}, Clarita María Dasso^{2, 3}, Carlos Catalini^{2, 4}, Javier Alvarez¹, Gustavo M. Barchiesi¹, José M. Díaz Lozada¹, Flavia Bazzano^{5, 3}, Javier Gómez¹, Nicolás F. Guillén^{1, 3} y Ana I. Heredia Ligorria¹

¹CETA. Centro de Estudios y Tecnología del Agua- Universidad Nacional de Córdoba-Laboratorio de Hidráulica, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales., Universidad Nacional de Córdoba, Av. Filloy s/n, Ciudad Universitaria, Córdoba, Argentina.

² Instituto Nacional del Agua-Centro de la Región Semiárida. Vélez Sarsfield y Ambrosio Olmos. (5000) Córdoba
³ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina

⁴ Universidad Católica de Córdoba - Grupo de Investigación de Estudios Hidrológicos en Cuencas Pobrememente Aforadas (UCC -EHCPA) Camino a Alta Gracia km 7 ½, (X5016DHY), Córdoba República Argentina.

⁵ Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología. Laboratorio de Construcciones Hidráulicas. Universidad Nacional de Tucumán. Av. Independencia 1800, Tucumán, Argentina.
Mail de contacto: cgarcia2mjc@gmail.com

RESUMEN

En la madrugada del 14 de Marzo del 2014 se desarrolló un evento hidro-meteorológico extraordinario que tuvo como consecuencia la creciente repentina del Arroyo “Los Chorrillos”, en el Valle de Punilla, Córdoba, afectando viviendas aledañas e infraestructura indispensable para el desarrollo habitual de las actividades (infraestructura vial y una planta de tratamiento de agua potable). En este trabajo se detalla una evaluación de la probabilidad de excedencia de la lluvia causal de dicha creciente repentina sobre la base del análisis de datos pluviométricos de alta frecuencia registrados en estaciones remotas del Sistema Telemétrico CIRSA (STC) que opera el Instituto Nacional del Agua en la cuenca de aporte (delimitada en este estudio utilizando un Sistema de Información Geográfica – SIG) y/o en cuencas adyacentes. En primera instancia se evaluó la probabilidad de excedencia de las láminas de lluvia local acumuladas para distintas duraciones en las estaciones de registro seleccionadas y luego se analizó la distribución areal y temporal de las láminas de lluvias registradas.

Para evaluar la probabilidad de excedencia de la lámina de lluvia local acumulada para distintas duraciones se estimaron la relación intensidad (i) o lámina de lluvia (h) precipitada, duración (d) y recurrencia (i-d-T o h-d-T) en cada emplazamiento seleccionado donde se registró información del evento. Esta estimación de las relaciones (i-d-T o h-d-T) se realizó utilizando técnicas de transposición de información de lluvias de diseño disponibles en el estado del arte para la provincia de Córdoba. Luego se determinaron las láminas de lluvia acumuladas en los Intervalos de Máxima lámina de lluvia precipitada durante el Evento extraordinario (IME) en cada localización, para duraciones de 15, 10, 15, 30, 60, 90 y 120 minutos y finalmente se contrastaron los valores de lámina de lluvia acumulada en los IME y los obtenidos de las relación h-d-T para estimar la probabilidad de excedencia de los valores observados.

Para la evaluación de la distribución areal de lluvia en la cuenca se calcularon los IME de los valores de lluvia media areal para las mismas duraciones que las utilizadas en el análisis local. Estas láminas de lluvia media areal resultan de ponderar las láminas precipitadas en función de la influencia zonal que cada estación tiene sobre la cuenca del arroyo Los Chorrillos. A partir de estos valores y al compararlos con los valores de láminas locales se estimaron coeficientes de distribución areal los que fueron contrastados con coeficientes disponibles en la literatura. El análisis se extendió además evaluando la distribución temporal de las láminas de lluvia registradas y se los compara con los hietogramas típicos para esa región. Los resultados obtenidos muestran que el evento hidrometeorológica analizado tiene carácter extraordinario tanto en su análisis local y areal, presentando duraciones críticas definidas en función de sus probabilidades de excedencia y su relación con el tiempo de concentración de la cuenca.

Palabras clave:

Lluvias Máximas, Eventos extraordinarios, Hidrometeorología, Estadística inferencial

INTRODUCCIÓN

En la madrugada del 14 de Marzo del 2014 se desarrolló un evento hidro-meteorológico severo que tuvo como consecuencia la creciente repentina del Arroyo “Los Chorrillos”, en el Valle de Punilla, Córdoba, afectando viviendas aledañas e infraestructura indispensable para el desarrollo habitual de las actividades como por ejemplo infraestructura vial (figura 1) y una planta de tratamiento de agua potable (figura 2) en un sector de la ciudad de Villa Carlos Paz y localidades vecinas (por ejemplo Cabalango).



Figura 1: Imagen de la costanera en el Barrio Carlos Paz Sierras.



Figura 2: Imagen de la planta de Tratamiento de agua potable de la Cooperativa San Roque (barrio Villa de Lago en Villa Carlos Paz).

El objetivo de este trabajo es evaluar la probabilidad de excedencia de la lluvia causal de la creciente repentina del 14 de Marzo del 2014 analizando además la distribución espacial y temporal de las láminas de lluvias registradas.

DESCRIPCIÓN DE LA CUENCA

El arroyo Los Chorrillos es uno de los tributarios del Lago San Roque (Figura 3), que embalsa las aguas escurridas en la cuenca alta del Río Suquía (o Primero). Al Lago San Roque contribuyen escurrimientos medios anuales de aproximadamente $10\text{m}^3/\text{s}$ generados en una cuenca hídrica de aproximadamente 1.650 km^2 , caracterizada por un relieve accidentado. El clima en esa zona es típico de la zona templada mediterránea, con concentración estival de lluvias y altas temperaturas y periodo de déficit estacional. La precipitación media anual en esa zona, calculada para el

período 1945-1979, fue de 720 mm (Catalini y García, 2009).

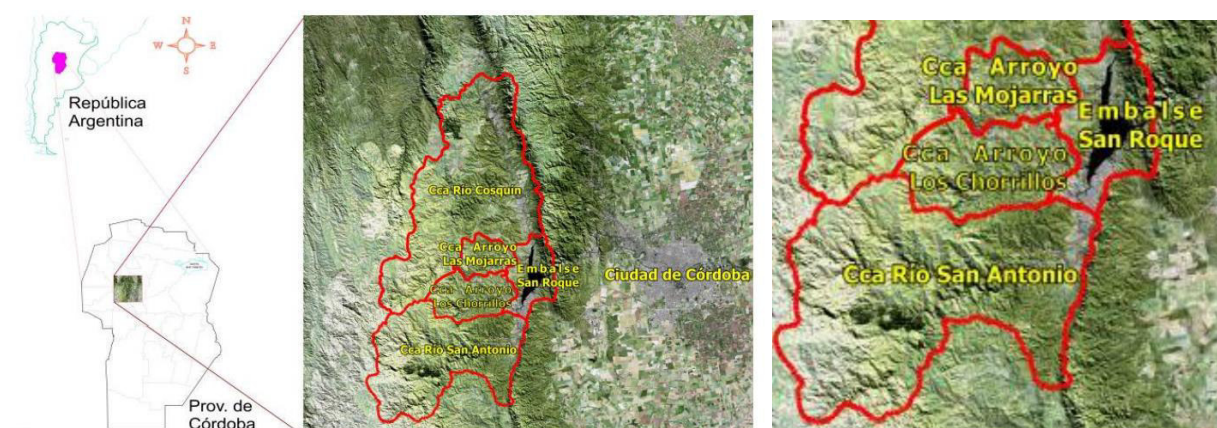


Figura 3: Cuencas de aportes de los tributarios del Lago San Roque entre los que se encuentra el Arroyo Los Chorrillos.

La cuenca de aporte del arroyo Los Chorrillos se definió en este trabajo utilizando un Sistema de Información Geográfica (SIG) con el cual además se caracterizó físicamente la cuenca determinando su pendiente, forma, altitud y longitud del cauce principal, etc. La cuenca Los Chorrillos cuenta con un área de 136,5 km² y con un perímetro de 63,9 km. Además posee un desnivel máximo de 1384 m. En cuanto a la longitud principal del cauce es de 16,6 km resultando en un ancho aproximado de la cuenca 8,2 km. La pendiente media de la cuenca es de aproximadamente 12%. Debido a las dimensiones de su cuenca de aporte, el Arroyo Los Chorrillos es el tercer tributario en importancia relativa contribuyendo escurrimiento al Lago San Roque ya que su área de aporte (aproximadamente 8% del total) es menor que las de los dos tributarios principales: Rio Cosquín y Rio San Antonio (54% y 31%, respectivamente, Catalini y García, 2009). Otras regiones que contribuyen al escurrimiento al Lago San Roque son la cuenca del Arroyo Las Mojarras y los aportes no encauzados del perilago (Figura 3). La cuenca de aporte del arroyo Los Chorrillos limita al Sur y al Oeste con la cuenca del río San Antonio, al Oeste también con la cuenca del Rio Cosquín, al Norte con la cuenca del arroyo Las Mojarras y al Este por el lago San Roque. La cuenca está centrada en longitud -64,61° y latitud -31.39°.

En las Sierras de Córdoba está instalada una red telemétrica de estaciones hidrometeorológicas e hidrométricas que está operada por el Centro de la Región Semiárida del Instituto Nacional del Agua (CIRSA – INA). En lo que se refiere a la cuenca del arroyo Los Chorrillos, no se encuentran estaciones de medición localizadas dentro de la cuenca por lo que los eventos hidrológicos se analizan a partir de datos pluviométricos de alta frecuencia registrados en localizaciones cercanas a su cuenca de aporte. Estas estaciones hidrometeorológicas son las estaciones codificadas en el sistema como 200, 900, 1400 y 1800 (Figura 4).

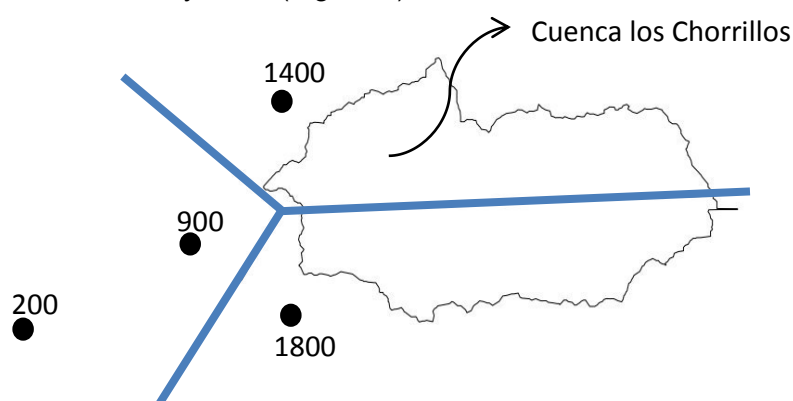


Figura 4: Estaciones hidrometeorológica pertenecientes a la red telemétrica CIRSA – INA utilizadas para caracterizar eventos hidrológicos en la cuenca del Arroyo Los Chorrillos. Se incluye además los polígonos de Thiessen utilizados para definir las áreas representadas por cada estación.

MATERIALES Y METODOS

A partir de los datos pluviométricos de alta frecuencia registrados en localizaciones cercanas a su cuenca de aporte (estaciones hidrometeorológicas 200, 900, 1400 y 1800 como se indica en Figura 4), se elaboraron series temporales con datos de lámina de lluvia precipitada con intervalo de tiempo constante utilizando para este estudio un intervalo de 1 minuto. A partir de esta información se evaluó la probabilidad de excedencia de la lámina de lluvia precipitada en cada localización de registro y luego se analizó la distribución areal y temporal de las láminas de lluvias registradas.

Probabilidad de excedencia para lámina de lluvia local

Inicialmente se determinaron los Intervalos de Máxima lámina de lluvia precipitada durante el Evento extraordinario (IME) en cada estación seleccionada, recorriendo paso a paso las series temporales (elaboradas con paso de tiempo constante de 1 minuto), utilizando lapsos móviles con cada una de las duraciones de interés: 5, 10, 15, 20, 30, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160 y 180 minutos. Luego se expresaron las láminas observadas en los IME como intensidad, a través del cociente entre la máxima lámina de lluvia precipitada, expresada en milímetros, y la duración para la cual se produjo dicha lámina, expresada en horas.

Para evaluar la probabilidad de excedencia de las intensidades de lluvia local observadas en los IME para distintas duraciones en las estaciones de registro seleccionadas se aplicó el modelo DIT (Caamaño Nelli y Dasso, 2003 y Catalini *et al* 2011), el cual es una técnica de transposición que vincula paramétricamente las intensidades de lluvia máxima esperadas en una estación pluviográfica base con las esperadas en una red pluviométrica. En el presente estudio la estación pluviográfica elegida fue La Suela (considerada representativa de la zona Sierras de Córdoba por Caamaño Nelli y Dasso, 2003) y la red pluviométrica seleccionada está integrada por las estaciones 200, 900, 1400 y 1800.

La ecuaciones (1) y (2) representan al modelo DIT, el cual tiene en cuenta características locales de la estación pluviográfica base considerada a través de sus parámetros A, B, C y el exponente q (considerado constante = 1.67, Catalini *et al.*, 2011).

$$\ln i_{d,T} = A. \phi_y - B. \delta_y + C \quad (1)$$

$$\delta_y = (\ln d)^q \quad (2)$$

Siendo ϕ_y el factor de frecuencia y δ_y el factor de duración. Los parámetros en localizaciones donde existen registros pluviométricos históricos se determinan utilizando las ecuaciones (3) a (5) teniendo en cuenta la media histórica de los logaritmos de las láminas de duración 1 día (μ) y la correspondiente desviación estándar (σ). α , β y γ son parámetros a ajustar por regresión lineal.

$$A = \sigma + \alpha \quad (3)$$

$$B = -\beta \quad (4)$$

$$C = \mu + \ln 60 + \gamma \quad (5)$$

Conociendo la media (μ') y desviación estándar (σ') de cada una de las estaciones pluviométricas (200, 900, 1400 y 1800), es posible transponer los valores A, B y C de la estación pluviográfica considerada para obtener los parámetros A', B' y C' para cada pluviómetro, a través de las ecuaciones (6) a (8):

$$A' = A - \sigma + \sigma' \quad (6)$$

$$B' = B \quad (7)$$

$$C' = C - \mu + \mu' \quad (8)$$

En este trabajo se reemplazan los valores de A', B', C' e $i_{d,T}$ (este último obtenido de los IME de cada duración) de cada estación pluviométrica en la ecuación (1), y realizando el despeje correspondiente, se obtienen los valores de \emptyset_y para cada duración considerada. Finalmente, utilizando la ecuación (9) se puede obtener el período de recurrencia (T).

$$\emptyset_y = 2,584458 \cdot (\ln T)^{3/8} - 2,252573 \quad (9)$$

Distribución areal de la lámina de lluvia registrada en el evento

En la escala areal, se determinaron los polígonos de Thiessen para conocer la influencia relativa de cada estación pluviométrica en la cuenca del arroyo Los Chorrillos (Figura 4). Luego, utilizando estos coeficientes, se calcularon los coeficientes de peso de cada estación pluviométrica con los cuales se determinaron los valores de lluvia medios areales para cada intervalo de tiempo (cada 1 minuto) durante el evento. De esta forma se obtiene una nueva secuencia de valores de lámina de lluvia representativa de toda la cuenca.

Luego, al igual que en el análisis local, se determinaron los Intervalos de Máxima lámina de lluvia precipitada durante el Evento extraordinario (IME) para la nueva secuencia de valores, recorriendo paso a paso la serie, con lapsos móviles con cada una de las duraciones de interés: 5, 10, 15, 20, 30, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160 y 180 minutos. Luego se expresaron las láminas observadas en los IME como intensidad, a través del cociente entre la máxima lámina de lluvia areal precipitada, expresada en milímetros, y la duración para la cual se produjo dicha lámina, expresada en horas

Conociendo la intensidad media areal en la cuenca, resultado del promedio ponderado según la influencia de cada estación pluviométrica, y la intensidad puntual máxima ($i_{puntual}$) se calcularon los coeficientes de decaimiento real (C_{real}) según la ecuación (10).

$$C_{real} = \frac{i_{areal}}{i_{puntual}} \quad (10)$$

Estos valores de los coeficientes de decaimiento areal (C) se compararon con los coeficientes estimados a través de la ecuación (11) (Catalini *et al.* 2011) la cual es función del área de la cuenca (A) y de un parámetro k que se determina con la ecuación (12).

$$C = 25^{-k} \cdot A^k \quad (11)$$

$$-k = 2,1438 \cdot d^{-0,4774} \quad (12)$$

Distribución temporal de la precipitación registrada en el evento

Finalmente se procedió a analizar la distribución temporal de la precipitación registrada en este evento. Para ello se compararon los hietogramas registrados en el evento (tanto areal como los puntuales de cada estación) con los hietogramas tipo obtenidos mediante las técnicas de Pilgrim, Huff e Intensidad Instantánea (Caamaño Nelli y Dasso, 2003). Las duraciones analizadas de los hietogramas fueron 30, 120 y 180 minutos respectivamente.

RESULTADOS

Probabilidad de excedencia para lámina de lluvia local

En la Tabla 1 se muestran las intensidades de lluvias máximas en cada estación seleccionada y el valor medio en toda la cuenca observados en los IME de cada una de las duraciones de interés: 5, 10, 15, 20, 30, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160 y 180 minutos.

Tabla 1: Intensidades de lluvias máximas [mm/h] en los IME para diferentes duraciones en cada estación de registro y el valor medio en toda la cuenca.

		duración [min]												
		5	10	15	20	30	40	60	80	100	120	140	160	180
Estación	200	68.00	51.33	39.86	31.53	27.69	22.78	18.19	18.81	18.20	17.17	15.33	14.23	12.82
	900	87.64	60.15	42.29	33.43	28.21	21.81	20.43	19.70	16.57	14.66	-	-	-
	1800	106.21	79.78	67.97	59.22	45.42	40.60	37.51	34.21	30.82	29.83	28.50	25.52	22.80
	1400	152.99	102.42	88.40	94.69	80.84	73.15	60.58	49.89	43.02	38.73	35.46	33.68	30.25
Media en la cuenca		103.96	86.13	77.36	64.90	62.74	57.39	47.11	39.66	36.52	33.62	31.77	29.62	26.62

Para poder determinar el periodo de recurrencia (T) de los diferentes IME de cada estación pluviométrica se ajustó el Modelo DIT. En la Tabla 2 se muestran los valores de los parámetros del modelo DIT para cada estación.

Tabla 2: Parámetros del modelo DIT para cada estación pluviométrica de registro.

Pluviógrafo Base La Suela	Estación 200	Estación 900	Estación 1400	Estación 1800
A 0.365	A' 4.172	A' 4.174	A' 4.178	A' 4.176
B 0.136	B' 0.136	B' 0.136	B' 0.136	B' 0.136
C 4.955	C' 0.769	C' 0.769	C' 0.769	C' 0.769
μ 4.186	μ' 4.223	μ' 4.226	μ' 4.230	μ' 4.228
σ 0.417	σ' 0.301	σ' 0.316	σ' 0.316	σ' 0.317

Con el modelo DIT ajustado, la recurrencia de cada uno de los IME se calculó para cada estación, despejando el factor de frecuencia del Modelo DIT y luego a través de la relación entre el factor de frecuencia y tiempo de retorno (T) para una distribución normal se despejó T (tablas)

Tabla 3: Tiempo de retorno para la lámina de lluvia precipitada en cada IME de la estación 200.

d [min]	5	10	15	20	30	40	60	80	100	120	140	160	180
i [mm/h]	68.00	51.33	39.86	31.53	27.69	22.78	18.19	18.81	18.20	17.17	15.33	14.23	12.82
$\delta\gamma$	2.21	4.02	5.26	6.23	7.69	8.81	10.48	11.73	12.75	13.60	14.34	14.99	15.57
$\Phi\gamma$	-1.89	-2.03	-2.37	-2.78	-2.50	-2.68	-2.67	-1.85	-1.43	-1.20	-1.25	-1.19	-1.30
T [años]	1.01	1.00	1.00	1.01	1.00	1.01	1.01	1.01	1.05	1.10	1.08	1.10	1.07

Tabla 4: Tiempo de retorno para la lámina de lluvia precipitada en cada IME de la estación 900.

d [min]	5	10	15	20	30	40	60	80	100	120
i [mm/h]	87.64	60.15	42.29	33.43	28.21	21.81	20.43	19.70	16.57	14.66
$\delta\gamma$	2.21	4.02	5.26	6.23	7.69	8.81	10.48	11.73	12.75	13.60
$\phi\gamma$	-0.84	-1.33	-2.02	-2.42	-2.31	-2.71	-2.09	-1.58	-1.72	-1.74
T [años]	1.22	1.07	1.00	1.00	1.00	1.01	1.00	1.03	1.02	1.01

Tabla 5: Tiempo de retorno para la lámina de lluvia precipitada en cada IME de la estación 1400.

d [min]	5	10	15	20	30	40	60	80	100	120	140	160	180
i [mm/h]	152.99	102.42	88.40	94.69	80.84	73.15	60.58	49.89	43.02	38.73	35.46	33.68	30.25
δy	2.21	4.02	5.26	6.23	7.69	8.81	10.48	11.73	12.75	13.60	14.34	14.99	15.57
ϕy	1.26	0.67	0.75	1.51	1.66	1.86	2.01	1.92	1.88	1.92	1.96	2.10	2.00
T [años]	9.59	4.00	4.46	15.14	20.66	31.42	44.07	35.86	32.81	36.03	39.98	55.90	43.36

Tabla 6: Tiempo de retorno para la lámina de lluvia precipitada en cada IME de la estación 1800.

d [min]	5	10	15	20	30	40	60	80	100	120	140	160	180
i [mm/h]	106.21	79.78	67.97	59.22	45.42	40.60	37.51	34.21	30.82	29.83	28.50	25.52	22.80
δy	2.21	4.02	5.26	6.23	7.69	8.81	10.48	11.73	12.75	13.60	14.34	14.99	15.57
ϕy	-0.12	-0.27	-0.23	-0.26	-0.51	-0.36	0.20	0.50	0.62	0.94	1.14	1.06	0.94
T [años]	1.83	1.64	1.68	1.65	1.42	1.55	2.39	3.25	3.78	5.77	7.94	6.96	5.76

De las tablas anteriormente presentadas, se observa que el mayor tiempo de recurrencia (T) se da en la estación 1400 para una duración asociada de 160 minutos. Además, partiendo del dato de que la pendiente media de la cuenca (S) es igual a 2,5% y la longitud del cauce principal (L) es igual a 28 km aplicando la fórmula de Kirpich puede encontrarse que el tiempo de concentración de la cuenca de estudio es de 200 minutos. Debido a que el tiempo característico de la cuenca (t_c) es similar a la duración que resultó crítica al aplicar el modelo DIT, la situación resultó muy desfavorable para la generación de escurrimiento en la cuenca.

Distribución areal de la lámina de lluvia registrada en el evento

La Tabla 7 muestra los coeficientes de decaimiento real (C_{real}) calculados utilizando la ecuación (10) y las intensidades de lluvias máximas locales en la estación 1400 y el valor medio en toda la cuenca observados en los IME de cada una de las duraciones de interés: 5, 10, 15, 20, 30, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160 y 180 minutos.

Tabla 7: Valores de C_{real} (utilizando como información puntual la estación 1400) asociado a diferentes duraciones para la cuenca de estudio.

d [min]	5	10	15	20	30	40	60	80	100	120	140	160	180
C_{real}	0.68	0.84	0.88	0.69	0.78	0.78	0.78	0.79	0.85	0.87	0.90	0.88	0.88

De comparar los coeficientes de decaimiento disponibles en la bibliografía (calculados con la ecuación 11) con los reales, se observa que en el evento de análisis, los coeficientes reales fueron muy cercanos a la unidad lo que indicaría que la precipitación media areal en la cuenca fue muy similar a la puntual de la estación 1400.

Tabla 8: Comparación entre Coeficientes de atenuación real (ecuación 10) y estimado utilizando ecuación (11)

d [min]	5	10	15	20	30	40	60	80	100	120	140	160	180
C_{real}	0.68	0.84	0.88	0.69	0.78	0.78	0.78	0.79	0.85	0.87	0.90	0.88	0.88
$C_{ecuación(11)}$	0.18	0.30	0.37	0.42	0.49	0.53	0.60	0.64	0.67	0.69	0.71	0.72	0.74

Distribución temporal de la precipitación registrada en el evento

En la Figura ,6 y 7 se muestran los hietogramas del evento junto con los hietogramas tipo obtenidos mediante las técnicas de Pilgrim, Huff e Intensidad Instantánea para una duración de

30, 120 y 180 minutos. En la Tabla 4: Coeficiente de avance obtenido para los hietogramas de 120 minutos de duración

Tabla 10: Coeficiente de avance obtenido para los hietogramas de 120 minutos de duración

En la Tablas 9 a la 11 se ha determinado para cada hietograma obtenido el coeficiente de avance.

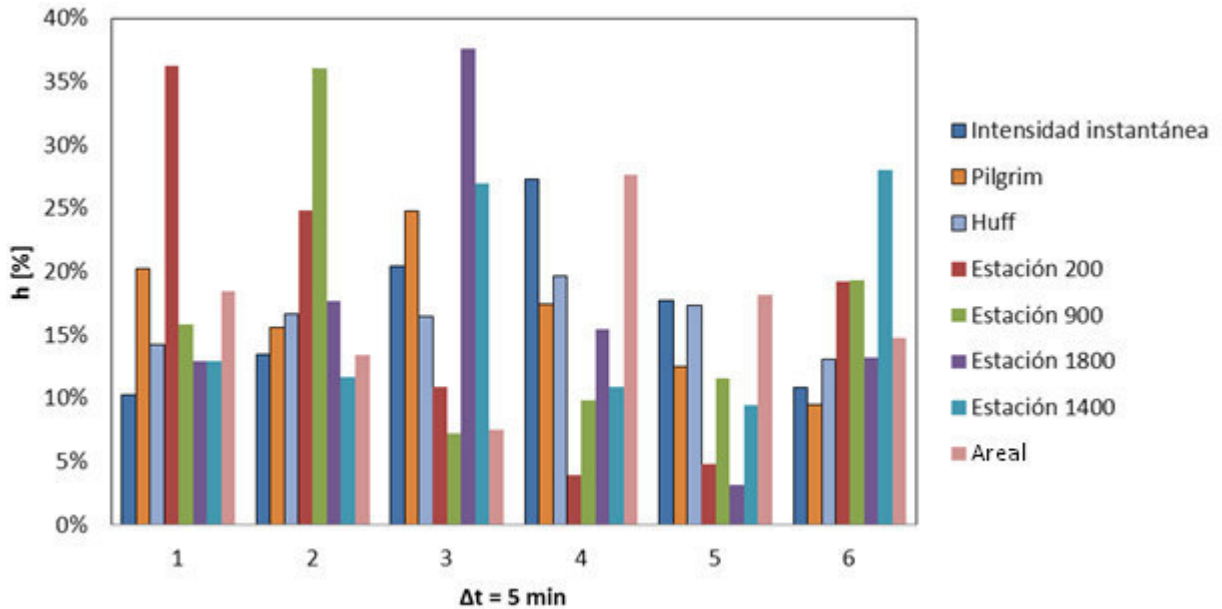


Figura 5: Hietogramas teóricos junto con hietogramas observados en cada estación y el hietograma areal de 30 minutos de duración.

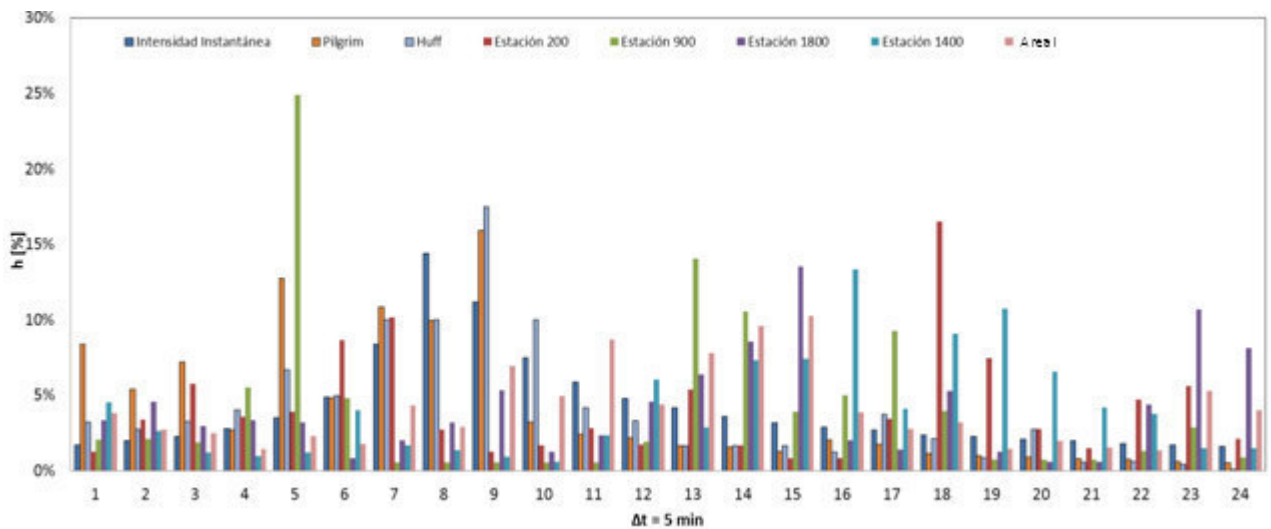


Figura 6: Hietogramas teóricos junto con hietogramas observados en cada estación y el hietograma areal de 120 minutos de duración

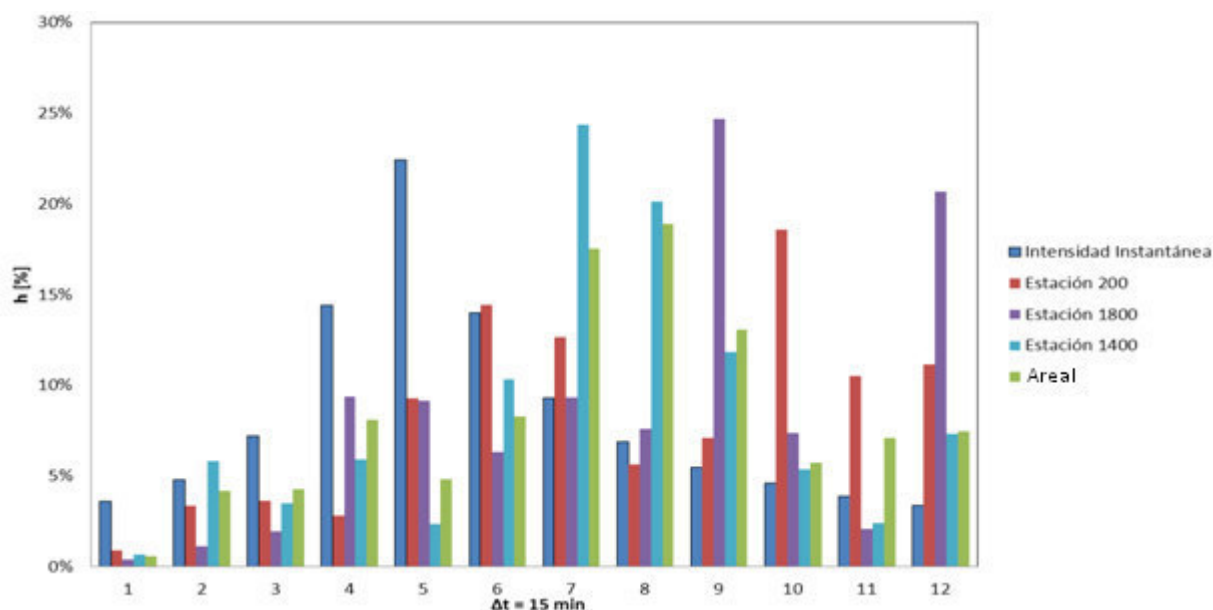


Figura 7: Hietogramas teóricos junto con hietogramas observados en cada estación y el hietograma areal de 180 minutos de duración

Tabla 9: Coeficiente de avance obtenido para los hietogramas de 30 minutos de duración.

	Int. Inst.	Pilgrim	Huff	Est. 200	Est. 900	Est. 1800	Est. 1400	Areal
Posición del pico	4	3	4	1	2	3	6	4
Coeficiente de Avance	58%	42%	58%	8%	25%	42%	92%	58%

Tabla 10: Coeficiente de avance obtenido para los hietogramas de 120 minutos de duración

	Int. Inst.	Pilgrim	Huff	Est. 200	Est. 900	Est. 180	Est. 1400	Areal
Posición del pico	8	9	9	18	5	15	16	14
Coeficiente de avance	31%	35%	35%	73%	19%	60%	65%	56%

Tabla 11: Coeficiente de avance obtenido para los hietogramas de 180 minutos de duración

	Int. Inst	Est. 200	Est. 1800	Est. 1400	Areal
Posición del pico	5	10	9	7	8
Coeficiente de avance	38%	79%	71%	54%	63%

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos muestran que el evento hidrometeorológico analizado tiene carácter extraordinario tanto en su análisis local y areal, presentando duraciones críticas (definidas en función de sus probabilidades de excedencia y su relación con el tiempo de concentración de la cuenca.

El periodo de recurrencia más alto estimado localmente para este evento fue de 55.90 años y se encuentra asociado a una duración de 160 minutos. Esta recurrencia fue obtenida mediante los datos de lluvia de la estación 1400.

Los valores del coeficiente de atenuación "C" obtenidos mediante el cociente entre las láminas puntuales de la estación 1400 y las láminas medias areales obtenidas para cada duración mediante polígonos de Thiessen se muestra que la distribución areal de la lluvia fue bastante uniforme dentro de la cuenca.

Los hietogramas del evento extraordinario para cada estación no son representados correctamente por los hietogramas tipos.

Este evento, con las características de intensidad, distribución temporal y areal de la lluvia podría ser usado para diseñar y validar obras de infraestructura hídrica en la cuenca de estudio debido a su carácter extraordinario.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Caamaño Nelli, G.; C.M. Dasso (2003) "Lluvias de Diseño: Conceptos, Técnicas y Experiencias". CONICET. Universitas-Editorial Científica Universitaria. Córdoba, Argentina

Catalini, C. G.; G. Caamaño Nelli y C. M. Dasso, compiladores (2011) "Desarrollo y Aplicaciones sobre Lluvias de Diseño en Argentina. 284 páginas. ISBN13: 978-3-8454-9722-8. Edit. Acad. Española (Lap Lambert Publishing GMBH & Co. KG). Saarbrücken, Deutschland.

Catalini, C.G.; García, C.M.(2009) "Análisis Expeditivo De Disponibilidad Hídrica Y Su Relación Con La Demanda. Caso: Ciudad De Villa Carlos Paz" Informe Interno del Grupo de Estudios Hidrológicos en Cuencas Pobremente Aforadas de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Católica de Córdoba, (EHCPA-UCC).

CORRELACIÓN ENTRE PRECIPITACIONES MÁXIMAS MENSUALES Y MÁXIMAS DE DURACIÓN ENTRE 1 Y 5 DÍAS

Lucía Odicini¹, Jovita Mendez Zacarías^{1, 3}, Gerardo Riccardi^{1, 2} y Albertina González¹,

¹ Departamento de Hidráulica, Fac. de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario

² Consejo de Investigaciones Universidad Nacional de Rosario

³ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas
Riobamba 245bis – (0341) 4808541 - lodicini@fceia.unr.edu.ar

RESUMEN

En la región de la pampa húmeda cercana a Rosario las precipitaciones medias anuales son del orden de los 1000 mm, siendo las inundaciones una de las problemáticas con mayor impacto sobre la población. Por lo cual resulta de importancia disponer de información referida a precipitaciones, ya sea para el diseño de estructuras hidráulicas de protección contra inundaciones, como para el desarrollo de medidas no estructurales. En ciertos sitios de la región se cuenta con registros oficiales de precipitaciones diarias en series de más de 30 años, pero en la mayoría sólo se dispone de datos de precipitaciones mensuales. Ante esta situación resulta de interés desarrollar alguna herramienta que nos permita estimar a partir de valores máximos mensuales, láminas máximas de lluvia asociadas a tormentas de duración entre 1 y 5 días. En este contexto se aborda la determinación de relaciones entre láminas de distintas duraciones en 7 estaciones de la región. Se han utilizado datos provenientes de la red del Servicio Meteorológico Nacional, dado que existe consistencia en la definición de cada uno de los periodos de 24 hs de lluvia de 9 a 9 de la mañana. Las series corresponden a las estaciones: Rosario (1935-2012), Paraná (1931-2012), Junín (1959-2012), Sauce Viejo (1959-2012), El Trébol (1990-2012), Gualaguaychú (1960-2012), Marcos Juárez (1960-2012). Se obtuvieron relaciones entre valores máximos acumulados de precipitaciones de 30 días con los máximos acumulados de 1 a 5 días. Se analizó el ajuste con las curvas de regresión de tipo lineal y potencial para las diferentes relaciones, calificándose el mismo como aceptable en función del BIAS, el coeficiente de correlación de Pearson (R) y el coeficiente de eficiencia de Nash – Sutcliffe (NSE). Si bien las diferencias son mínimas, se obtuvieron mejores resultados respecto del coeficiente R para curvas de tipo potencial en las relaciones P1-P30, P2-P30, mientras que el ajuste lineal presenta un R mayor para las relaciones P3-P30, P4-P30 y P5-P30. Finalmente se determinaron intervalos de confianza para las relaciones lineales con un nivel de significancia $\alpha=0.10$.

Palabras Claves:

Relación entre láminas máximas, lluvia máxima 30 días, pampa húmeda

INTRODUCCIÓN

En el diseño hidrológico aplicado a problemáticas hídricas de la región vinculadas a inundaciones, es común el requerimiento de series de varios días de precipitaciones a los efectos de mayoración de volúmenes y caudales (DH, 2008). En efecto, el diseño de obras para atender a soluciones de problemáticas de inundaciones tales como embalses, estructuras de infiltración, control de sedimentos, estructuras de evacuación de excedentes, entre otras, donde suele ser crítica para el diseño la magnitud del volumen de escurrimiento (además del caudal máximo), se utilizan series de tormentas de 1 hasta 5 días de longitud temporal.

En general esta demanda no es correspondida con la disponibilidad local de información de lluvias diarias en series de tiempo lo suficientemente extendidas. Sin embargo la disponibilidad es mayor en lo que respecta a lluvias acumuladas mensuales. En muchas localidades de la región, en cooperativas de granos u entidades vinculadas actividades rurales se cuenta con extensas series (más de 30 años) de valores acumulados mensuales. Atendiendo a indagar acerca de la posibilidad de relacionar mediante ecuaciones, lluvias máximas mensuales con acumulados de lluvias de 1 a 5 días, se plantea el presente trabajo en el que se establecen relaciones entre láminas máximas de 30 días de duración y lluvias máximas de 1 a 5 días de duración. Las relaciones determinadas son de tipo lineal y potencial, dependiendo del caso, y se acompañan del correspondiente test de bondad del ajuste y la construcción de intervalos de confianza. Con el consiguiente complemento de la relación entre máximos mensuales y lluvia en 30 días se arriba a una metodología de estimación aproximada partiendo desde lluvia mensual a lluvia de varios días. Cabe destacar que se aborda el acumulado sin incluir análisis alguno en lo que respecta a distribuciones temporales internas, tampoco se abordan aspectos relacionados a la probabilidad de ocurrencia.

DESCRIPCIÓN DE LAS ESTACIONES PLUVIOGRÁFICAS

Se utilizó información proveniente de estaciones pluviográficas pertenecientes al Servicio Meteorológico Nacional (SMN) dado que existe consistencia en la definición de cada uno de los periodos de 24 hs de lluvia de 9 a 9 de la mañana. En particular se trata de 7 estaciones de la región que cuentan con series de datos registrados de más de 20 años. Las series corresponden a las estaciones: Rosario Aero, Paraná, Junín, Sauce Viejo, El Trébol, Gualeguaychú y Marcos Juárez. En la Figura 1 se puede observar la ubicación geográfica de las estaciones, de las cuales 3 pertenecen a la provincia de Santa Fe, 2 a la provincia de Entre Ríos, 1 a la provincia de Córdoba y 1 a la provincia de Buenos Aires.

Cabe mencionar que también se contó con datos provenientes de la estación de Venado Tuerto, pero los mismos no pudieron ser utilizados debido a que la serie presenta una gran cantidad de datos faltantes distintos años.



Figura 1. Ubicación geográfica de las estaciones pluviográficas en estudio.

En la Tabla 1 se presentan la ubicación en coordenadas Latitud, Longitud y además el periodo con disponibilidad de datos registrados para cada estación.

Tabla 1. Ubicación de las estaciones en estudio y periodo disponible de registros.

Estación	Ubicación		Periodo
	Latitud	Longitud	
El Trebol	32° 12' 27" Sur	61° 42' 37" Oeste	1990 - 2012
Gualeguaychu	33° 00' 59" Sur	58° 31' 07" Oeste	1960 - 21012
Junin	34° 34' 56" Sur	60° 57' 02" Oeste	1959 - 2012
Marcos Juárez	32° 41' 38" Sur	62° 06' 13" Oeste	1960 - 2012
Paraná	31° 47' 22" Sur	60° 29' 02" Oeste	1931 - 2012
Rosario Aero	32° 54' 57" Sur	60° 46' 49" Oeste	1935 - 2012
Sauce Viejo	31° 42' 34" Sur	60° 48' 22" Oeste	1959 - 2012

En la Figura 2 se presenta la ubicación geográfica de las estaciones georeferenciadas en coordenadas planas (Gauss Krugger faja 5), conjuntamente con la graficación de la isohietas de lluvia media anual.

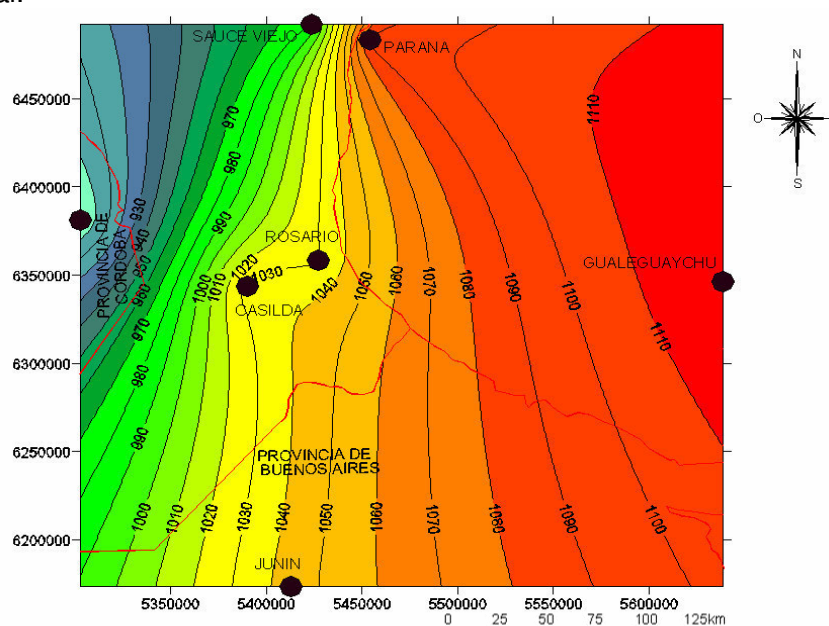


Figura 2. Ubicación geográfica de las estaciones e isohietas de lluvia media anual. Fuente: Riccardi et al (2012).

METODOLOGÍA

Tratamiento de la Información

Se detectaron algunas series que presentaban periodos incompletos, por lo cual se procedió a descartar aquellos años en los cuales se considera que, por la magnitud del periodo faltante y su ubicación en el año, podrían influir en los resultados del presente trabajo.

Luego se analizaron las series de datos de precipitación a través del Test U encontrándose que en dos de ellas existían cambios en la tendencia central de las muestras. Las series en cuestión son Paraná y Sauce Viejo. Por esta razón se decidió utilizar solo una parte de dichas series, aquella que se registró posteriormente al cambio en la tendencia central detectada en el año 1970 aproximadamente.

Desarrollo

Con la información ya tratada se confeccionaron planillas de valores de precipitaciones diarias, y acumuladas para 2, 3, 4, 5 y 30 días.

En cada una de las estaciones se obtuvieron las láminas máximas por año, para cada una de las duraciones. Luego se determinaron las siguientes relaciones entre láminas:

- P 30 días vs P 1 día (P30 – P1).
- P 30 días vs P 2 días (P30 – P2).
- P 30 días vs P 3 días (P30 – P3).
- P 30 días vs P 4 días (P30 – P4).
- P 30 días vs P 5 días (P30 – P4).

Para obtener una expresión matemática que vincule las relaciones se propusieron diferentes curvas de regresión. De las cuales las que presentaron mejor ajuste fueron las de tipo lineal (ver Ec. 1) y potencial (ver Ec. 2).

$$P_i = m \times P_{30} + h \quad ; \text{ con } i \text{ variable entre 1 y 5} \quad (\text{Ec. 1})$$

$$P_i = a \times P_{30}^b \quad ; \text{ con } i \text{ variable entre 1 y 5} \quad (\text{Ec. 2})$$

A los efectos de analizar la bondad de los ajustes para las distintas relaciones, se calcularon los parámetros estadísticos BIAS, PBIAS, NSE (Nash – Sutcliffe), R y R² para ambos ajustes en cada una de las estaciones. También se evaluó el error cuadrático medio (ECM), pero no fue considerado para la calificación del ajuste.

Los valores de referencia considerados a los fines de calificar los ajustes obtenidos según PBIAS, NSE y para determinar el grado de correlación existente entre las láminas máximas acumuladas mensuales y entre 1 y 5 días según el coeficiente R, se pueden observar en la Tabla 2.

Tabla 2. Valores de referencia para la evaluación de ajuste según distintos indicadores.

Tipo y grado de correlación / Condición	Valores de R	PBIAS	NSE
No existe / débil	0	>±25	< 0.5
Positiva débil / satisfactoria	$0 < R \leq 0.5$	±15 - ±25	0.5 - 0.64
Positiva moderada / buena	$0.5 < R < 0.8$	±10 - ±15	0.65 - 0.74
Positiva fuerte / muy buena	$0.8 \leq R < 1$	±10	≥ 0.75

En las Tablas 3 y 4 se presentan los valores obtenidos de los diferentes indicadores para ambos ajustes en todas las estaciones.

Tabla 3. Indicadores obtenidos para el ajuste lineal.

Relación	Indicador	Rosario	Paraná	Sauce Viejo	Marcos Juarez	Gualeguaychú	Junín	El Trébol
1 día - 30 días	BIAS	0,01	0,02	0,01	0,96	-0,71	-1,18	0,92
	PBIAS	0,01	0,01	0,01	1,16	-0,72	-1,26	1,08
	N-S	0,34	0,37	0,51	0,47	0,54	0,41	0,21
	R	0,58	0,61	0,74	0,68	0,76	0,58	0,46
	R2	0,34	0,37	0,54	0,46	0,58	0,34	0,21
2 días - 30 días	BIAS	-0,01	0,01	-0,01	1,15	-0,43	-0,50	0,91
	PBIAS	-0,01	0,01	-0,01	1,19	-0,36	-0,44	0,83
	N-S	0,42	0,56	0,49	0,43	0,52	0,47	0,39
	R	0,65	0,75	0,74	0,66	0,75	0,63	0,63
	R2	0,42	0,56	0,55	0,43	0,57	0,39	0,39
3 días - 30 días	BIAS	0,00	0,01	0,01	0,80	-0,08	-0,40	0,96
	PBIAS	0,00	0,00	0,01	0,78	-0,06	-0,32	0,79
	N-S	0,42	0,64	0,62	0,49	0,70	0,56	0,44
	R	0,65	0,80	0,82	0,71	0,85	0,71	0,67
	R2	0,42	0,64	0,67	0,51	0,73	0,50	0,45
4 días - 30 días	BIAS	-0,01	-0,01	0,01	1,06	-0,22	-0,68	0,75
	PBIAS	0,00	-0,01	0,01	0,93	-0,15	-0,52	0,53
	N-S	0,45	0,65	0,63	0,62	0,74	0,57	0,57
	R	0,67	0,81	0,83	0,79	0,87	0,72	0,76
	R2	0,45	0,65	0,69	0,63	0,76	0,52	0,57
5 días - 30 días	BIAS	-0,01	-0,003	-0,001	1,06	-0,18	-0,12	8,06
	PBIAS	-0,01	-0,002	-0,001	0,89	-0,12	-0,09	5,69
	N-S	0,51	0,66	0,69	0,62	0,75	0,62	0,78
	R	0,72	0,81	0,86	0,80	0,88	0,76	0,78
	R2	0,51	0,66	0,74	0,64	0,77	0,57	0,61

Tabla 4. Indicadores obtenidos para el ajuste potencial.

Relación	Indicador	Rosario	Paraná	Sauce Viejo	Marcos Juárez	Gualeduaychú	Junín	El Trébol
1 día - 30 días	BIAS	-3,22	-4,62	-2,96	-1,33	-2,90	-5,35	-2,46
	PBIAS	-3,49	-4,36	-3,35	-1,61	-2,97	-5,71	-2,89
	N-S	0,33	0,36	0,50	0,47	0,53	0,36	0,21
	R	0,63	0,66	0,73	0,70	0,72	0,62	0,57
	R2	0,39	0,43	0,54	0,49	0,52	0,39	0,32
2 días - 30 días	BIAS	-3,62	-4,85	-4,61	-0,80	-3,84	-4,95	-3,66
	PBIAS	-3,23	-3,59	-4,05	-0,83	-3,25	-4,43	-3,33
	N-S	0,41	0,55	0,46	0,44	0,52	0,44	0,37
	R	0,65	0,75	0,72	0,67	0,73	0,68	0,60
	R2	0,42	0,56	0,52	0,45	0,54	0,47	0,36
3 días - 30 días	BIAS	-4,17	-4,69	-5,03	-1,00	-4,15	-5,00	-4,90
	PBIAS	-3,40	-3,15	-3,85	-0,97	-3,16	-4,00	-4,02
	N-S	0,40	0,63	0,61	0,50	0,69	0,53	0,42
	R	0,63	0,79	0,79	0,73	0,80	0,72	0,69
	R2	0,39	0,62	0,63	0,53	0,64	0,52	0,47
4 días - 30 días	BIAS	-4,57	-4,25	-5,19	-1,19	-9,44	-5,36	-3,53
	PBIAS	-3,44	-2,71	-3,77	-1,05	-6,63	-4,07	-2,65
	N-S	0,43	0,65	0,62	0,61	0,72	0,54	0,54
	R	0,65	0,80	0,81	0,81	0,82	0,73	0,72
	R2	0,42	0,65	0,65	0,66	0,68	0,53	0,52
5 días - 30 días	BIAS	2,98	-4,16	-4,52	-1,02	-5,18	-4,50	3,74
	PBIAS	2,12	-2,47	-3,10	-0,87	-3,45	-3,21	2,64
	N-S	0,51	0,66	0,69	0,62	0,73	0,60	0,78
	R	0,70	0,81	0,85	0,82	0,82	0,75	0,72
	R2	0,49	0,66	0,72	0,68	0,67	0,56	0,52

Considerando los valores presentados en las Tablas 3 y 4, se observa que en términos de PBIAS los ajustes obtenidos para todas las relaciones de máximos, tanto para el caso de regresión lineal como para el caso de regresión potencial, son muy buenos. En cambio tanto el grado de correlación según el coeficiente de Pearson (R) como el ajuste considerando el coeficiente de eficiencia de Nash – Sutcliffe son variables. En el primer caso, el grado de correlación se da entre débil, moderada y fuerte. Y en el caso de NSE los resultados varían entre débil, satisfactoria, buena y muy buena. Los mejores ajustes, según estos últimos indicadores, se dan entre máximo acumulado de 30 días y los máximos acumulados para 3 y más días, coincidiendo con aquellas duraciones críticas que mayoran la estimación de caudales y volúmenes de crecidas máximas en cuencas de esta región (Riccardi et al, 2012).

Por otra parte se puede apreciar una leve mejora en las correlaciones obtenidas mediante ajustes potenciales por sobre los ajustes lineales para los máximos acumulados entre P30 – P1 y P30 – P2, y mediante ajustes lineales para los máximos acumulados entre P30 – P3, P30 – P4 y P30 – P5.

A modo ilustrativo se presentan de manera gráfica, ambos ajustes para todas las relaciones en la estación Rosario Aero, como así también las ecuaciones y los valores de R^2 correspondientes. (Ver Figuras 3 a 7):

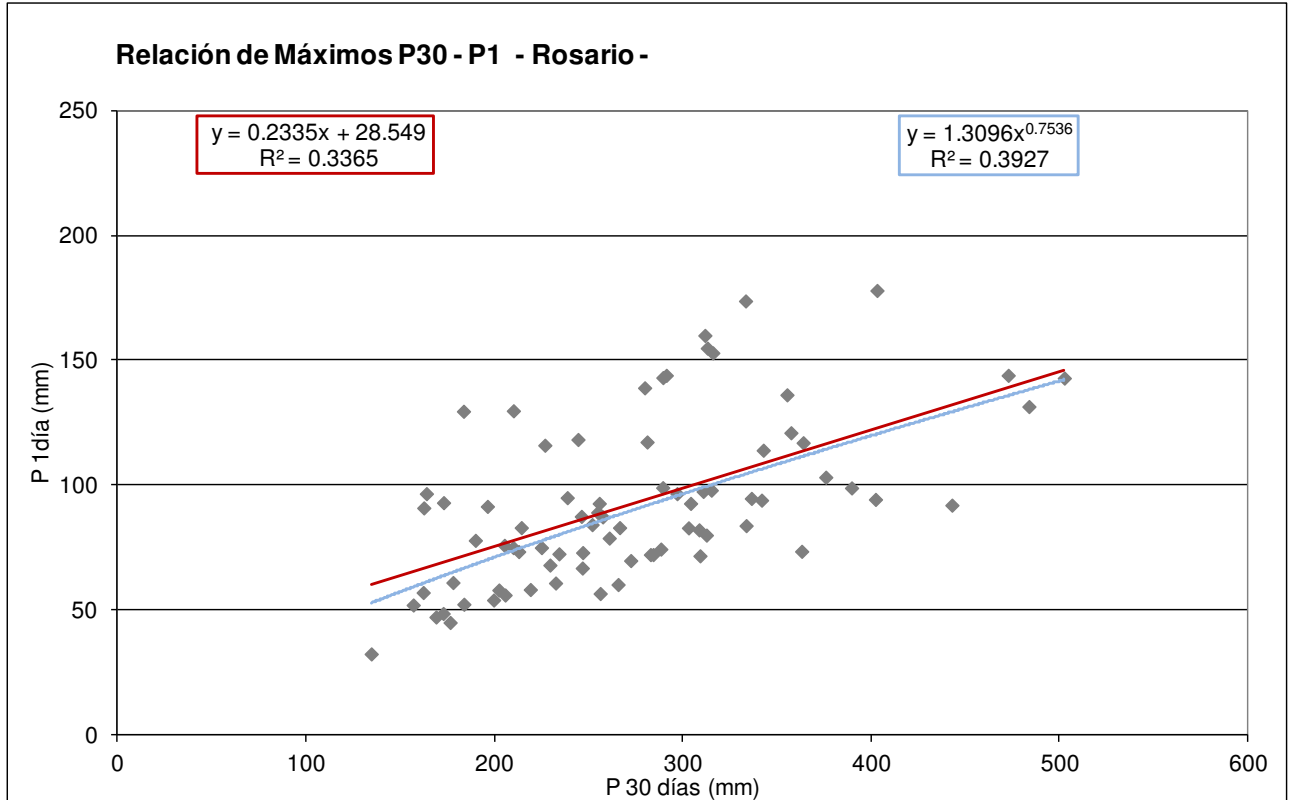


Figura 3. Estación Rosario. Relación de máximos de 30 días y máximo de 1 día.

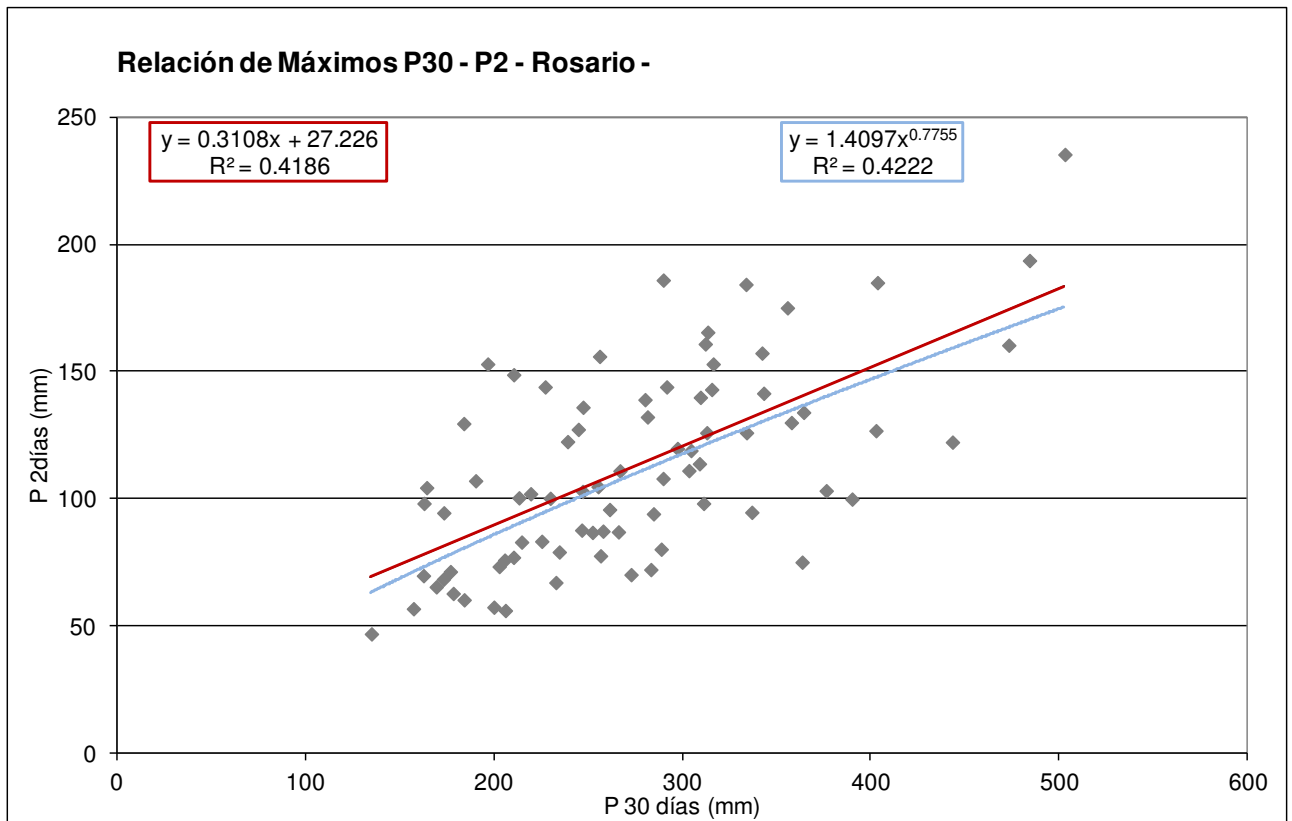


Figura 4. Estación Rosario. Relación de máximos de 30 días y máximo de 2 días.

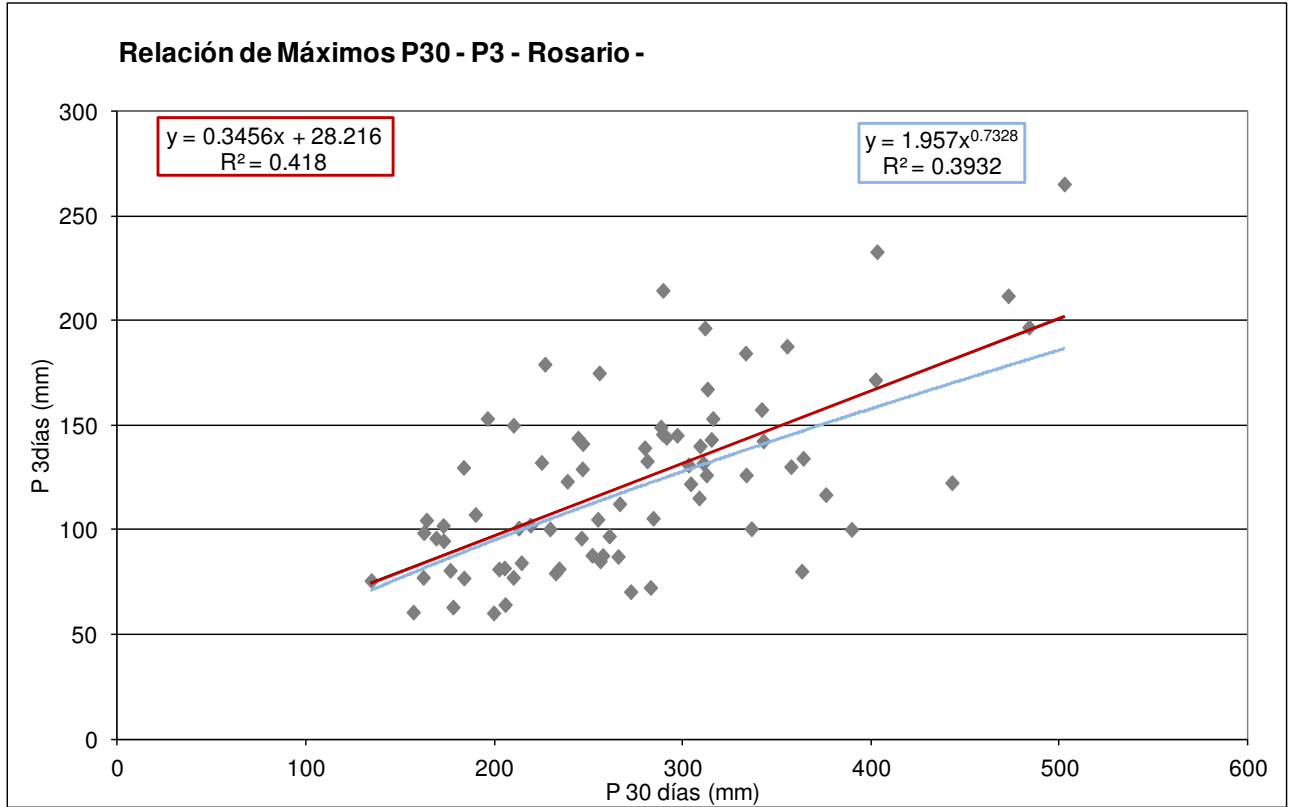


Figura 5. Estación Rosario. Relación de máximos de 30 días y máximo de 3 días.

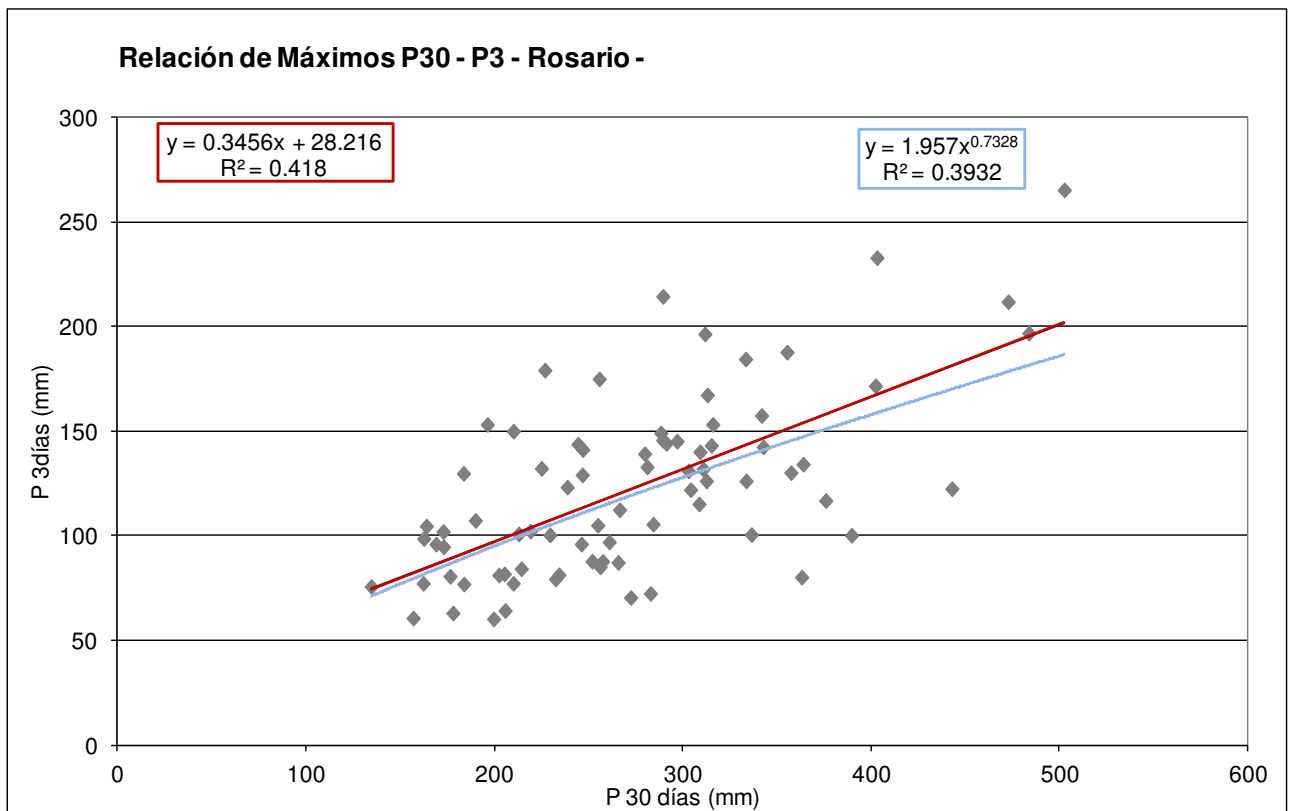


Figura 6. Estación Rosario. Relación de máximos de 30 días y máximo de 4 días.

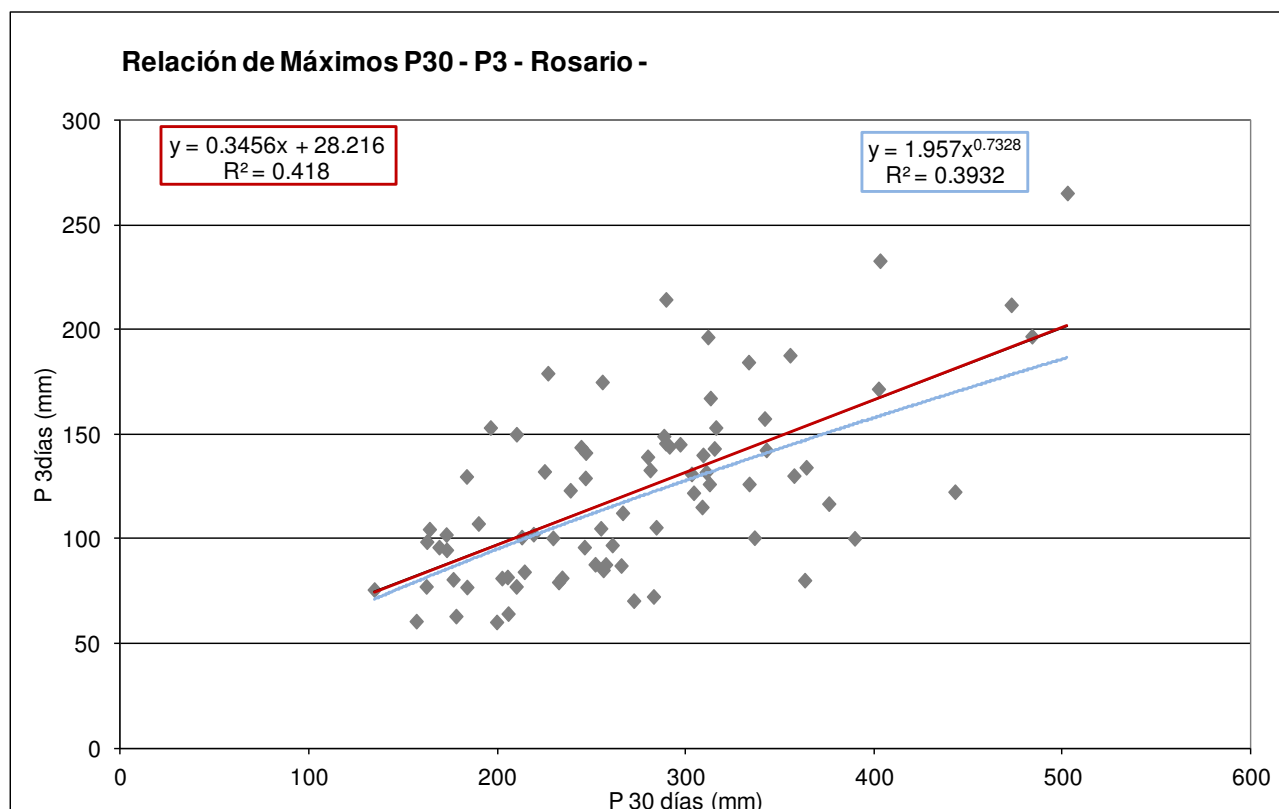


Figura 7. Estación Rosario. Relación de máximos de 30 días y máximo de 5 días.

Considerando el tipo de ajuste que presentó mejor performance para cada relación, los parámetros que definen a cada una de las curvas de regresión (Ec. 1 y Ec. 2) se presentan en la Tabla 5 para las diferentes estaciones.

Tabla 5. Parámetros de las ecuaciones que representan el ajuste.

Relación	30 días - 1 día		30 días - 2 días		30 días - 3 días		30 días - 4 días		30 días - 5 días	
Mejor Ajuste	Potencial				Lineal					
Parámetro	a	b	a	b	m	h	m	h	m	h
Rosario	1.310	0.754	1.410	0.776	0.346	28.216	0.414	19.939	0.467	12.838
Paraná	0.523	0.913	0.205	1.117	0.543	-25.985	0.558	-22.756	0.584	-19.095
El Trebol	1.391	0.723	1.055	0.816	0.440	-3.122	0.526	-16.157	0.569	-20.075
Guauguaychu	2.333	0.653	1.570	0.755	0.423	5.319	0.497	-5.818	0.522	-5.562
Junin	1.304	0.749	0.841	0.860	0.451	-2.679	0.472	-2.052	0.508	-3.464
Marcos Juarez	1.197	0.767	2.491	0.663	0.305	28.328	0.472	-2.297	0.484	-0.101
Sauce Viejo	0.880	0.811	1.035	0.826	0.515	-16.452	0.557	-21.117	0.612	-28.325

Cabe aclarar que las ecuaciones definidas por los parámetros que se muestran en la tabla anterior, sólo tienen validez de aplicación para los valores de lámina acumulada en 30 días que se encuentran comprendidos en el rango entre 100 mm y 600 mm. Éste, es el rango de valores para el cual se realizó el análisis y en el cual hay datos disponibles.

En las Figuras 8 a 12 se presentan de manera gráfica, las curvas de regresión de las estaciones agrupadas en función de las diferentes relaciones, considerando el ajuste elegido para cada una. Relaciones P30 – P1 y P30 – P2 ajuste potencial y las tres restantes ajuste lineal.

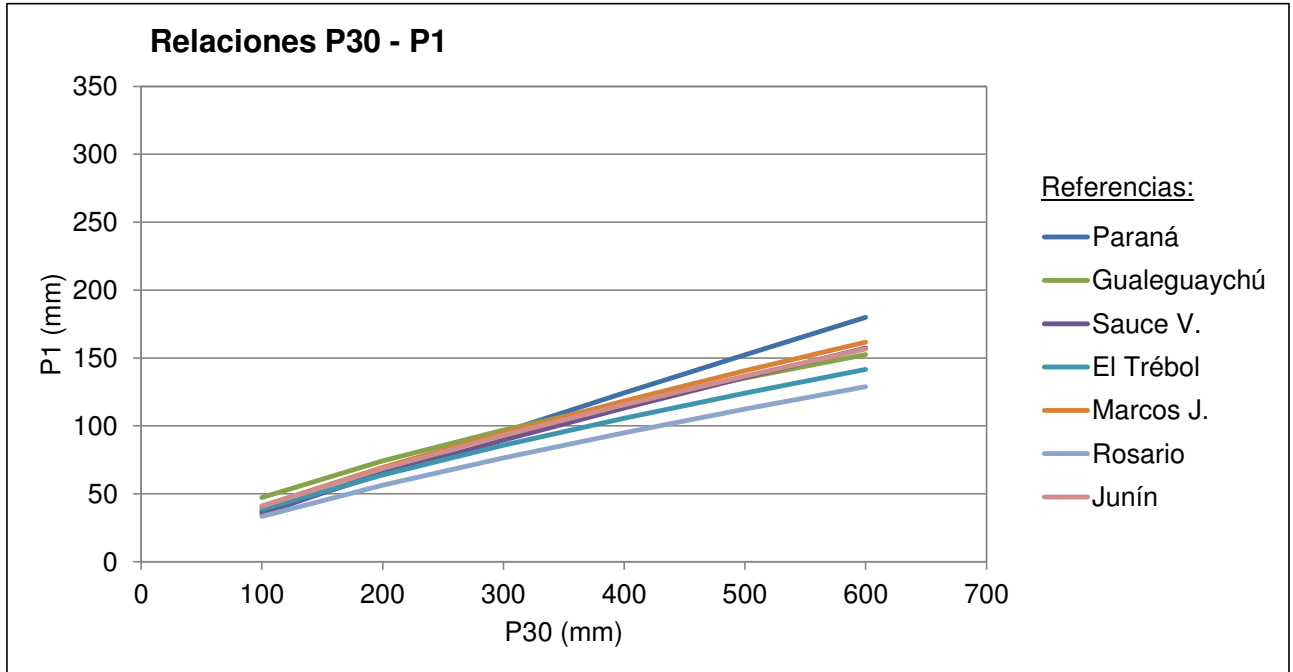


Figura 8. Curvas de regresión relación máximos de 30 días y 1 día. Ajuste potencial.

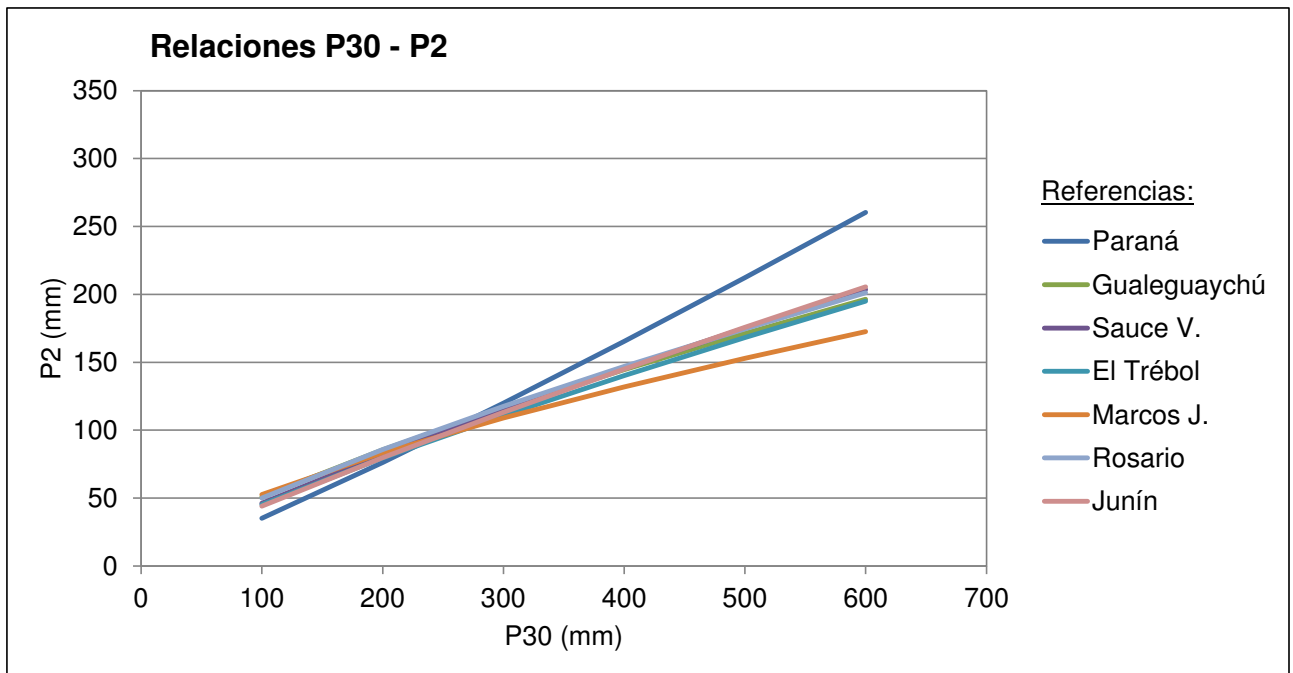


Figura 9. Curvas de regresión relación máximos de 30 días y 2 días. Ajuste potencial.

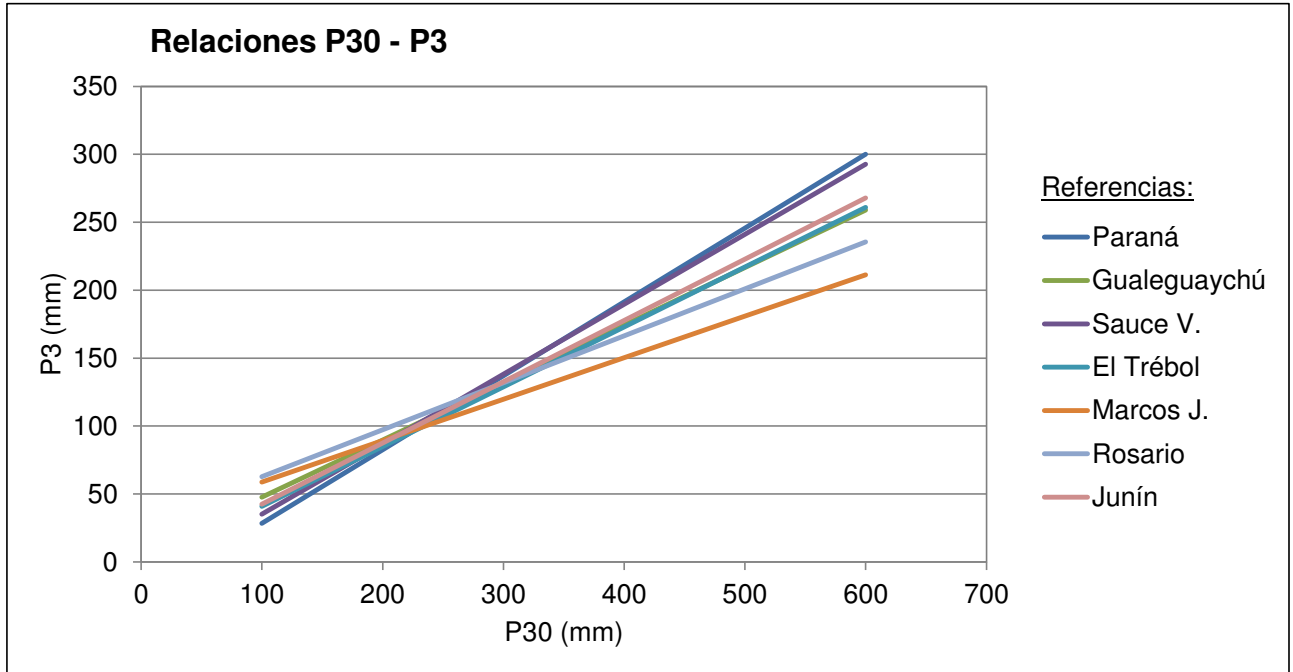


Figura 10. Curvas de regresión relación máximos de 30 días y 3 días. Ajuste lineal.

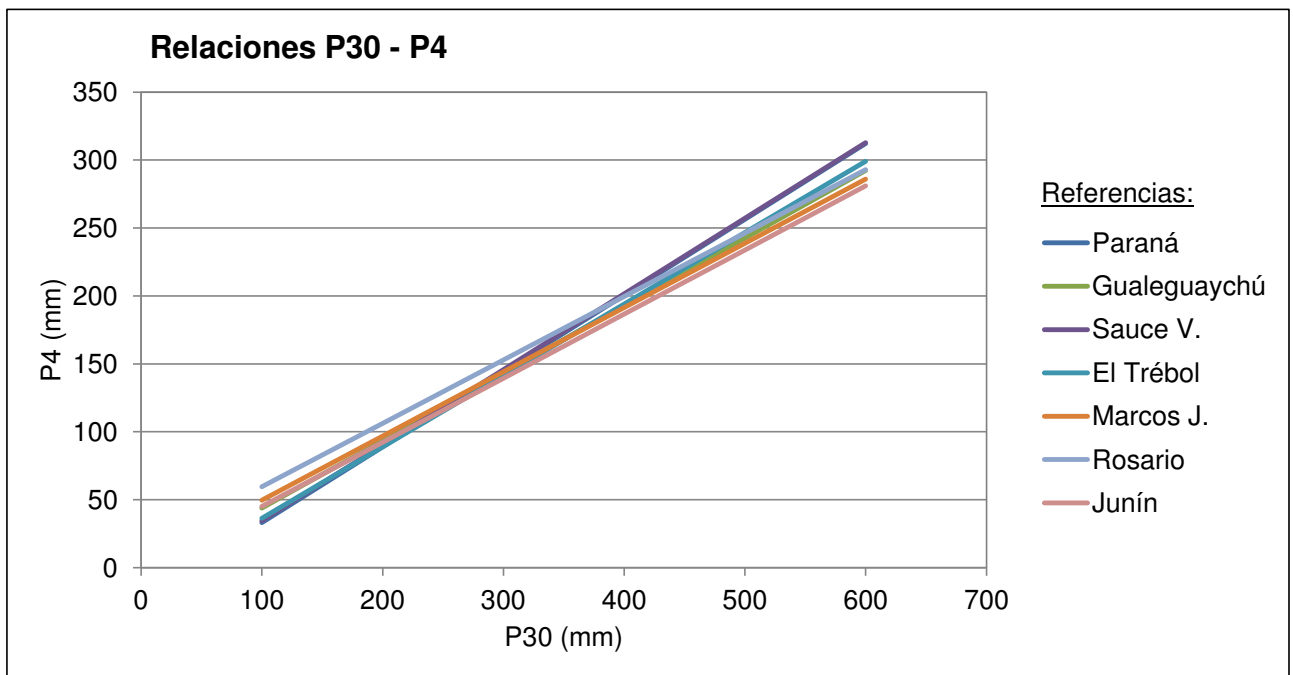


Figura 11. Curvas de regresión relación máximos de 30 días y 4 días. Ajuste lineal.

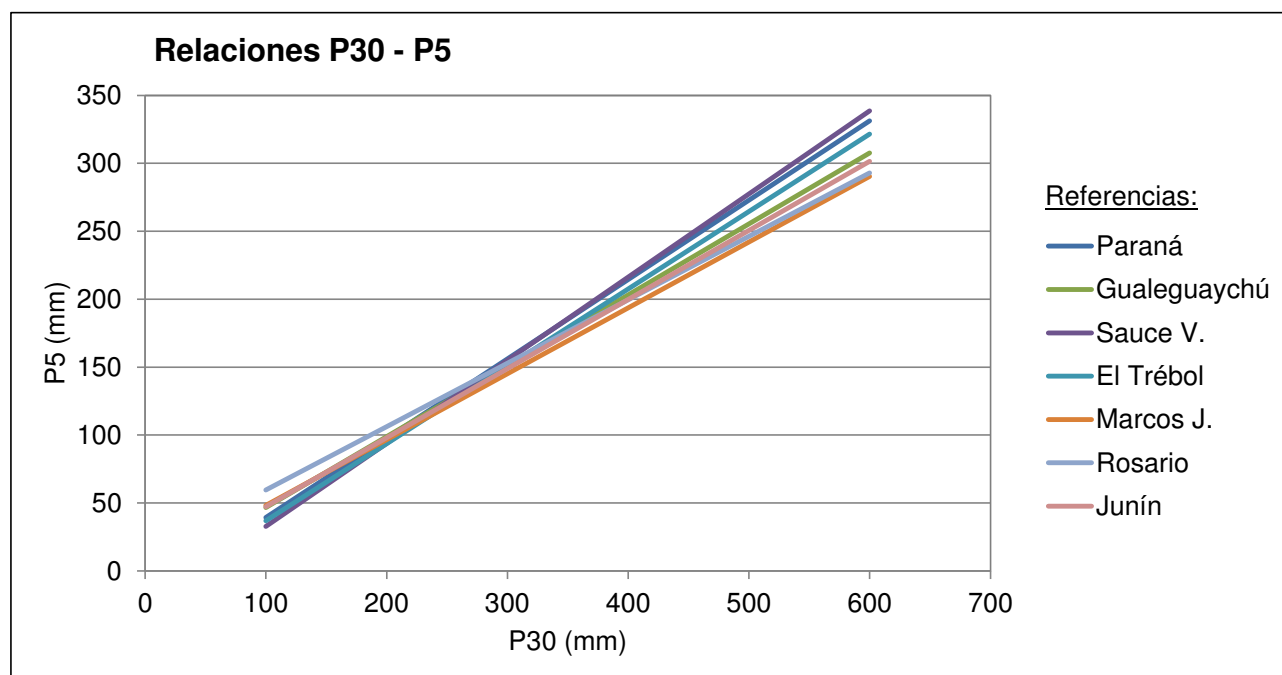


Figura 12. Curvas de regresión relación máximos de 30 días y 5 días. Ajuste lineal.

Al igual que lo mencionado para los parámetros de la Tabla 5, las gráficas presentadas tienen validez para precipitaciones de 30 días que se encuentran dentro del rango de 100 mm a 600 mm.

MÁXIMOS ACUMULADOS RELACIONADOS

A los efectos de buscar un mejor ajuste se analizó la correlación entre los máximos de 30 días y los acumulados de 1 a 5 días que se encuentran comprendidos dentro de esos 30 días para cada año. Se tomó la estación de Rosario como testigo por ser la serie cuyo periodo de registros es el más extenso.

Teniendo en cuenta el grado de correlación entre los diferentes pares de variables en términos de R que se muestra en la Tabla 6 se puede observar que no cambia sustancialmente. Quedando los valores dentro del rango que corresponde a una correlación moderada para ambos casos analizados.

Tabla 6. Comparación máximos relacionados – sin relacionar según indicador R.

		R				
		P1 - P30	P2 - P30	P3 - P30	P4 - P30	P5 - P30
Lineal	Máximos Relacionados	0.6020	0.6608	0.6724	0.7018	0.7352
	Máximos sin Relacionar	0.5801	0.6470	0.6465	0.6743	0.7168
Potencial	Máximos Relacionados	0.6380	0.6576	0.6583	0.6799	0.7179
	Máximos sin Relacionar	0.6267	0.6498	0.6271	0.6505	0.6957

Al no haber mejoras significativas en el ajuste logrado se consideró no relevante dicho análisis, por lo cual en las demás estaciones no se llevó a cabo el mismo.

INTERVALOS DE CONFIANZA

Finalmente se analizaron los intervalos de confianza para el ajuste lineal, adoptando un nivel de significancia del 10%, con el objeto de determinar el entorno de variación del ajuste propuesto. (Ver figuras 13 a 17).

En las figuras siguientes se presentan los intervalos de confianza para los ajustes obtenidos en la estación Rosario y además se presentan a modo indicativo los semianchos promedio para cada relación.

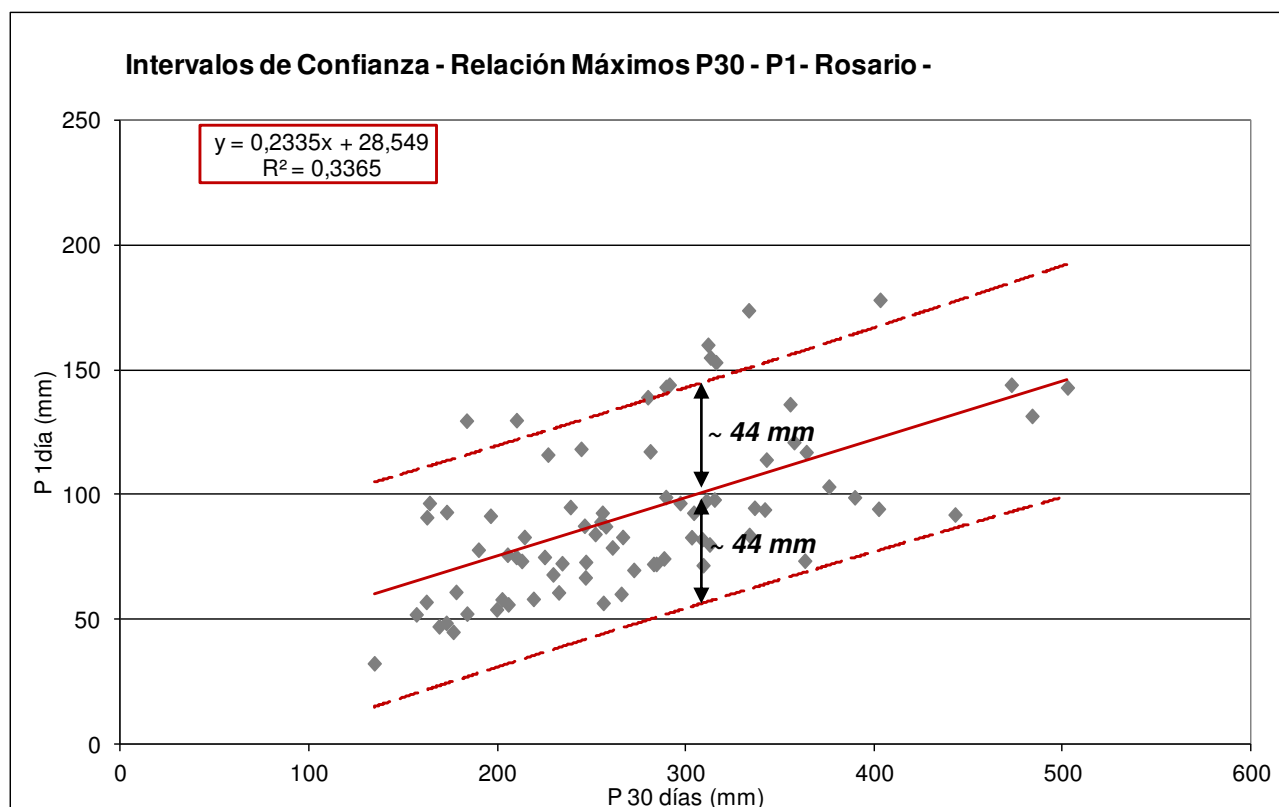


Figura 13. Intervalos de confianza para relación de máximos de 30 días y 1 día.

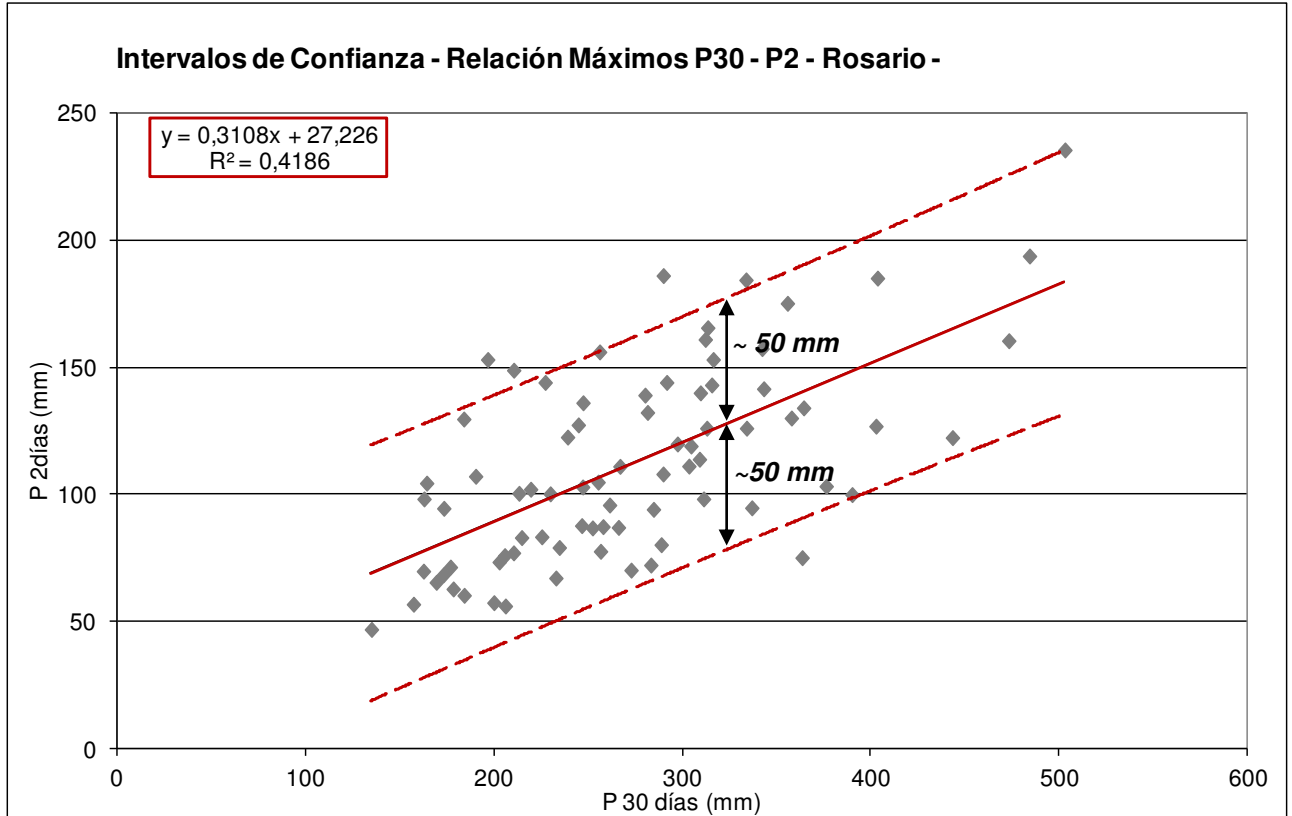


Figura 14. Intervalos de confianza para relación de máximos de 30 días y 2 días.

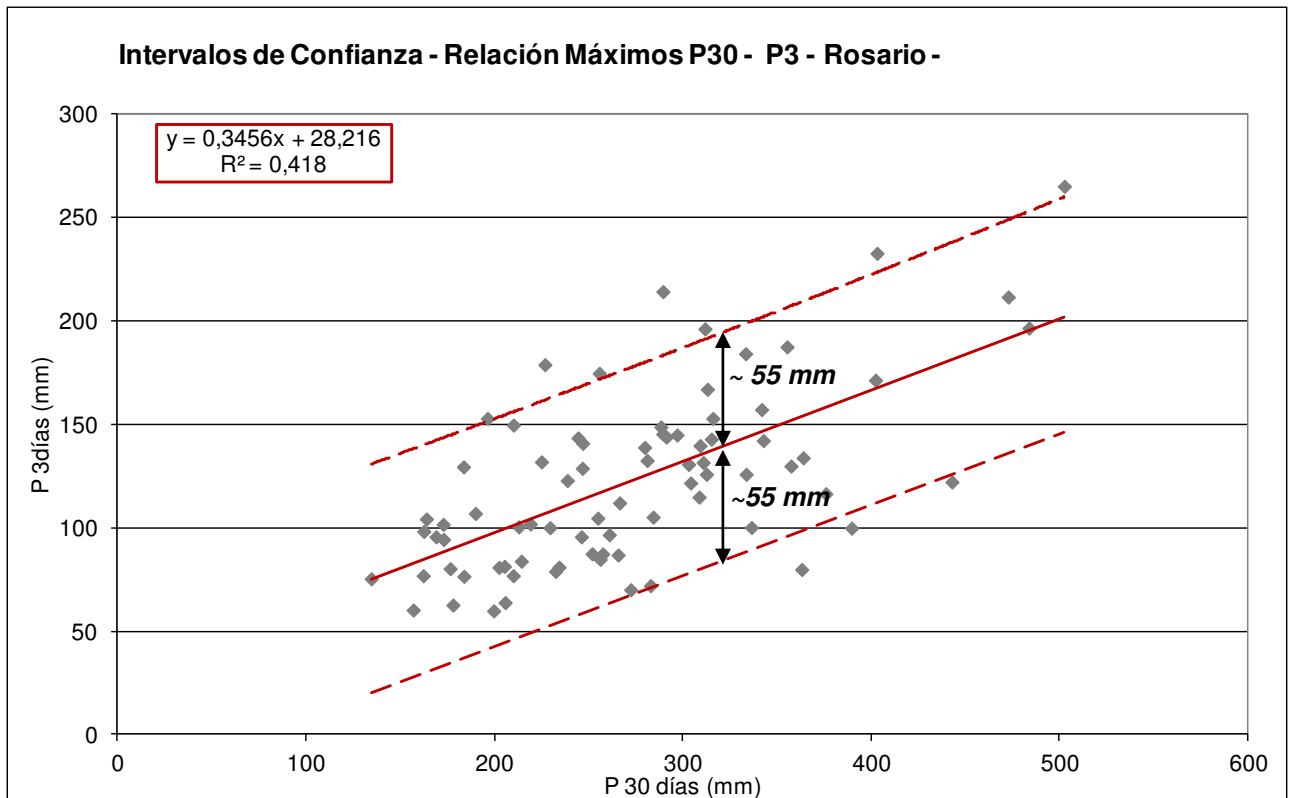


Figura 15. Intervalos de confianza para relación de máximos de 30 días y 3 días.

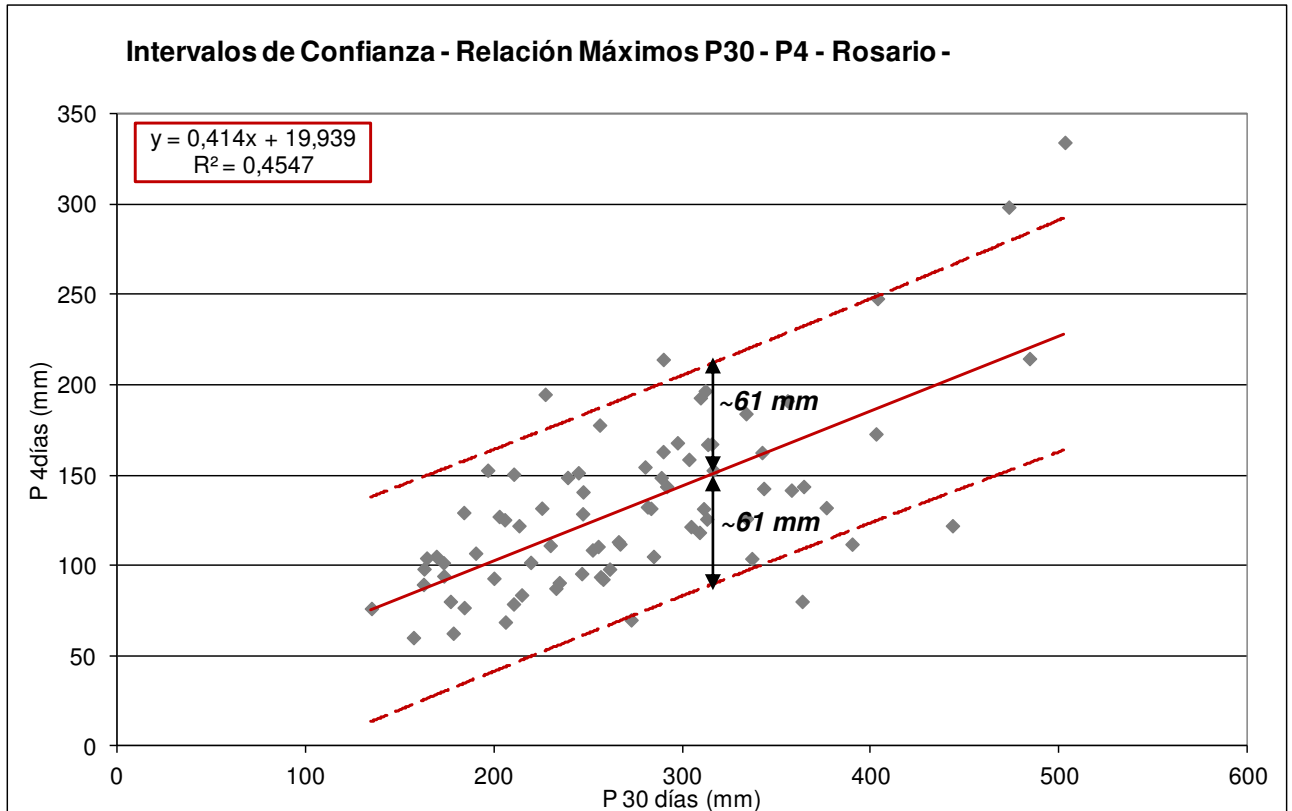


Figura 16. Intervalos de confianza para relación de máximos de 30 días y 4 días.

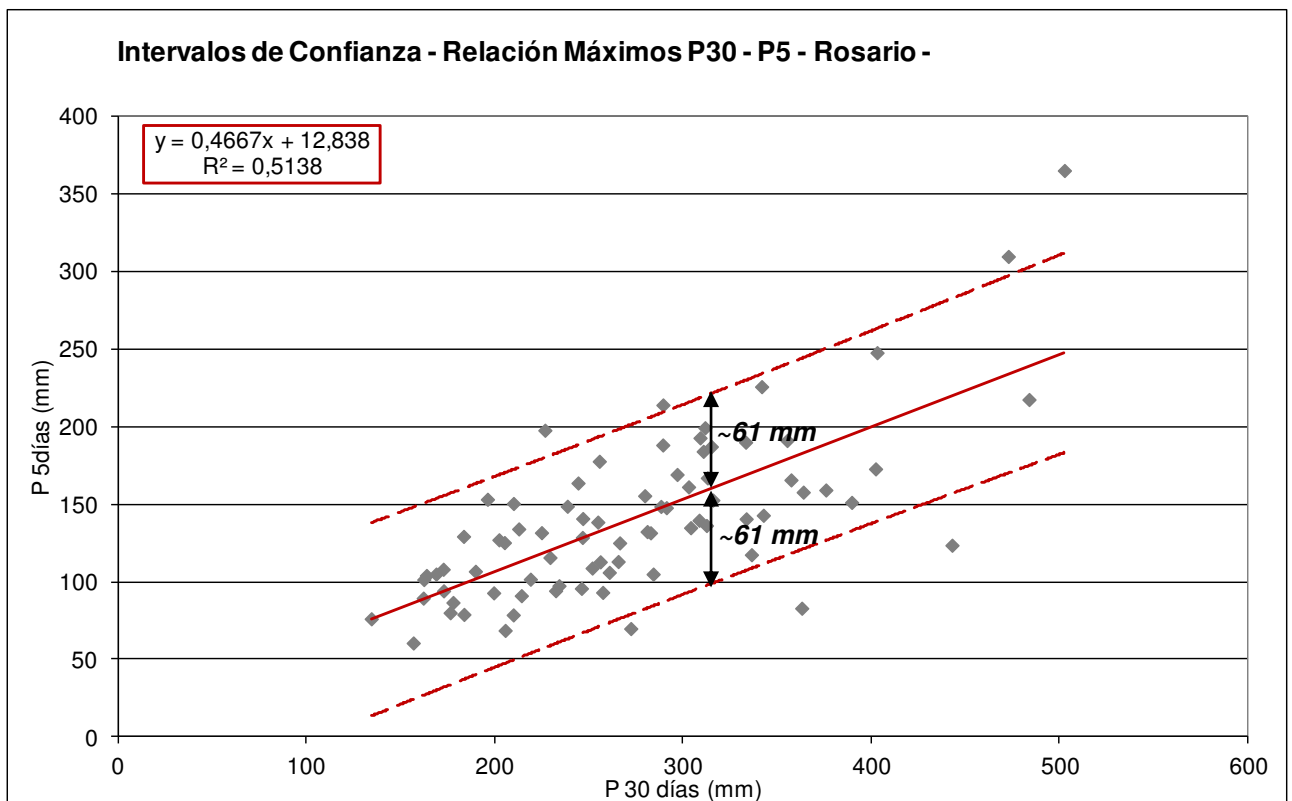


Figura 17. Intervalos de confianza para relación de máximos de 30 días y 5 días.

Se realizó el mismo procedimiento para todas las estaciones y se confeccionó una tabla resumen con los valores obtenidos. Los valores presentados en la tabla 7 son valores de semianchos promedio de intervalos de confianza estimados a modo de referencia.

Tabla 7. Semiancho promedio de intervalos de confianza.

Estación	Semiancho de intervalo de confianza (mm)				
	P30 - P1	P30 - P2	P30 - P3	P30 - P4	P30 - P5
Rosario	44	50	55	61	62
Paraná	59	64	66	65	67
Sauce Viejo	41	58	62	65	63
Marcos Juárez	37	38	39	46	46
Guauguaychú	41	57	56	60	63
Junín	56	61	60	61	58
El Trébol	46	58	69	64	64

Los valores que presenta la Tabla 7 expresan que el rango de resultados posibles es considerablemente amplio utilizando un nivel de significancia del 10%.

RELACIÓN ENTRE P30 Y PM (LLUVIA MENSUAL)

Para completar los pasos de cálculo necesarios para determinar las lluvias de 1 a 5 de duración teniendo solo disponibles lluvias mensuales fue necesario determinar la relación vincular entre P30 y PM (lluvia mensual). Dichas relaciones resultaron fuertemente lineales con un coeficiente de linealidad comprendido entre 1.13 y 1.17.

CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN

Se ha presentado una metodología para establecer relaciones entre láminas máximas mensuales y láminas máximas con duraciones entre 1 a 5 días.

Las relaciones analizadas fueron de tipo lineal y potencial. En términos de PBIAS los ajustes pueden calificarse como muy buenos, en tanto en términos del coeficiente de Pearson (R) los ajustes pueden definirse entre moderados y fuertes. En lo que respecta al coeficiente de NSE el ajuste puede considerarse débil para duraciones de 1 y 2 días y entre satisfactorio y bueno para duraciones de 3, 4 y 5 días .

El análisis de intervalos de confianza arroja regulares resultados, estableciéndose límites con semiámpplitudes elevadas.

Las relaciones no parecen evidenciar alguna tendencia en función de la ubicación espacial de las estaciones pluviométricas.

En general los mejores ajustes independientemente de cada evaluador, se han logrado para las relaciones entre lluvia de 30 días y 3 o más días. Estas duraciones donde se han establecido los mejores ajustes coinciden con aquellas duraciones críticas que son habitualmente necesarias en diseño hidrológico para mayorizar volúmenes y caudales de crecidas máximas en proyectos de obras estructurales y planificación de medidas no estructurales en diversas cuencas de esta región.

En sitios donde se cuente solamente con datos pluviométricos mensuales, las relaciones presentadas pueden resultar de utilidad, recomendándose su uso con especial precaución y teniendo en consideración los intervalos de confianza determinados.

BIBLIOGRAFÍA

DH-FCEIyA (Departamento de Hidráulica, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario) (2008). *Rehidrología y modelo de simulación a tiempo real en sistema de alerta hidrológico en las cuencas de los arroyos Ludueña y Saladillo*. Informe de avance I. Convenio FCEIA-MASPyMA. Rosario, Santa Fe.

Orsolini H., Zimmermann E. D. y Basile P. A. (2000). *Hidrología. Procesos y Métodos*. UNR Editora. ISBN 950-673-254-4.

Riccardi, G., Zimmermann, E., Basile, P., Stenta, H. y Scuderi, C., (2012). "Caracterización de Lluvias Máximas de 5 días de duración en la Pampa Húmeda". *Memorias del III Taller sobre Regionalización de Precipitaciones Máximas*, 159 – 180, Rosario, Santa Fe.

SMN (Servicio Meteorológico Nacional), (2012). "Lluvias diarias en las Estaciones Gualaguaychú, Junín, Marcos Juárez, Rosario Aero, Sauce Viejo y Paraná". Reporte electrónico de datos, Buenos Aires, Argentina.

Spiegel, M. R., Stephens, L. J., Pineda Ayala, L. E. y Valdés Ramírez, A. (2002). *Estadística*. Mc Graw-Hill. ISBN: 9701032713. México, D. F.

REGIONALIZACIÓN DE LÁMINAS DE LLUVIAS MÁXIMAS DIARIA Y PARÁMETROS ESTADÍSTICOS EN LAS PROVINCIAS DE SALTA Y JUJUY

M. Cecilia Botelli¹, Nicolás F. Guillén², Matías Lencinas², Carlos M. García^{2, 3}, Carlos G. Catalini⁴, Marcelo Chalabe¹, Diego Rincón¹

¹ Universidad Católica de Salta - Grupo de Investigación de Gabinete de Hidráulica e Instalaciones Sanitarias), Campo Castañares –Salta- República Argentina.

² CETA. Centro de Estudios y Tecnología del Agua- Universidad Nacional de Córdoba-Laboratorio de Hidráulica, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales., Universidad Nacional de Córdoba, Av. Filloy s/n, Ciudad Universitaria, Córdoba, Argentina.

³ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina

⁴ Universidad Católica de Córdoba - Grupo de Investigación de Estudios Hidrológicos en Cuencas Pobremente Aforadas (UCC -EHCPA) Camino a Alta Gracia km 7 ½, (X5016DHY), Córdoba República Argentina.

Mail de contacto: cgarcia2mjc@gmail.com

RESUMEN

En este trabajo se reportan los resultados de la predicción del valor de la lámina de lluvia diaria de diseño para las provincias de Salta y Jujuy, a través de un análisis de estadística inferencial y de regionalización. Para el análisis estadístico finalmente se seleccionaron registros de 60 estaciones pluviométricas que representan la región de estudio. A partir de esta información histórica se elaboraron las series de máximos diarios anuales. Luego, para todas las series elaboradas se verificaron las hipótesis estadísticas básicas (presencia de datos atípicos, independencia, estacionalidad y homogeneidad) requerida a una muestra para que tengan validez el análisis de estadística inferencial.

Se realizaron ajustes de 6 funciones de distribución de probabilidad para estimar los valores de máxima lamina de lluvia para los siguientes periodos de retorno, $T= 2, 5, 10, 20, 25, 50$ y 100 años, como así también los intervalos de confianza asociados a cada predicción. Se seleccionó la función de distribución Log Normal como óptima para este estudio y se cuantificó las diferencias relativas en la predicción debido a esta hipótesis. Los valores de lámina de lluvia diaria predichos se regionalizaron para la región de estudio mediante el uso de un Sistema de Información Geográfica (Idrisi Selva 17.00), el cual permite generar mapas digitalizados con una resolución espacial de 25 km^2 . Finalmente se evaluó los efectos de considerar valores de lluvia máxima diaria de distintos periodos de retorno predichos para las provincias limítrofes que cuentan con esa información (Santiago del Estero y Catamarca) como condiciones de borde durante la elaboración de los mapas digitalizados.

Palabras clave:

Lluvias Máximas Diarias, Sistemas de Información Geográfica, Provincias de Salta y Jujuy

INTRODUCCIÓN

El diseño hidrológico se define como la evaluación del impacto de los procesos hidrológicos y la estimación de valores de las variables relevantes para modificarlo. El diseño hidrológico se puede utilizar para mitigar amenazas hidrológicas proyectando medidas “estructurales”, tal es el caso de una represa para el control de crecientes, sistemas de control de excedentes pluviales en obras viales, entre otras, o bien, desarrollando medidas “no estructurales” como ser la determinación de áreas de riesgo, entre otros.

La escala de diseño hidrológico es el rango en magnitud de la variable de diseño dentro del cual se debe seleccionar un valor para determinar el flujo de entrada al sistema. Los factores determinantes en la selección de este valor para una obra civil, son el costo y la seguridad asociada. Sobredimensionar las obras es antieconómico, mientras que sub-dimensionar las mismas pueden ocasionar fallas con resultados catastróficos. La magnitud óptima para el diseño es aquella que equilibra criterios de costo y seguridad.

Generalmente al diseño hidrológico se lo utiliza para la estimación de la Creciente de Proyecto. Sin embargo la estimación de los caudales escurridos en la crecienta de proyecto está afectada por la insuficiencia estadística de los registros históricos de caudales, lo cual lleva a evaluar indirectamente estos caudales mediante el uso de modelos de transformación lluvia – caudal (P-Q), los cuales son alimentados por eventos hipotéticos críticos (lluvias de diseño). Si bien tienen otros componentes, estas lluvias de diseño parten de un vínculo esencial entre los rasgos característicos de la precipitación: la función intensidad-duración-Recurrencia (i-d-T). Las relaciones i-d-T y el patrón de distribución temporal de las lluvias, requeridos para estimar Crecientes de Proyecto, solo se pueden extraer de extensos registros de alta frecuencia, normalmente fajas pluviográficas. Aun reemplazando caudal por intensidad de lluvia se continúa teniendo un problema, ya que las series pluviográficas largas también son escasas, aunque menos que las hidrométricas. En cambio, es habitual otro dato de lluvia provisto por pluviómetros: la lámina de lluvia diaria. De esta manera, los técnicos y proyectistas pueden proceder a la estimación mediante un análisis de estadística inferencial de las láminas de lluvias máximas diarias asociadas a diferentes periodos de retorno, a partir de las series de datos pluviométricos registrados en diversos puntos de la cuenca.

En este trabajo lo que se hizo fue estimar la lámina de lluvia máxima diaria asociada a diferentes periodos de retorno en las provincias de Salta y Jujuy. A partir de ella, puede calcularse la lámina máxima asociada a una duración diferente (utilizando un coeficiente de reducción o maximización) y a partir de ella si calcular mediante un modelo de transformación P-Q el caudal de diseño.

OBJETIVOS

El objetivo general del presente trabajo es la elaboración de mapas digitales de lluvias máximas diarias asociados a recurrencias de 2, 5, 10, 20, 25, 50 y 100 años para las provincias de Salta y Jujuy. A continuación se detalla de manera resumida la metodología empleada con la finalidad de cumplimentar el objetivo citado. El proceso se puede resumir de la siguiente manera:

1. Recopilación y pre-procesamiento de series pluviométricas de las distintas estaciones existentes en las provincias de Salta y Jujuy.
2. Ubicación espacial de las distintas estaciones pluviométricas preseleccionadas.
3. Determinación del año hidrológico.
4. Generación de la serie hidrológica de máximas lluvias diarias.

5. Verificación de hipótesis estadísticas de las series históricas de máximas lluvias diarias seleccionadas tales como independencia, estacionalidad y homogeneidad, además de la detección de datos atípicos en las series de precipitación.
6. Determinación de los parámetros provenientes del análisis de estadística descriptiva (media y desvío estándar).
7. Análisis de estadística inferencial mediante el ajuste de distribución de probabilidad.
8. Interpolación de la información puntual, generación de grillas de análisis mediante el uso de un Sistema de Información Geográfica (Idrisi Selva 17.00).
9. Generación de mapas tendenciales digitales de máximas láminas de lluvia diaria de distintos periodos de retorno para las provincias de Salta y Jujuy.

A continuación se describe en detalle cada actividad:

1. Recopilación y pre-procesamiento de series pluviométricas de las distintas estaciones existentes en las provincias de Salta y Jujuy.

Se recopiló información de la lámina de lluvia diaria precipitada, la misma se obtuvo de las estaciones pluviométricas instaladas en las provincias de Salta y Jujuy. Para la obtención de datos se recurrió a diferentes fuentes como:

- Páginas web, en su mayoría pertenecientes a entidades gubernamentales, donde se encuentran datos históricos de lluvia diaria:
 - <http://bdhi.hidricosargentina.gov.ar/sitioweb/frmFiltro.aspx>
 - <http://dev.siiia.gov.ar/series>
 - <http://siga2.inta.gov.ar/en/datoshistoricos/>
 - <http://www.tutiempo.net/clima/Argentina/AR.html>
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA).
- Secretaria de Recursos Hídricos.

En total se analizaron 104 estaciones pluviométricas dentro del territorio. Luego se realizó una preselección, de acuerdo a cada longitud de serie de las estaciones para continuar con el análisis. El criterio de Longitud de Serie consistió, en un principio, en fijar veinte años como longitud mínima de las series anuales de lluvias máximas diarias a analizar. Este condicionante, implica rechazar puestos pluviométricos disponibles, por lo que se adopta como criterio final la aceptación de todas las estaciones con una longitud de serie mayor o igual a catorce años. Esta longitud mínima coincide con lo definido para estudios similares realizados en otras provincias de Argentina.

La Tabla 1 y la Figura 1 permiten visualizar la cantidad de estaciones que pertenecen a cada intervalo de longitud de serie, es decir, entre uno y catorce años, mayores o igual a catorce años y mayor o igual de veinte. Así, por otra parte, existen 50 estaciones con más de catorce años de registro, conformando el 32% del total. Este porcentaje de estaciones son las que continuaron las verificaciones subsiguientes.

Tabla 1: Frecuencias de las estaciones pluviométricas en función de su longitud de serie, para la provincia de Salta y Jujuy.

Longitud de serie		
Estaciones con datos	104	Porcentaje
1 < Longitud de serie < 14	37	36%
Longitud de serie >= 14	67	64%
Longitud de serie >= 20	51	49%

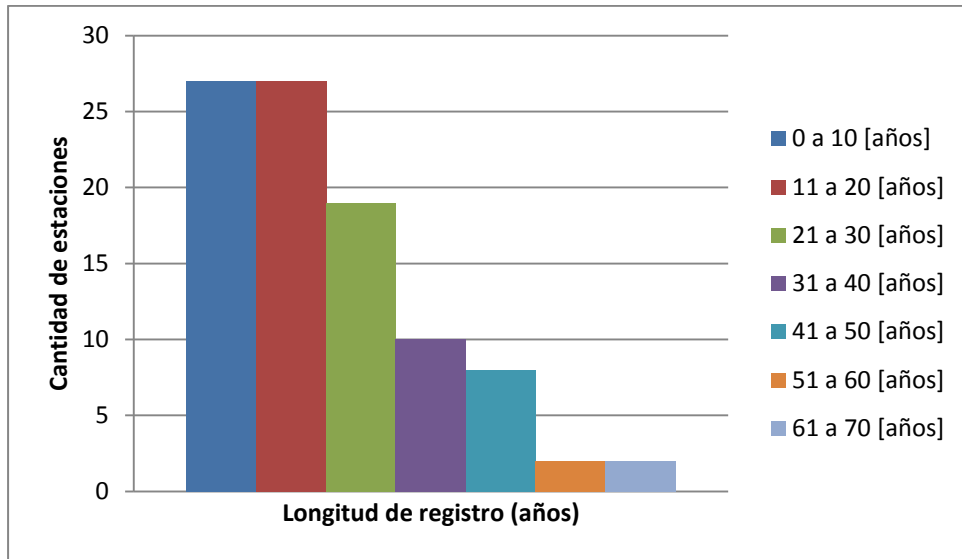


Figura 1: Longitud de registro de las estaciones pluviométricas encontradas, para la provincias de Salta y Jujuy.

2. Ubicación espacial de las distintas estaciones pluviométricas y sus parámetros estadísticos.

En la Figura 2 puede apreciarse la disposición espacial de las mismas pre-seleccionadas. Puede observarse una mayor concentración en la zona centro este. En esta instancia del desarrollo del trabajo se incluyeron muy pocas estaciones en el sector este y oeste de Salta y Jujuy.

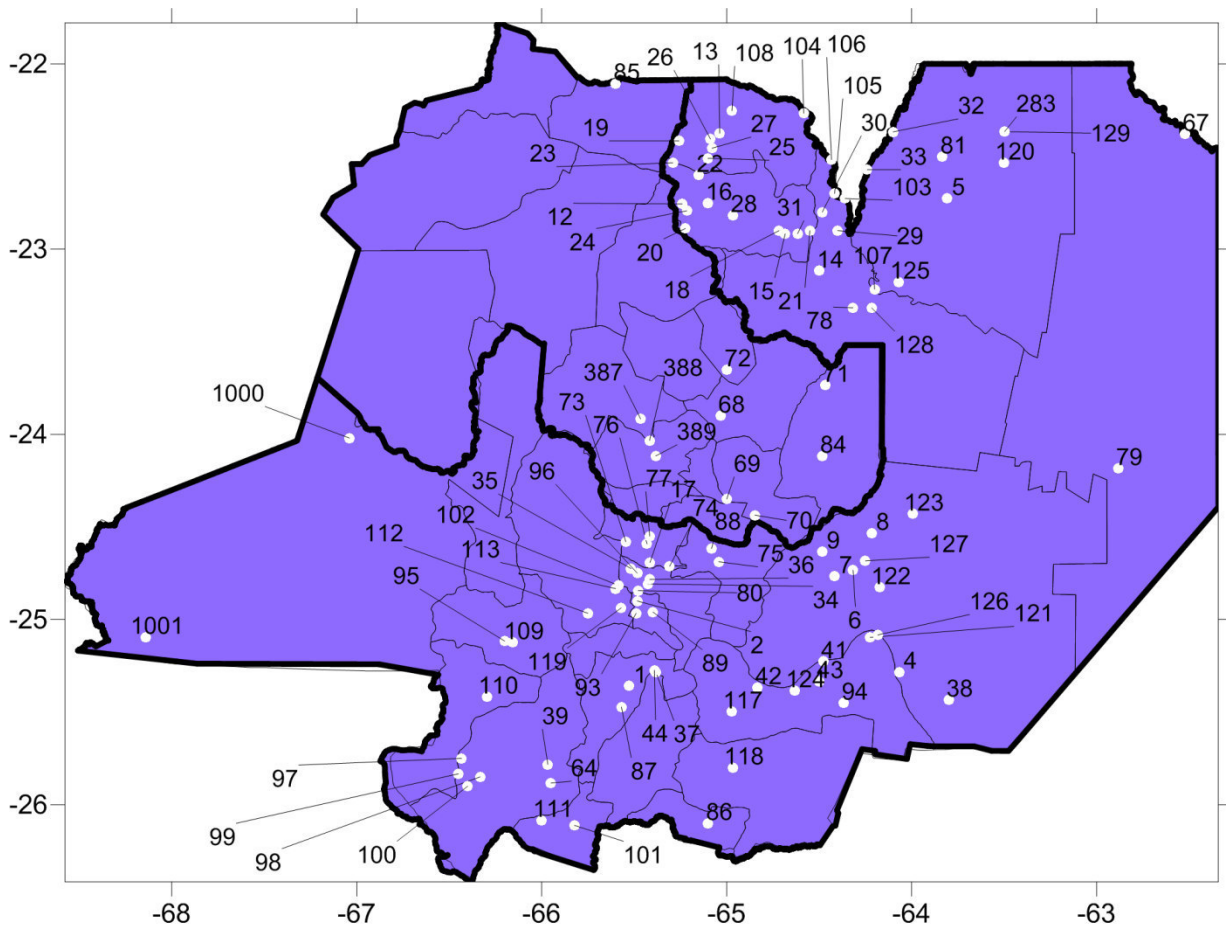


Figura 2: Disposición espacial de las estaciones pluviométricas encontradas.

3. Determinación del año hidrológico para la región en estudio.

Para el análisis y procesamiento estadístico de las lluvias es recomendable dividir las series históricas en "años hidrológicos". Este concepto, se define como el período anual que no fracciona el ciclo estacional de lluvia, pudiendo ser distinto al año calendario. Se observó, para los registros encontrados, que las máximas lluvias se daban entre los meses de Octubre a Abril, por ende, para el análisis se optó por determinar cómo año hidrológico al periodo desarrollado de Julio a Junio del año (calendario) siguiente.

4. Generación de la serie hidrológica de lámina de lluvia máximas diarias.

Luego de fijar el año hidrológico se elaboraron la serie hidrológica de máximos anuales de lámina de lluvias diarias. Se pudo determinar que los máximos de lluvia máxima diaria ocurrieron generalmente entre los meses de Octubre y Abril, inclusive. Por ello cuando no se contaba con datos en algunos de esos meses, se prescinde de ese año hidrológico, dado que en esos meses es probable que se dé la precipitación máxima anual, lo que podría ocasionar subestimaciones en los análisis estadísticos que se realizarán sobre ellas.

5. Verificación de hipótesis estadísticas de las series históricas de máximas anuales de lluvia diaria.

5.1 Detección de presencia de datos Atípicos.

Las series de máximos anuales de lluvia diaria de las 67 estaciones pluviométricas preseleccionadas que tenían una longitud de serie acorde fueron sometidas a la detección de datos atípicos. Si las series tenían un valor atípico, este se removía pero si tenía más de un valor atípico toda la serie era descartada. De las mismas, (Ver tabla 2) solo la estación El Ceibal ha evidenciado más de un valor atípico y fue descartada. Dicha eliminación solo representa el 1% de las estaciones que tenían una longitud de serie acorde.

Estaciones Pluviométricas	Longitud de serie	Latitud	Longitud
El Ceibal	16	-64,3166	-24,7333

Tabla 2: Estación pluviométrica con más de dos Datos Atípicos.

5.2 Prueba de Independencia.

Las 66 estaciones que verificaron la hipótesis anterior fueron sometidas a la prueba de Independencia (Wald-Wolfowitz). En la Tabla 3 se muestra la estación depurada. Del total de estaciones analizadas una estación no pasó la prueba, lo cual constituye el 2% del total de estaciones que verificaron datos atípicos.

Estaciones Pluviométricas	Longitud de serie	Latitud	Longitud
Tuc-Tuca	31	-65,2575	-22,4155

Tabla 3: Estación Pluviométrica que no verificó la Prueba de Independencia de sus valores máximos diarios.

5.3 Prueba de Estacionalidad.

Las estaciones que verificaron las hipótesis anteriores fueron sometidas a la Prueba de Estacionalidad (Kendall). Las 3 estaciones que se encuentran en la Tabla 4 han rechazado esta prueba, lo cual constituye el 5% del total de estaciones que verificaron independencia.

Estaciones Pluviométricas	Longitud de serie	Latitud	Longitud
Nazareno	30	-65,1014	-22,5094
Poscaya	29	-65,0797	-22,4550
Peña Alta	21	-65,0000	-23,6500

Tabla 4: Estaciones Pluviométricas que rechazaron la Prueba de Estacionalidad.

5.4 Prueba de Homogeneidad a Escala Anual.

Las 62 estaciones restantes fueron sometidas a la Prueba de Homogeneidad (Wilcoxon) de sus registros históricos. La estación que se muestra en la Tabla 5 no paso la prueba siendo el 2% del total de estaciones que pasaron la prueba de Estacionalidad.

Estaciones Pluviométricas	Longitud de serie	Latitud	Longitud
Peñas Bayas	24	-65,7500	-24,9667

Tabla 5: Estaciones Pluviométricas que rechazaron la Prueba de Homogeneidad.

Finalmente se decidió descartar la estación “129 - Jujuy Aeródromo” debido a que esta presentaba problemas en los registros de lluvia, como ser 6 datos de lluvias que superan los 350 mm, lo cual se considera un registro excesivo. Debido a esta anomalía se decidió prescindir de la estación en cuestión (Ver Tabla 6). Como hay varios datos dudosos (con registro excesivo), estos no son detectados por el test que detecta los datos atípicos. Las estaciones que verificaron las hipótesis estadísticas fueron analizadas estadísticamente y los resultados de este análisis se detallan a continuación.

Estaciones Pluviométricas	Longitud de serie	Latitud	Longitud
Jujuy Aeródromo	37	-63,4980	-22,3660

Tabla 6: Estación que mostraba datos dudosos.

De esta manera se concluye que de las 104 estaciones pluviométricas de las cuales se partió este trabajo, 60 pasaron las pruebas representando estas el 58% del total. En la Figura 3 se puede observar la distribución espacial de las estaciones que pasaron las pruebas y se observa una vacancia de datos en la zona oeste (Puna).

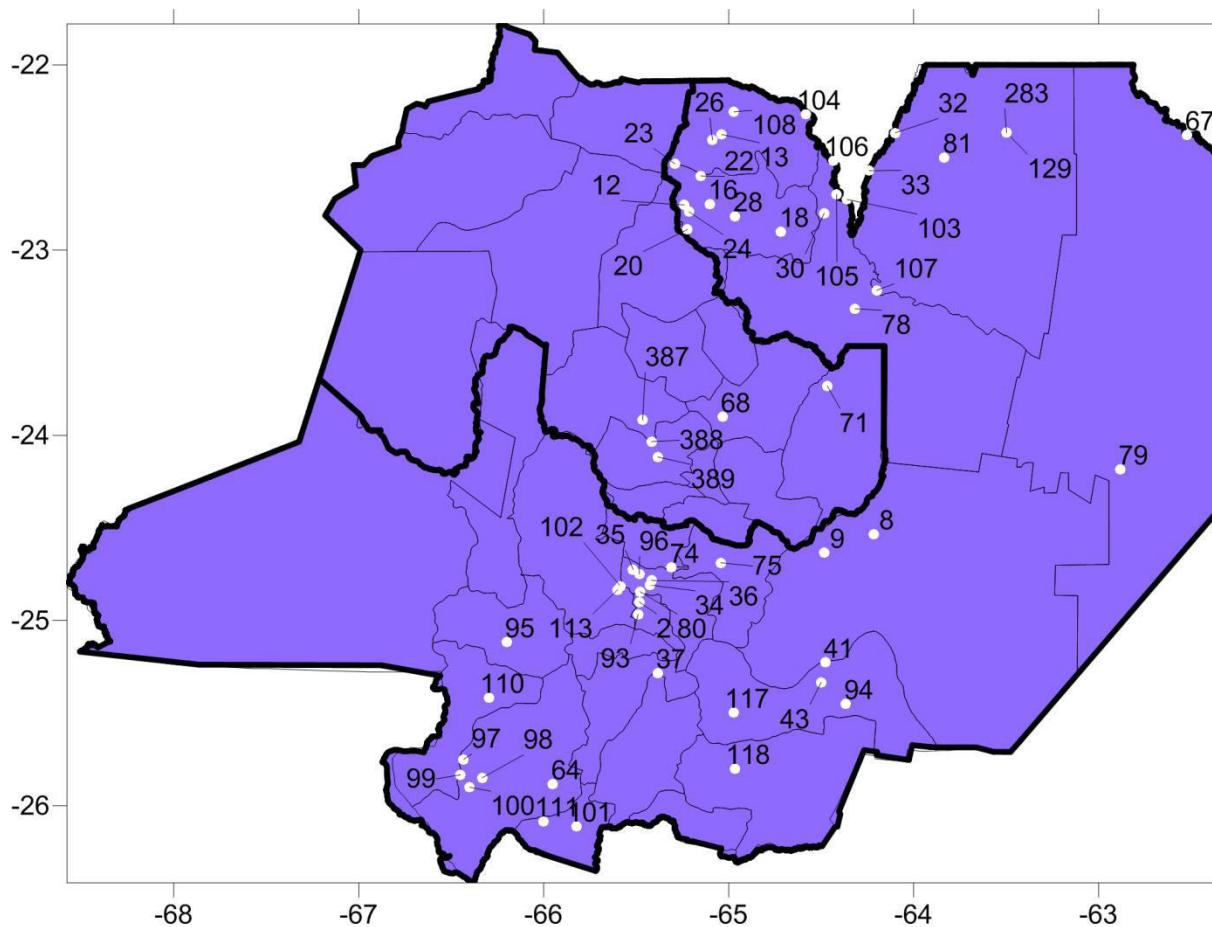


Figura 3: Estaciones finalmente seleccionadas.

6. Análisis de estadística descriptiva

En la Tabla 4 se presenta una tabla resumen con los datos estadísticos más importantes de las series anuales de máximos de lluvia diaria de las estaciones finalmente seleccionadas: Valor máximo observado en la serie, promedio aritmético y desvío estándar para las series. Además, en la misma se describe su nombre y código interno.

Tabla 4: Parámetros de estadística descriptiva de las series anuales de máximos de lluvia diaria de las estaciones finalmente seleccionadas en las provincias de Salta y Jujuy.

Codigo Interno	Nombre de la estación	Máximo	Media	Desvío
2	INTA - Cerrillos	153,5	68,83	23,04
8	Dorado - San Felipe - Sombrero	167	94,63	29,15
9	Seco - San Fernando	138,4	93,41	22,59
12	San Isidro	45	30,60	7,09
13	Bermejo - Trigo Huayco	57	38,96	8,81
16	Iruya - Las Higueras	55	25,89	9,75
18	Iruya - San Jose	214	119,77	31,28
20	Iruya - Colanzuli - Salta	34,5	22,71	4,54
22	Iruya - El Molino - Salta	50	29,20	7,88
23	Iruya - El Pabellón - Salta	48	29,46	5,13
24	Iruya - Iruya - Salta	42	26,78	6,34
26	Iruya - Paltorco - Salta	70,5	35,90	11,11
28	Iruya - San Antonio - Salta	102,5	55,61	21,56
30	Pescado - Cuatro Cedros	176,5	110,84	28,41
32	Tarija - Astilleros	185	113,25	34,08
33	Tarija - San Telmo	204,3	120,42	33,80
34	Arias - Desvio	135,2	78,95	23,26
35	Arias - Filtro	144	89,75	24,57
36	Arias - Oficina	127	74,53	21,40
37	Arias - San Gabriel	123	56,85	17,80
41	Juramento - El Tunal	206,2	80,66	25,29
43	Medina - Desembocadura Pasaje	177,2	90,31	29,22
64	San Carlos	26	19,39	2,57
67	Pikomayo - La Paz	239	92,53	33,35
68	Candelaria - Arrayanal	137,7	91,23	19,94
71	San Francisco - Caimancito	174,6	96,07	29,85
74	Mojotoro - El Angosto	149	79,23	37,13
75	Mojotoro - Güemes	114	25,83	27,89
78	Orán	203,6	102,76	34,03
79	Rivadavia	116,6	67,65	19,23
80	Salta Capital	136	73,03	22,06
81	Tartagal	179	104,21	31,46
93	La Merced	140	65,66	18,92
94	Colonia Santa Rosa	155,6	87,67	24,76
95	Cachi	47	26,06	9,79
96	Las Costas- salta capital	176,9	74,65	27,94
97	PUCARA, PUCARA	45	22,34	6,40
98	PUCARA-EL ANGOSTO	43,6	19,85	8,12
99	PUCARA-GUASAMAYO	37	23,69	7,27
100	PUCARA-VALLECITO	28	18,53	4,06
101	DE LAS CONCHAS - LA PUNILLA	37	20,85	8,47
102	ARENALES-POTRERO DE DIAZ	130	80,04	14,84
103	BERMEJO - AGUAS BLANCAS	225,5	104,34	29,45
104	BERMEJO-ALARACHE	226,4	132,75	30,07
105	BERMEJO-ARRASAYAL	277,8	141,75	51,67
106	BERMEJO - BALAPUCA	250	125,72	39,67
107	Bermejo - Pozo Sarmiento	199,6	96,64	29,32
108	BERMEJO - SANTA VICTORIA OESTE	65	37,86	8,25
110	CALCHAQUI-LOS MOLINOS	56	22,74	9,14
111	CHUSCHA-SAN LUIS	278,8	95,60	31,34
113	TORO Y BLANCO-CAMPO QUIJANO	100	73,18	12,64
117	METÁN (municipalidad)	131	87,90	18,04
118	Rosario de la Frontera	125	82,27	23,71
283	Campamento Vespucio	257,3	98,13	68,54
387	Volcan	88	30,73	17,92
388	Leon	125	59,44	23,89
389	Yala	155	64,33	32,77

7. Análisis de estadística inferencial.

En primer lugar, se determinaron las probabilidades empíricas de cada dato de lluvia diaria máxima anual observado, utilizando la Ecuación de Weibull en cada estación pluviométrica.

Luego, dichos datos se ajustaron a las 6 funciones de distribución de probabilidad teóricas siguientes:

- GEV (Método de Máxima Verosimilitud).
- Gumbel (Método de Máxima Verosimilitud).
- Log. Normal (Método de Máxima Verosimilitud).
- GEV (Método de Momentos).
- Gumbel (Método de Momentos).
- Log Pearson tipo III (Método de Momentos).

Debido a que este trabajo busca extender un análisis de regionalización de lluvias máximas diarias realizado en otras regiones de Argentina (Audagna, 2014; Belli et al., 2012; Caamaño Nelli y Dasso, 2003; Catalini et al., 2010; Catalini et al., 2012; y Lencinas, 2014), es que se adopta la misma función de distribución adoptada en esos estudios: Log Normal con parámetros ajustados por el método de Máxima Verosimilitud para representar las muestras de valores de lluvias diarias máximas anuales. Se analiza a continuación la máxima diferencia en porcentaje de los valores de la lámina de lluvia para 100 años de periodo de retorno asociadas a las distintas funciones de distribución con respecto a la "Log Normal". Se puede observar en la Figura 4 que la máxima diferencia de los valores estimados con otras funciones de distribución con respecto a la Log Normal disminuye a medida que aumenta la longitud de registro.

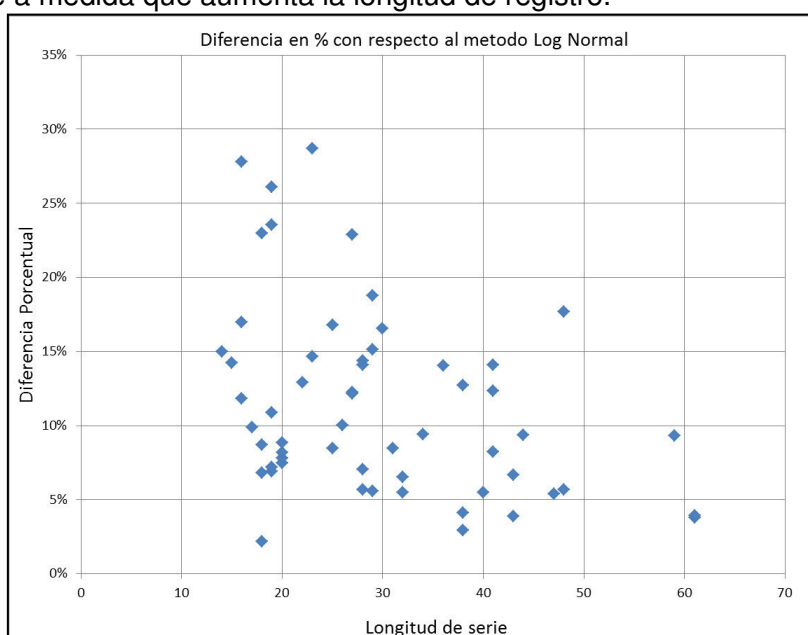


Figura 4: Evolución de la máxima diferencia porcentual entre los valores estimados con la distribución LogNormal y las otras funciones ensayadas a medida que aumenta la longitud de la serie, para la provincia de Salta y Jujuy.

Para analizar la importancia relativa de la selección de la función de distribución óptima se realiza un análisis para 100 años de periodo de retorno. Se elige este valor (y no los asociados a otros periodos de retorno) por ser el que más diferencia muestra en relación a los demás. En este análisis se compara la diferencia porcentual mostrada en la Figura 4 con un valor denominado "Incertidumbre del método Lognormal" representativo del tamaño de los intervalos de confianza calculado como la diferencia relativa (límite superior – valor medio) / valor medio. En la Figura 5 se puede ver el análisis realizado. Así se verifica que todas las funciones de distribución se hallan dentro del intervalo de confianza de la función Lognormal.

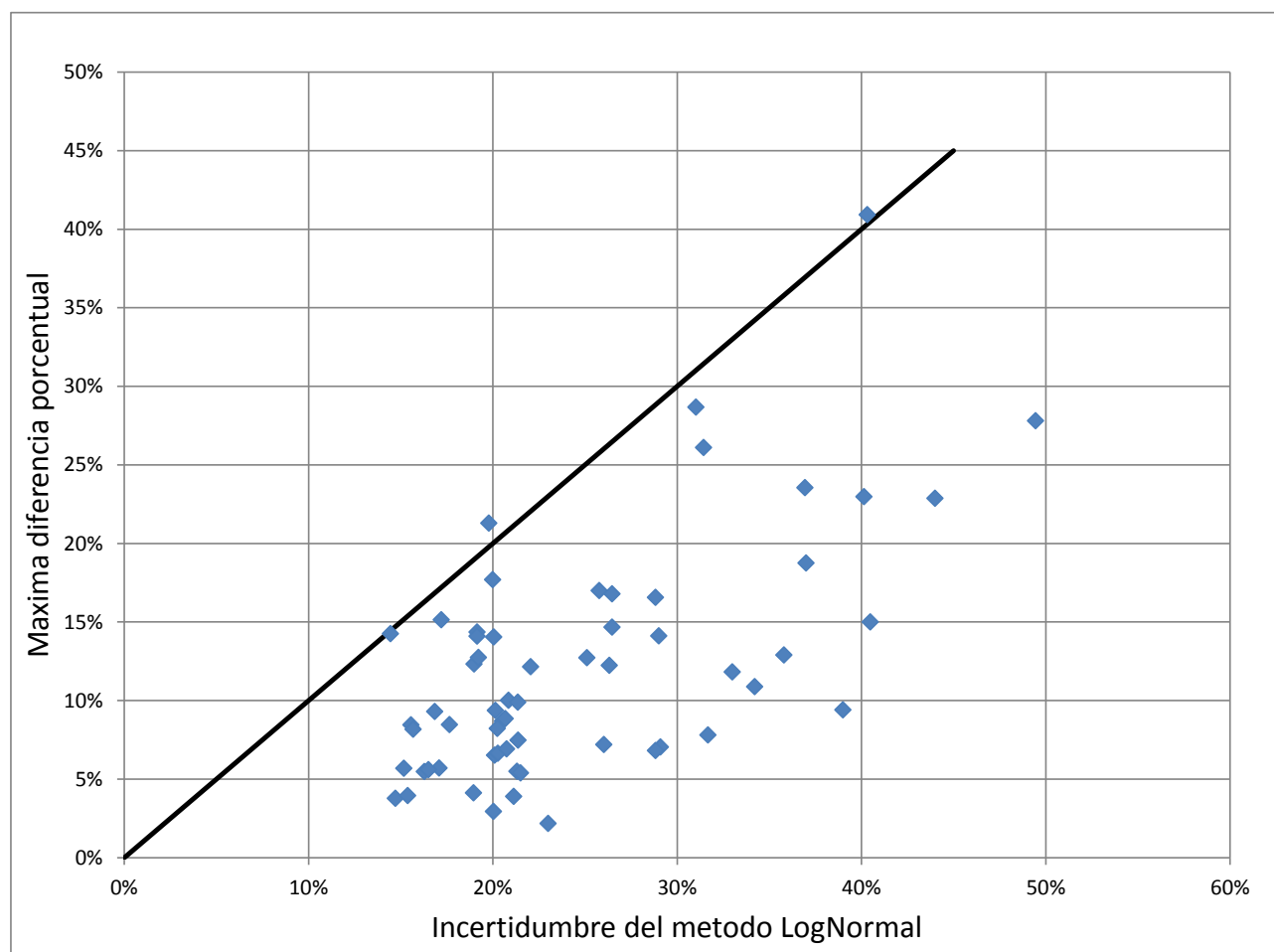


Figura 5: Contraste entre de la máxima diferencia porcentual observada entre los valores estimados con la distribución LogNormal (denominada Máxima diferencia porcentual) y la "Incertidumbre del método Lognormal" representativo del tamaño de los intervalos de confianza calculado como la diferencia relativa $(\text{límite superior} - \text{valor medio}) / \text{valor medio}$.

8. Interpolación de la información puntual utilizando SIG

Con los valores de lámina de lluvia estimados para los distintos periodos de retorno en cada una de las estaciones pluviométricas se utilizaron técnicas de análisis espacial para poder interpolar la información puntual con el objeto de generar grillas de información pluviométrica.

En este proceso se utilizó un Sistema de Información Geográfica (SIG), el cual es definido como un sistema asistido por computadora para la adquisición, almacenamiento, procesamiento, análisis y visualización de datos geográficos. En la actualidad, se encuentran disponibles una gran variedad de herramientas y paquetes computacionales para asistir estas tareas. El paquete computacional elegido fue el Idrisi Selva versión 17.00, el cual permite generar un archivo vectorial o de tipo raster georreferenciado. Utilizando esta herramienta se realizó la interpolación espacial de los valores de lámina de lluvia estimados para los distintos periodos de retorno a través del método de Kriging. Específicamente este método permite generar archivos raster a partir de la totalidad de los archivos vectoriales anteriormente creados con la información de lluvia máxima diaria estimada para cada localización. La figura 6 muestra el Raster interpolado por el método Kriging para la precipitación diaria media máxima anual estimada para un período de retorno de dos años [en mm].

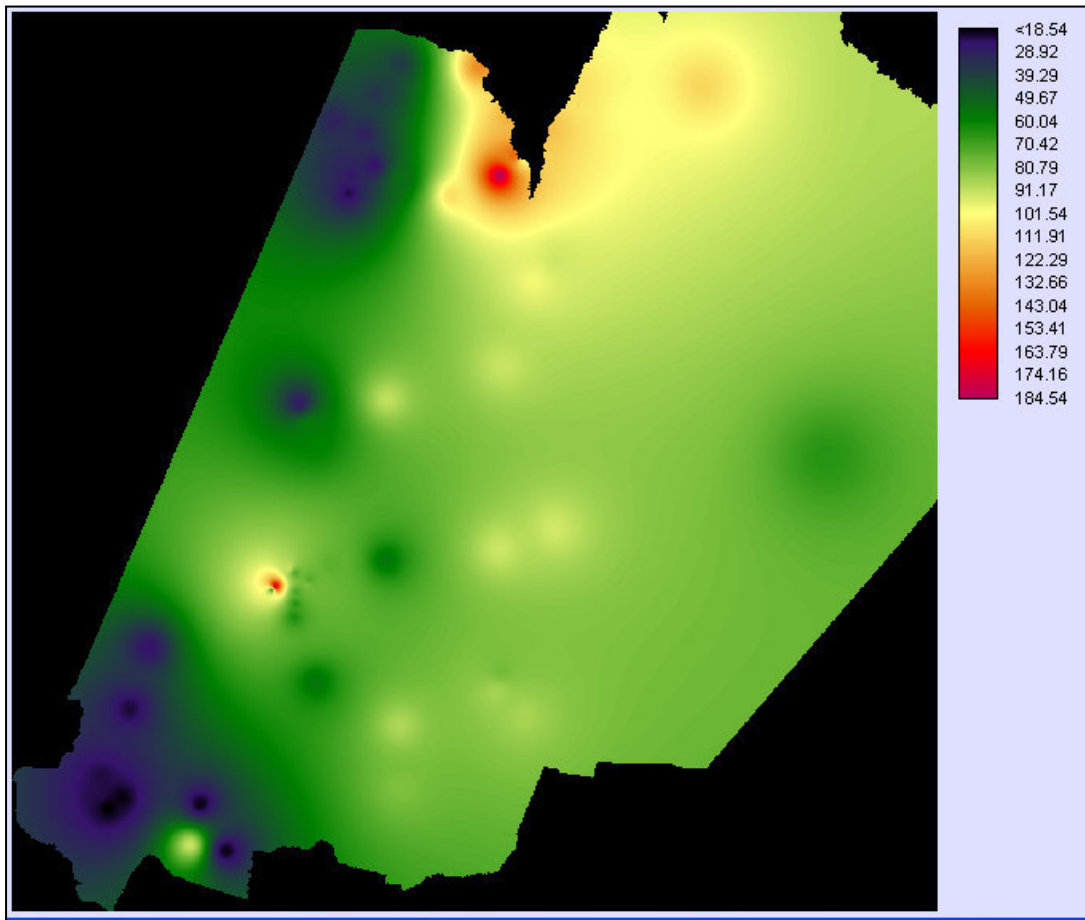


Figura 6: Raster interpolado por el método Kriging para la Precipitación media máxima estimada para un período de retorno de dos años [en mm].

9. Generación de mapas tendencias digitales de máximas láminas de lluvia diaria de distintos periodos de retorno para las provincias de Salta y Jujuy.

En base a las interpolaciones obtenidas por el método de Kriging de los valores medios de precipitación diaria para distintas recurrencias, se generó una imagen de superficie tendencial que suaviza las variaciones locales observadas. En las Figuras 7 a 12 se muestran los mapas de lluvia diaria máxima anual asociados a los diferentes períodos de retorno analizados.

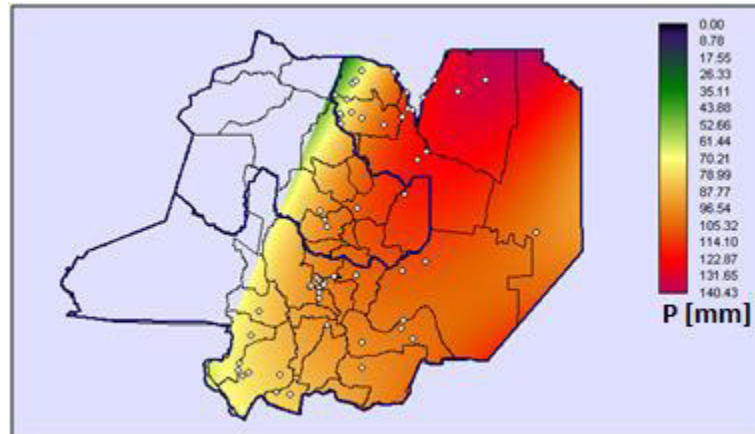


Figura 7: Mapa de lluvias máximas anuales para Periodo de retorno $T= 2$ años [en mm].

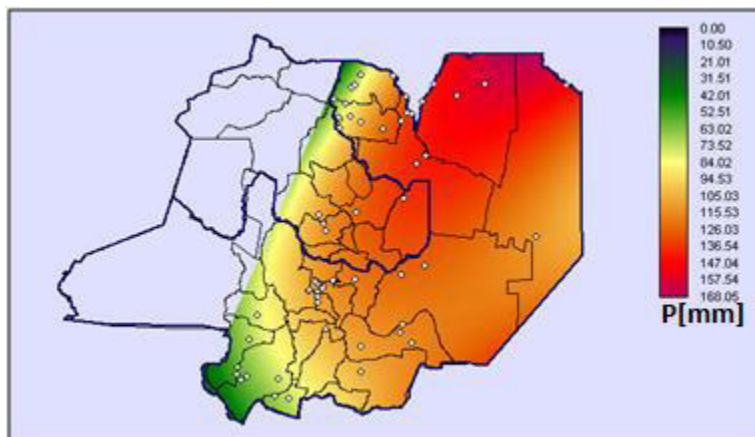


Figura 8: Mapa de lluvias máximas anuales para Periodo de retorno $T= 5$ años [en mm].

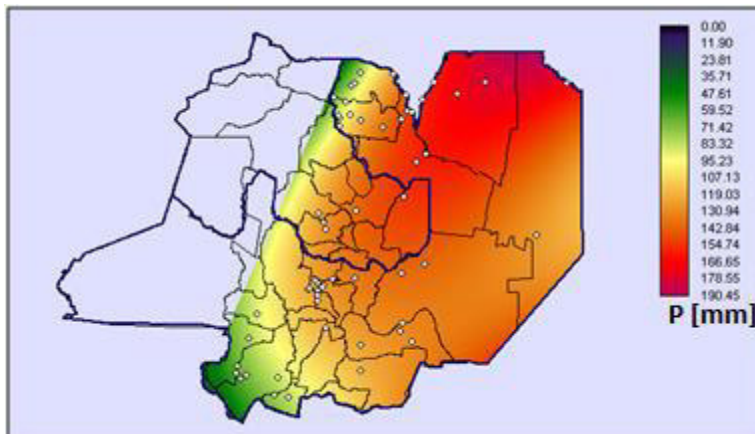


Figura 9: Mapa de lluvias máximas anuales para Periodo de retorno $T= 10$ años [en mm].

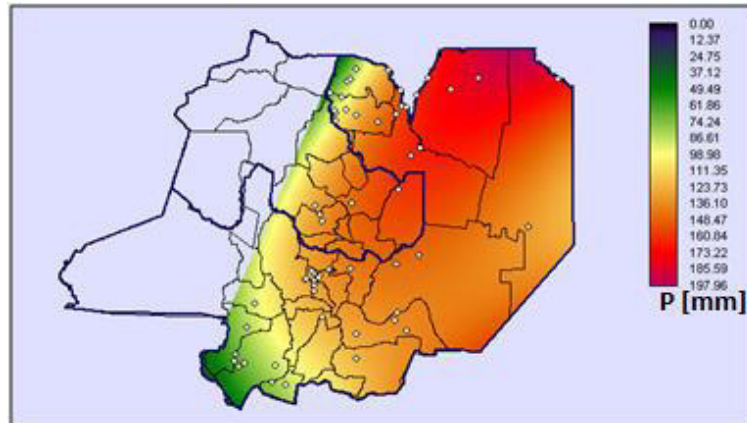


Figura 10: Mapa de lluvias máximas anuales para Periodo de retorno $T=20$ años [en mm].

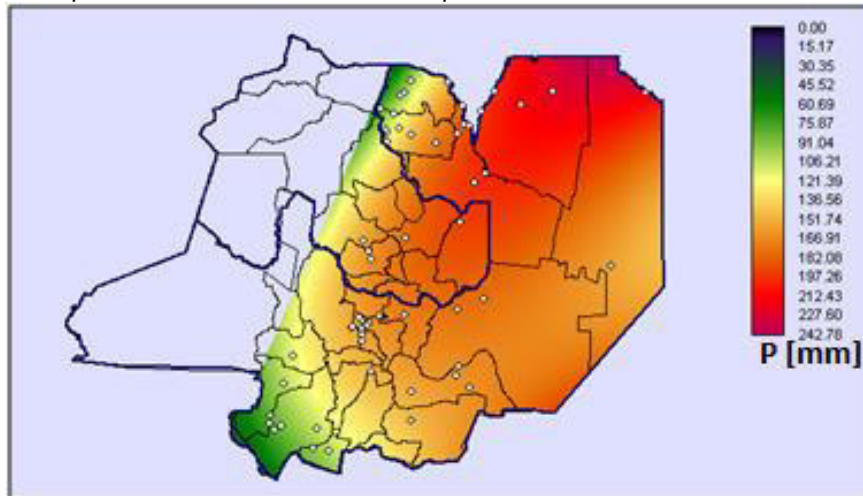


Figura 11: Mapa de lluvias máximas anuales para Periodo de retorno $T=50$ años [en mm].

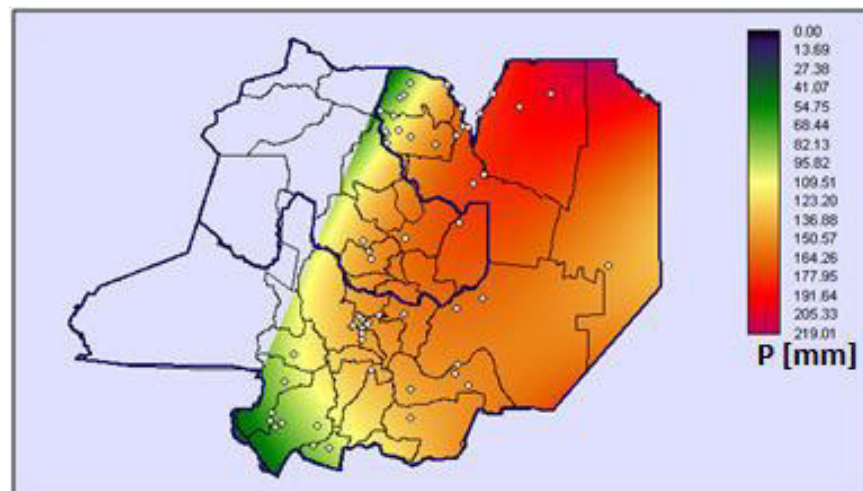


Figura 12: Mapa de lluvias máximas anuales para Periodo de retorno $T=100$ años [en mm].

CONCLUSIONES

1. Se recopilaron y procesaron registros de 104 estaciones pluviométricas en la región de estudio.

2. Se ubicaron espacialmente las estaciones notando una ausencia de las mismas en la zona de la Puna.
3. La determinación del año hidrológico Julio-Junio resulto ser el más adecuado para la región de estudio.
4. Se realizó una verificación exhaustiva de las hipótesis estadísticas para todas las estaciones encontradas, dando como resultado que los registros de 60 estaciones verificaron estas pruebas.
5. De las 6 alternativas de función de distribución de probabilidad y de método de ajuste ensayado se adoptó la función LOGNORMAL con parámetros estimados por el método de máxima verosimilitud como representativo y se verifico que la incertidumbre debido al tamaño de las muestras utilizadas es más significativo que la incertidumbre debido al modelo probabilístico utilizado.
6. Se utilizó un Sistema de información Geográfico (SIG) para representar los resultados obtenidos. El programa utilizado fue IDRISI Selva17.00.
7. Se realizó la interpolación espacial a través del método de Kriging, el cual evidenció la presencia de valores anómalos en el espacio.
8. Se crearon mapas tendenciales de isohietas de láminas de lluvias máximas diarias asociadas a diferentes períodos de retorno.

REFERENCIAS

Belli, Virginia Soledad; Cueto, César Agustín; Lovera, Daniela Alejandra; Miguez Ruiz, Martín; Pinasco, Germán Horacio (2012). "Regionalización de lluvias máximas – Aplicación a las provincias de Córdoba y Santa Fe" - Trabajo final de la carrera Ingeniería Civil – Facultad de Ingeniería – Universidad Católica de Córdoba – Córdoba, Argentina.

Caamaño Nelli, Gabriel; Dasso, Clarita (2003). "Lluvias de Diseño – Conceptos, Técnicas y Experiencias".

Catalini, Carlos G.; Maidah, Andrea; García, Carlos M.; Caamaño Nelli, Gabriel (2010). "Mapas digitales de isohietas de lluvias máximas diarias para la provincia de Córdoba". Catalini, Carlos G.; Caamaño Nelli, Gabriel E.; García Carlos M., Belli, Virginia Soledad; Bianchiotti, Bernabé; Cueto, César Agustín; Lérida, Gastón; Lovera, Daniela Alejandra; Miguez Ruiz, Martín; Pinasco, Germán Horacio; Sánchez, Ezequiel. (2012). "Regionalización Paramétrica De Funciones I-D-T. Aplicación A Las Provincias De Córdoba Y Santa Fe"

Lencinas, Matías Javier (2014). "Validación de la tormenta de diseño para la Presa Los Molinos - Jujuy - utilizando técnicas de regionalización" - Trabajo final de la carrera de Ingeniería Civil – Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales – UNC – Córdoba, Argentina.

REGIONALIZACIÓN DE LÁMINAS DE LLUVIAS MÁXIMAS DIARIAS Y PARÁMETROS ESTADÍSTICOS EN LA PROVINCIA DE SANTIAGO DEL ESTERO

Yael Audagna¹, Nicolás F. Guillén¹, Hector Daniel Farias², Carlos M. García^{1,3}, Jorge Prieto Villarroya²

¹ CETA. Centro de Estudios y Tecnología del Agua- Universidad Nacional de Córdoba-Laboratorio de Hidráulica, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales., Universidad Nacional de Córdoba, Av. Filloy s/n, Ciudad Universitaria, Córdoba, Argentina

² IRHi FCEyT-UNSE, Instituto de Recursos Hídricos. Universidad Nacional de Santiago del Estero, Santiago del Estero, Argentina.

³ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina.

RESUMEN

En este trabajo se reportan los resultados de la predicción del valor de la lámina de lluvia diaria de diseño para la provincia de Santiago del Estero, a través de un análisis de estadística inferencial y de regionalización. Para el análisis estadístico finalmente se seleccionaron registros de 70 estaciones pluviométricas que representan la región de estudio. A partir de esta información histórica se elaboraron las series de máximos diarios anuales. Luego, para todas las series elaboradas se verificaron las hipótesis estadísticas básicas (presencia de datos atípicos, independencia, estacionalidad y homogeneidad) requerida a una muestra para que tengan validez el análisis de estadística inferencial.

Se realizaron ajustes de 6 funciones de distribución de probabilidad para estimar los valores de máxima lamina de lluvia para los siguientes periodos de retorno, $T= 2, 5, 10, 20, 25, 50$ y 100 años, como así también los intervalos de confianza asociados a cada predicción. Se seleccionó la función de distribución Log Normal como óptima para este estudio y se cuantificó las diferencias relativas en la predicción debido a esta hipótesis. Los valores de lámina de lluvia diaria predichos se regionalizaron para la región de estudio mediante el uso de un Sistema de Información Geográfica (Idrisi Selva 17.00), el cual permite generar mapas digitalizados con una resolución espacial de 25 km^2 .

Palabras clave:

Lluvias Máximas Diarias, Sistemas de Información Geográfica, Provincia de Santiago del Estero

INTRODUCCIÓN

El diseño hidrológico se define como la evaluación del impacto de los procesos hidrológicos y la estimación de valores de las variables relevantes para modificarlo. El diseño hidrológico se puede utilizar para mitigar amenazas hidrológicas proyectando medidas “estructurales”, tal es el caso de una represa para el control de crecientes, sistemas de control de excedentes pluviales en obras viales, entre otras, o bien, desarrollando medidas “no estructurales” como ser la determinación de áreas de riesgo, entre otros.

La escala de diseño hidrológico es el rango en magnitud de la variable de diseño dentro del cual se debe seleccionar un valor para determinar el flujo de entrada al sistema. Los factores determinantes en la selección de este valor para una obra civil, son el costo y la seguridad asociada. Sobredimensionar las obras es antieconómico, mientras que sub-dimensionar las mismas pueden ocasionar fallas con resultados catastróficos. La magnitud óptima para el diseño es aquella que equilibra criterios de costo y seguridad.

Generalmente al diseño hidrológico se lo utiliza para la estimación de la Creciente de Proyecto. Sin embargo la estimación de los caudales escurridos en la creciente de proyecto está afectada por la insuficiencia estadística de los registros históricos de caudales, lo cual lleva a evaluar indirectamente estos caudales mediante el uso de modelos de transformación lluvia – caudal (P-Q), los cuales son alimentados por eventos hipotéticos críticos (lluvias de diseño). Si bien tienen otros componentes, estas lluvias de diseño parten de un vínculo esencial entre los rasgos característicos de la precipitación: la función intensidad-duración-Recurrencia (i-d-T). Las relaciones i-d-T y el patrón de distribución temporal de las lluvias, requeridos para estimar Crecientes de Proyecto, solo se pueden extraer de extensos registros de alta frecuencia, normalmente fajas pluviográficas. Aun reemplazando caudal por intensidad de lluvia se continúa teniendo un problema, ya que las series pluviográficas largas también son escasas, aunque menos que las hidrométricas. En cambio, es habitual otro dato de lluvia provisto por pluviómetros: la lámina de lluvia diaria. De esta manera, los técnicos y proyectistas pueden proceder a la estimación mediante un análisis de estadística inferencial de las láminas de lluvias máximas diarias asociadas a diferentes periodos de retorno, a partir de las series de datos pluviométricos registrados en diversos puntos de la cuenca.

En este trabajo lo que se hizo fue estimar la lámina de lluvia máxima diaria asociada a diferentes periodos de retorno en la provincia de Santiago del Estero. A partir de ella, puede calcularse la lámina máxima asociada a una duración diferente (utilizando un coeficiente de reducción o maximización) y a partir de ella si calcular mediante un modelo de transformación P-Q el caudal de diseño.

OBJETIVOS

El objetivo general del presente trabajo es la elaboración de mapas digitales de lluvias máximas diarias asociados a recurrencias de 2, 5, 10, 20, 25, 50 y 100 años para la provincia de Santiago del Estero. A continuación se detalla de manera resumida la metodología empleada con la finalidad de cumplimentar el objetivo citado. El proceso se puede resumir de la siguiente manera:

1. Recopilación y pre-procesamiento de series pluviométricas de las distintas estaciones existentes en la provincia de Santiago del Estero.
2. Ubicación espacial de las distintas estaciones pluviométricas preseleccionadas.
3. Determinación del año hidrológico.
4. Generación de la serie hidrológica de máximas lluvias diarias.
5. Verificación de hipótesis estadísticas de las series históricas de máximas lluvias diarias seleccionadas tales como independencia, estacionalidad y homogeneidad, además de la detección de datos atípicos en las series de precipitación.

6. Determinación de los parámetros provenientes del análisis de estadística descriptiva (media y desvío estándar).
7. Análisis de estadística inferencial mediante el ajuste de distribución de probabilidad.
8. Interpolación de la información puntual, generación de grillas de análisis mediante el uso de un Sistema de Información Geográfica (Idrisi Selva 17.00).
9. Generación de mapas tendenciales digitales de máximas láminas de lluvia diaria de distintos periodos de retorno para la provincia de Santiago del Estero.

A continuación se describe en detalle cada actividad:

1. Recopilación y pre-procesamiento de series pluviométricas de las distintas estaciones existentes en la provincia de Santiago del Estero.

Se recopiló información de la lámina de lluvia diaria precipitada, la misma se obtuvo de las estaciones pluviométricas instaladas en las provincias de Santiago del Estero. Para la obtención de datos se recurrió a diferentes fuentes como:

- Páginas web, en su mayoría pertenecientes a entidades gubernamentales, donde se encuentran datos históricos de lluvia diaria:
<http://bdhi.hidricosargentina.gov.ar/sitioweb/frmFiltro.aspx>
<http://dev.siiia.gov.ar/series>
<http://siga2.inta.gov.ar/en/datoshistoricos/>
<http://www.tutiempo.net/clima/Argentina/AR.html>
- Instituto de Recursos Hídricos, Fac. de Cs. Exactas y Tecnologías, Universidad Nacional de Santiago del Estero.

En total se analizaron 91 estaciones pluviométricas dentro del territorio. Luego se realizó una preselección, de acuerdo a cada longitud de serie de las estaciones para continuar con el análisis. El criterio de Longitud de Serie consistió, en un principio, en fijar veinte años como longitud mínima de las series anuales de lluvias máximas diarias a analizar. Este condicionante, implica rechazar puestos pluviométricos disponibles, por lo que se adopta como criterio final la aceptación de todas las estaciones con una longitud de serie mayor o igual a catorce años. Esta longitud mínima coincide con lo definido para estudios similares realizados en otras provincias de Argentina.

La Tabla 1 y la Figura 1 permiten visualizar la cantidad de estaciones que pertenecen a cada intervalo de longitud de serie, es decir, entre uno y catorce años, mayores o igual a catorce años y mayor o igual de veinte. Así, por otra parte, existen 87 estaciones con más de catorce años de registro, conformando el 96% del total. Este porcentaje de estaciones son las que continuaron las verificaciones subsiguientes.

Tabla 1: Frecuencias de las estaciones pluviométricas en función de su longitud de serie, para la provincia de Santiago del Estero.

Longitud de serie		
Estaciones con datos	91	Porcentaje
1 < Longitud de serie < 14	4	4.40%
Longitud de serie >= 14	87	95.60%
Longitud de serie >= 20	68	74.72%

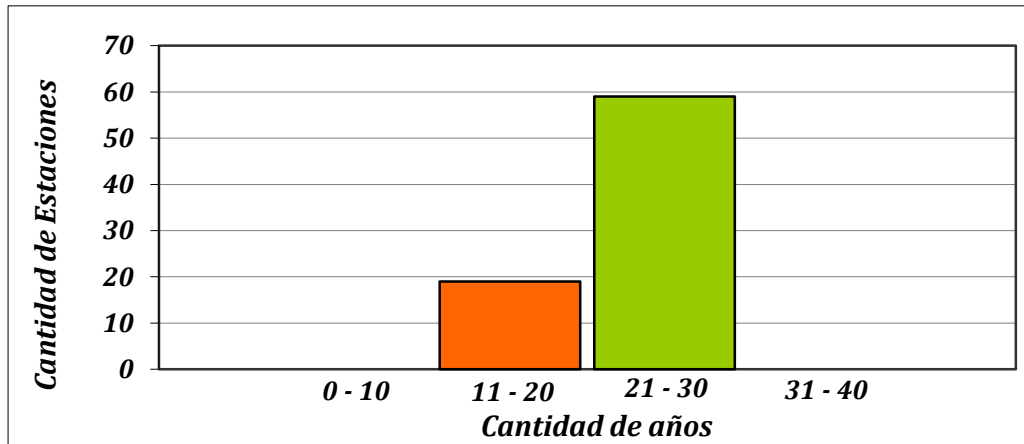


Figura 1: Longitud de registro de las estaciones pluviométricas encontradas, para la provincia de Santiago del Estero.

2. Ubicación espacial de las distintas estaciones pluviométricas y sus parámetros estadísticos.

En la Figura 2 puede apreciarse la disposición espacial de las mismas pre-seleccionadas. Puede observarse una distribución homogénea de estaciones pluviométricas en toda la provincia.

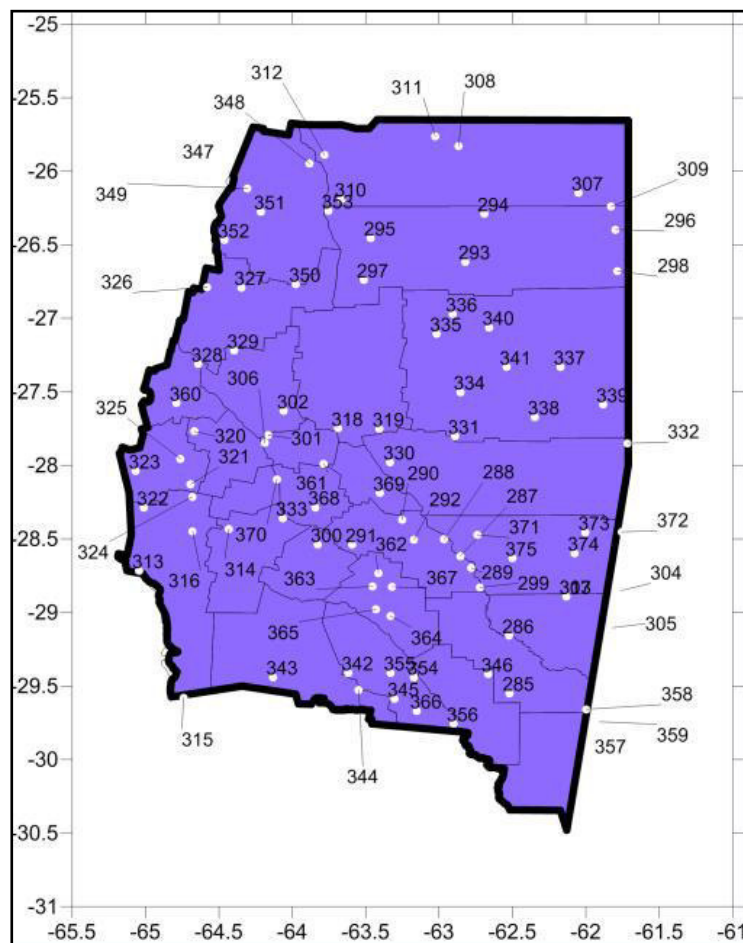


Figura 2: Disposición espacial de las estaciones pluviométricas encontradas.

3. Determinación del año hidrológico para la región en estudio.

Para el análisis y procesamiento estadístico de las lluvias es recomendable dividir las series históricas en “años hidrológicos”. Este concepto, se define como el período anual que no fracciona el ciclo estacional de lluvia, pudiendo ser distinto al año calendario. Se observó, para los registros encontrados, que las máximas lluvias se daban entre los meses de Octubre a Abril, por ende, para el análisis se optó por determinar cómo año hidrológico al periodo desarrollado de Julio a Junio del año (calendario) siguiente.

4. Generación de la serie hidrológica de lámina de lluvia máximas diarias.

Luego de fijar el año hidrológico se elaboraron la serie hidrológica de máximos anuales de lámina de lluvias diarias. Se pudo determinar que los máximos de lluvia máxima diaria ocurrieron generalmente entre los meses de Octubre y Abril, inclusive. Por ello cuando no se contaba con datos en algunos de esos meses, se prescinde de ese año hidrológico, dado que en esos meses es probable que se dé la precipitación máxima anual, lo que podría ocasionar subestimaciones en los análisis estadísticos que se realizarán sobre ellas.

5. Verificación de hipótesis estadísticas de las series históricas de máximas anuales de lluvia diaria.

5.1. Detección de presencia de datos Atípicos.

Las series de máximos anuales de lluvia diaria de las 87 estaciones pluviométricas preseleccionadas que tenían una longitud de serie acorde fueron sometidas a la detección de datos atípicos. Si las series tenían un valor atípico, este se removía pero si tenía más de un valor atípico toda la serie era descartada. De las mismas, 10 estaciones no pasaron esta prueba y fueron descartadas. Dicha eliminación representa el 11% de las estaciones que tenían una longitud de serie acorde.

Tabla 2: Estación pluviométrica con más de dos Datos Atípicos.

	Estaciones Pluviométricas	Logitud de serie	Latitud	Longitud
291	Toropan	23	-63.590	-28.539
299	Ancocha	13	-62.720	-28.829
311	Urutau	23	-63.025	-25.761
339	Roversi	21	-61.881	-27.586
349	La Fragua	24	-64.307	-26.117
351	Nueva Esperanza	24	-64.215	-26.276
354	San Francisco	21	-63.171	-29.439
358	Palo Negro	23	-61.995	-29.658
369	Garza	25	-63.402	-28.188
375	Tacañitas	13	-62.502	-28.632

5.2. Prueba de Independencia.

Las 77 estaciones que verificaron la hipótesis anterior fueron sometidas a la prueba de Independencia (Wald-Wolfowitz). En la Tabla 3 se muestran las estaciones depuradas. Del total de estaciones analizadas tres no pasaron la prueba, lo cual constituye el 4% del total de estaciones que verificaron datos atípicos.

	Estaciones pluviométricas	Longitud de serie	Latitud	Longitud
313	Frias-SANTIAGO DEL ESTERO	28	-65.044	-28.716
324	Santa Catalina-SANTIAGO DEL ESTERO	24	-64.682	-28.213
368	Brea Pozo-SANTIAGO DEL ESTERO	26	-63.844	-28.285

Tabla 3: Estación Pluviométrica que no verificó la Prueba de Independencia de sus valores máximos diarios.

5.3. Prueba de Estacionalidad.

Las estaciones que verificaron las hipótesis anteriores fueron sometidas a la Prueba de Estacionalidad (Kendall). Las cuatro estaciones que se encuentran en la Tabla 4 han rechazado esta prueba, lo cual constituye el 6% del total de estaciones que verificaron independencia.

	Estaciones pluviométricas	Longitud de serie	Latitud	Longitud
331	Yuchan-SANTIAGO DEL ESTERO	26	-62.892	-27.802
338	Quimili-SANTIAGO DEL ESTERO	27	-62.348	-27.671
348	Ahí Veremos-SANTIAGO DEL ESTERO	21	-63.882	-25.947
368	Brea Pozo-SANTIAGO DEL ESTERO	26	-63.844	-28.285

Tabla 4: Estaciones Pluviométricas que rechazaron la Prueba de Estacionalidad.

5.4. Prueba de Homogeneidad a Escala Anual.

Las estaciones restantes fueron sometidas a la Prueba de Homogeneidad (Wilcoxon) de sus registros históricos. En Santiago del Estero todas las series verificaron a la prueba.

De esta manera se concluye que de las 91 estaciones pluviométricas de las cuales se partió este trabajo, 70 pasaron las pruebas representando estas el 77% del total. En la Figura 3 se puede observar la distribución espacial de las estaciones que pasaron las pruebas.

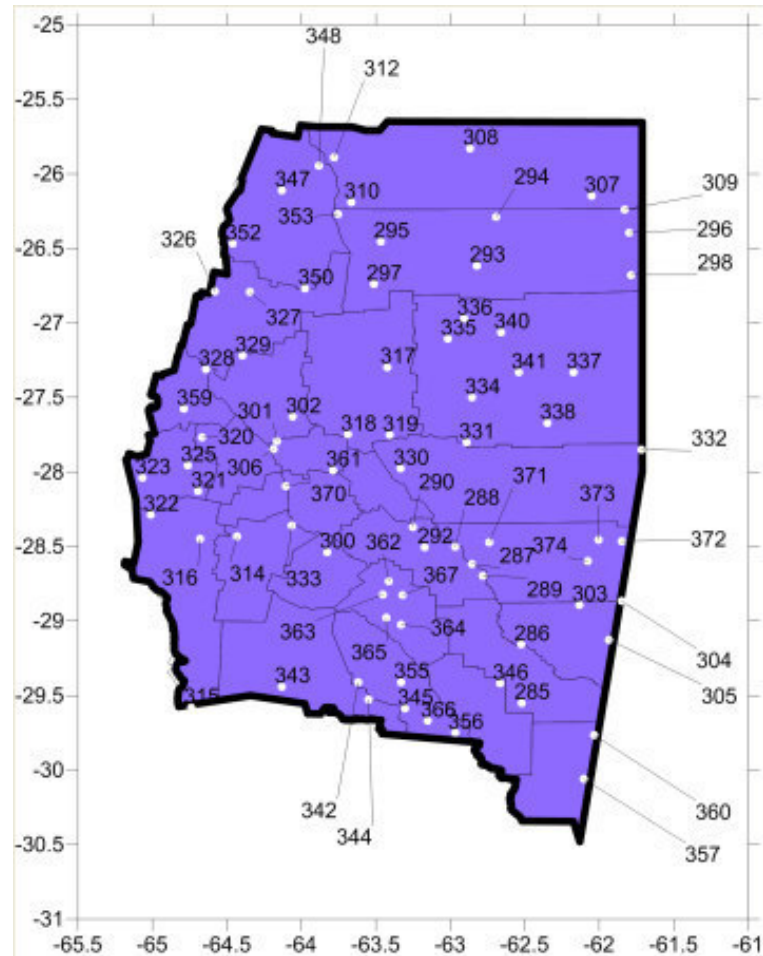


Figura 3: Estaciones finalmente seleccionadas.

6. Análisis de estadística descriptiva

En la Tabla 5 se presenta una tabla resumen con los datos estadísticos más importantes de las series anuales de máximos de lluvia diaria de las estaciones finalmente seleccionadas: Valor máximo observado en la serie, promedio aritmético y desvío estándar para las series. Además, en la misma se describe su nombre y código interno.

Tabla 4: Parámetros de estadística descriptiva de las series anuales de máximos de lluvia diaria de las estaciones finalmente seleccionadas en la provincia de Santiago del Estero.

CÓDIGO INTERNO	Nombre de la Estación	Máximo	Media	Desvío
285	El Oso	170	92.06	32.47
286	Pinto	193	84.74	35.62
287	Colonia Dora	184	72.12	48.02
288	Herrera	185	88.21	41.61
289	Icano	129	72.61	33.14
290	Lugones	130	74.11	28.88
292	Villa Mailin	207	105.96	38.69
293	Campo Gallo	207	87.19	39.43
294	El Porvenir	175	78.24	32.52
295	Huachana	150	74.31	34.45
296	Monte Rico	238	91.64	44.76
297	Santos Lugares	208	85.14	43.05
298	Sachayoj	127	90.07	21.29
300	Villa Atamisqui	149	80.15	31.59
301	La Banda	130	67.93	26.86
302	Clodomira	152	71.26	25.7
303	Bandera	196	105.62	39.56
304	Cuatro Bocas	215	95.64	44.86
305	Fortin Inca	180	87.2	38.46
306	Santiago del Estero	166.1	94.31	28.9
307	Los Piripintos	165	83.65	31.49
308	Monte Quemado	140	89.88	26.88
309	Pampa de los Guanacos	188	103.4	30.03
310	San Jose de Boqueron	180	93	33.97
312	Villa Matoque	140	87.77	31.21
314	Laprida	160	64.35	33.68
315	La Vuelta	145	66.29	28.62
316	Villa La Punta	140	70.93	27.86
317	Bandera Bajada	145	76.15	27.26
318	La Cañada	155	81.64	34.98
319	Villa Figueroa	118	74.06	25.13
320	Doña Luisa	140	74.6	27.3
321	Guampacha	150	70.6	36.21
322	Lavalle	180	70.5	35.8
323	San Pedro	160	76.17	37
325	Villa Guasayan	145	70.42	28.63
326	El Arenal	162	93.76	40.88
327	El Bobadal	190	97.36	38
328	El Charco	155	72.33	31.03
329	Pozo Hondo	134	61.85	21.61
330	Suncho Corral	135	84.27	28.86
331	Yuchan	216	81.96	42.46
332	Campo del Cielo	197	99.2	48.59
333	Loreto	130	69.7	26.53
334	Las Tinajas	180	82.83	44.5
335	Libertad	190	94.47	39.68
336	Lilo Viejo	150	78.72	28.28
337	Otumpa	123	86.81	26.53
338	Quimili	200	95.4	37.92
340	Tintina	165	95.41	27.14
341	Weisburd	250	106.76	57.16
342	Km. 49	100	65.77	21.54
343	La Isla	100	59.4	19.28
344	Ojo de Agua	150	76.71	25.95
345	Sol de Julio	157	77.76	32.16
346	Villa Union	140	82.43	26.75
347	Agua Amarga	120	68.1	26.04
348	Ahí Veremos	100	61.52	19.53
350	Las Delicias	180	84.32	31.95
352	Rapelli	189	84.04	42.04

7. Análisis de estadística inferencial.

En primer lugar, se determinaron las probabilidades empíricas de cada dato de lluvia diaria máxima anual observado, utilizando la Ecuación de Weibull en cada estación pluviométrica.

Luego, dichos datos se ajustaron a las 6 funciones de distribución de probabilidad teóricas siguientes:

- g) GEV (Método de Máxima Verosimilitud).
- h) Gumbel (Método de Máxima Verosimilitud).
- i) Log. Normal (Método de Máxima Verosimilitud).
- j) GEV (Método de Momentos).
- k) Gumbel (Método de Momentos).
- l) Log Pearson tipo III (Método de Momentos).

Debido a que este trabajo busca extender un análisis de regionalización de lluvias máximas diarias realizado en otras regiones de Argentina (Audagna, 2014; Belli et al., 2012; Caamaño Nelli y Dasso, 2003; Catalini et al., 2010; Catalini et al., 2012; y Lencinas, 2014), es que se adopta la misma función de distribución adoptada en esos estudios: Log Normal con parámetros ajustados por el método de Máxima Verosimilitud para representar las muestras de valores de lluvias diarias máximas anuales. Se analiza a continuación la máxima diferencia en porcentaje de los valores de la lámina de lluvia para 100 años de periodo de retorno asociadas a las distintas funciones de distribución con respecto a la "Log Normal". Se puede observar en la Figura 4 que para las longitudes de serie que se presentan, no existe una gran diferencia de algunos valores estimados con otras funciones de distribución con respecto a la Log Normal, ya que las longitudes de serie que se tienen son prácticamente homogéneas.

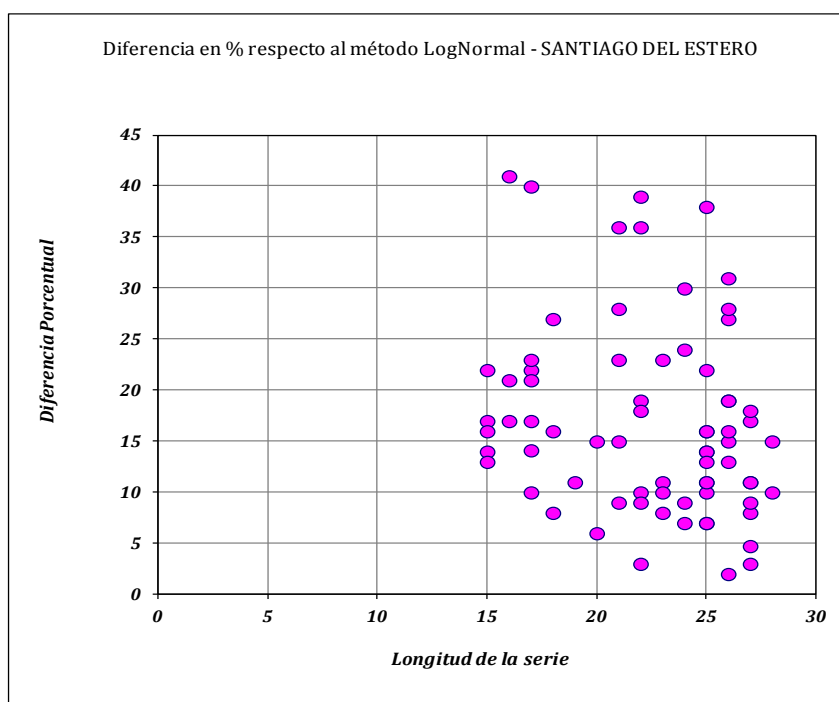


Figura 4: Evolución de la máxima diferencia porcentual entre los valores estimados con la distribución LogNormal y las otras funciones ensayadas a medida que aumenta la longitud de la serie, para la provincia de Santiago del Estero.

Para analizar la importancia relativa de la selección de la función de distribución óptima se realiza un análisis para 100 años de periodo de retorno. Se elige este valor (y no los asociados a otros periodos de retorno) por ser el que más diferencia muestra en relación a los demás. En este

análisis se compara la diferencia porcentual mostrada en la Figura 4 con un valor denominado "Incertidumbre del método Lognormal" representativo del tamaño de los intervalos de confianza calculado como la diferencia relativa (límite superior – valor medio) / valor medio. En la Figura 5 se puede ver el análisis realizado. Así se verifica que todas las funciones de distribución se hallan dentro del intervalo de confianza de la función Lognormal.

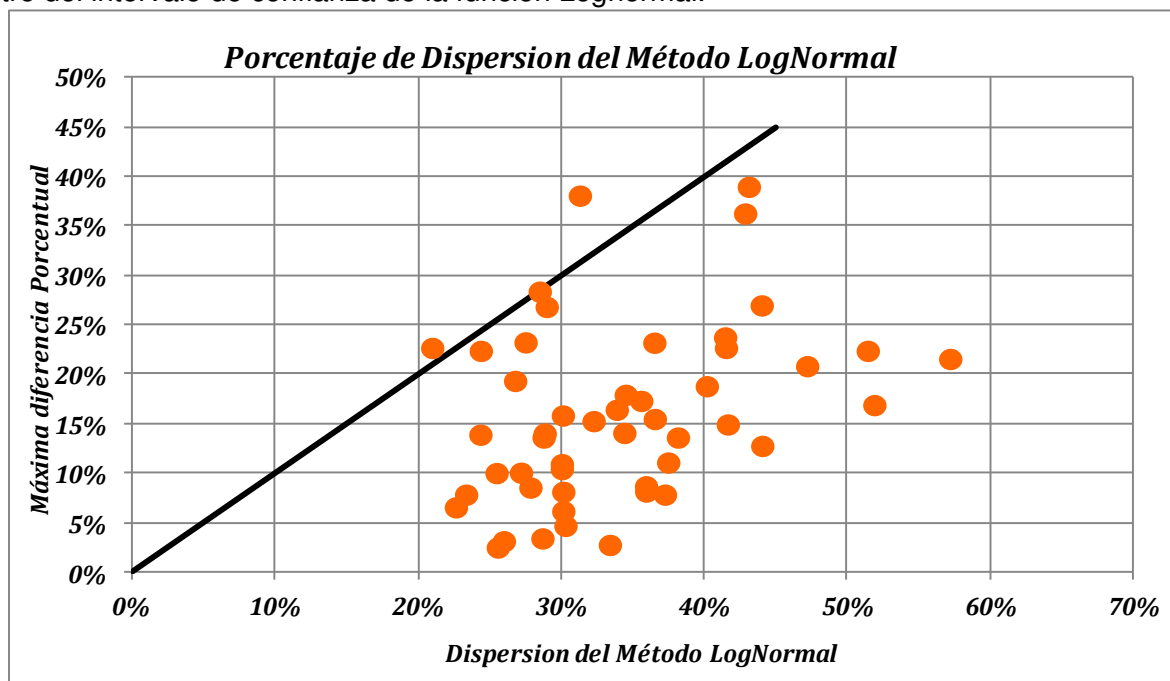


Figura 5: Contraste entre de la máxima diferencia porcentual observada entre los valores estimados con la distribución LogNormal (denominada Máxima diferencia porcentual) y la "Incertidumbre del método Lognormal" representativo del tamaño de los intervalos de confianza calculado como la diferencia relativa (límite superior – valor medio) / valor medio.

8. Interpolación de la información puntual utilizando SIG

Con los valores de lámina de lluvia estimados para los distintos periodos de retorno en cada una de las estaciones pluviométricas se utilizaron técnicas de análisis espacial para poder interpolar la información puntual con el objeto de generar grillas de información pluviométrica.

En este proceso se utilizó un Sistema de Información Geográfica (SIG), el cual es definido como un sistema asistido por computadora para la adquisición, almacenamiento, procesamiento, análisis y visualización de datos geográficos. En la actualidad, se encuentran disponibles una gran variedad de herramientas y paquetes computacionales para asistir estas tareas. El paquete computacional elegido fue el Idrisi Selva versión 17.00, el cual permite generar un archivo vectorial o de tipo raster georreferenciado. Utilizando esta herramienta se realizó la interpolación espacial de los valores de lámina de lluvia estimados para los distintos periodos de retorno a través del método de Kriging. Específicamente este método permite generar archivos raster a partir de la totalidad de los archivos vectoriales anteriormente creados con la información de lluvia máxima diaria estimada para cada localización. La Figura 6 muestra el Raster interpolado por el método Kriging para la precipitación diaria media máxima anual estimada para un período de retorno de dos años [en mm].

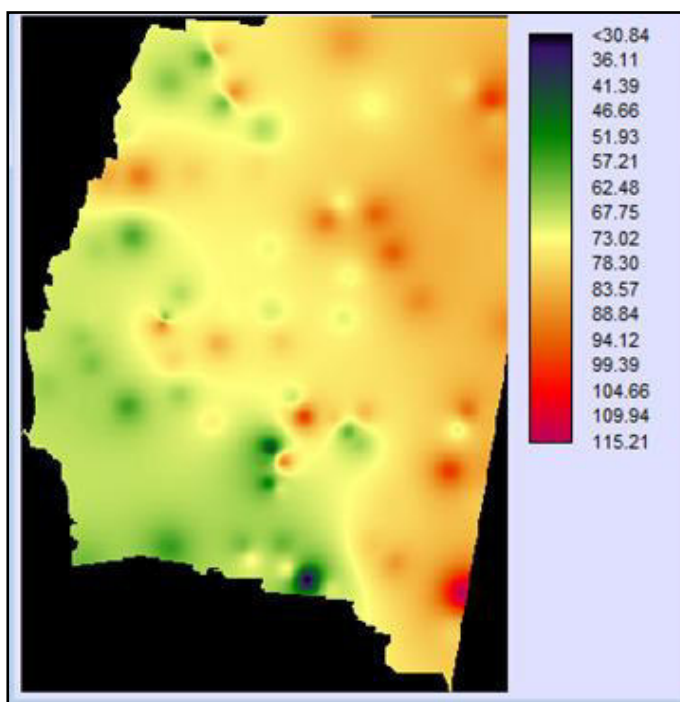


Figura 6: Raster interpolado por el método Kriging para la Precipitación media máxima estimada para un periodo de retorno de dos años [en mm].

9. Generación Mapas tendenciales de lluvias diarias máximas anuales para distintos periodos de retorno

En base a las interpolaciones obtenidas por el método de Kriging de los valores medios de precipitación diaria para distintas recurrencias, se generó una imagen de superficie tendencial que suaviza las variaciones locales observadas. En las Figuras 7 a 12 se muestran los mapas de lluvia diaria máxima anual asociados a los diferentes periodos de retorno analizados.

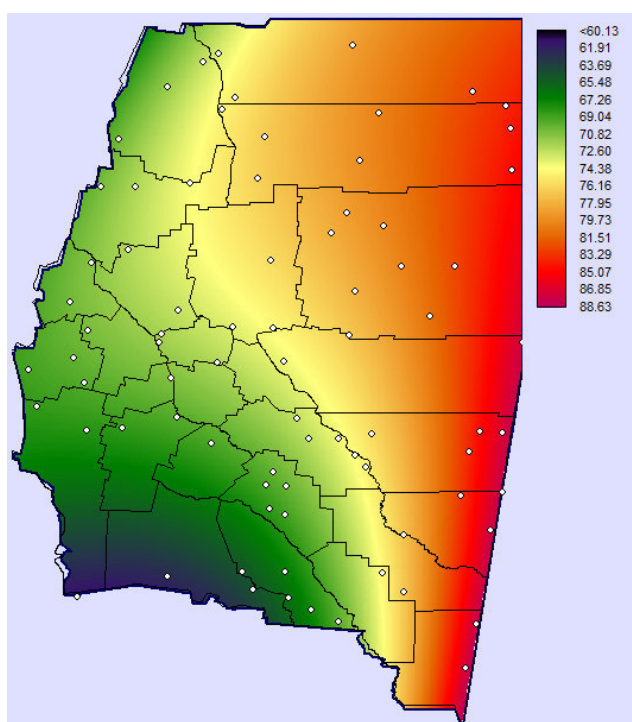


Figura 7: Mapa de lluvias máximas anuales para Periodo de retorno T= 2 años [en mm].

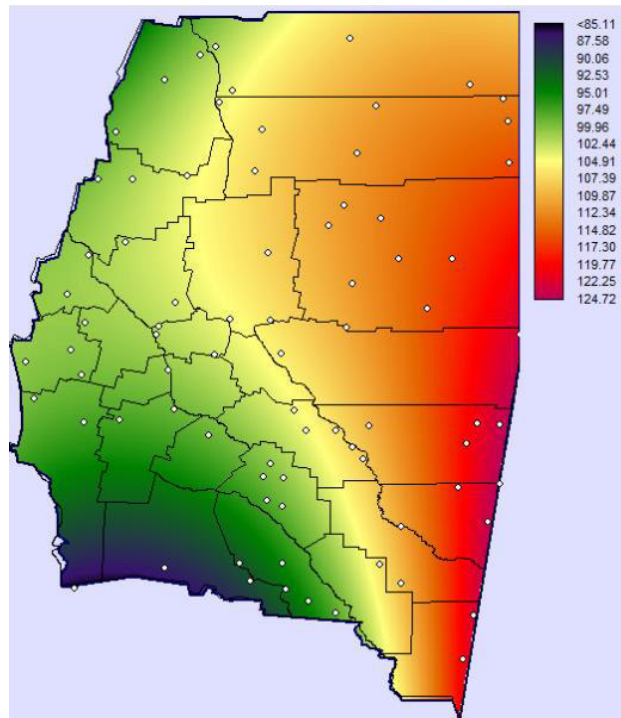


Figura 8: Mapa de lluvias máximas anuales para Periodo de retorno T= 5 años [en mm].

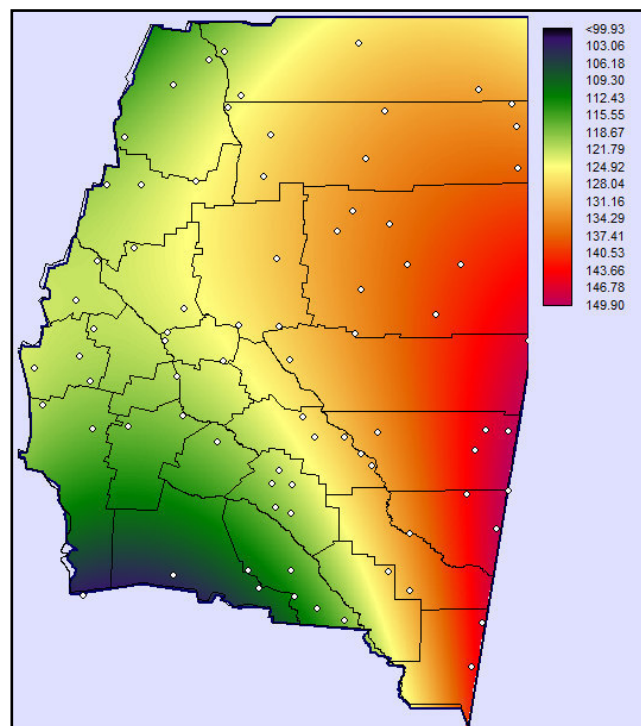


Figura 9: Mapa de lluvias máximas anuales para Periodo de retorno T= 10 años [en mm].

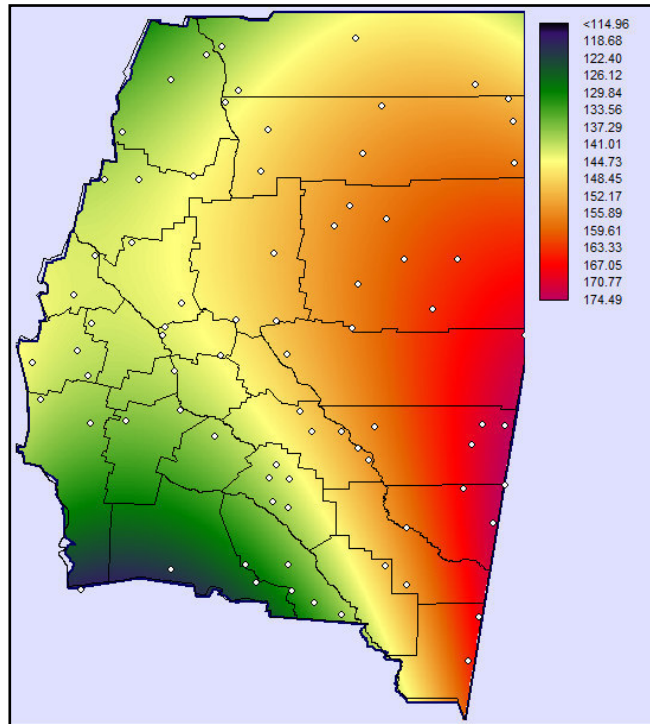


Figura 10: Mapa de lluvias máximas anuales para Periodo de retorno T= 20 años [en mm].

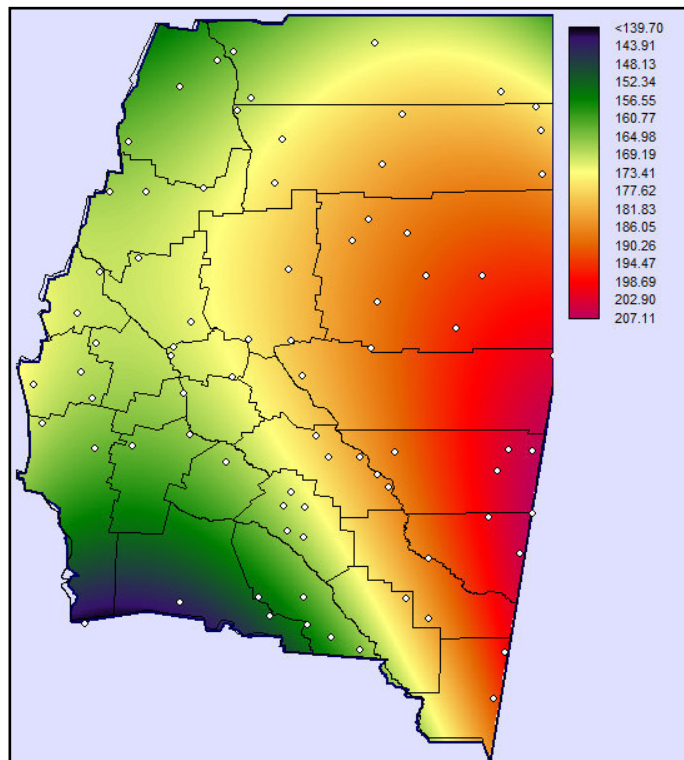


Figura 11: Mapa de lluvias máximas anuales para Periodo de retorno T= 50 años [en mm].

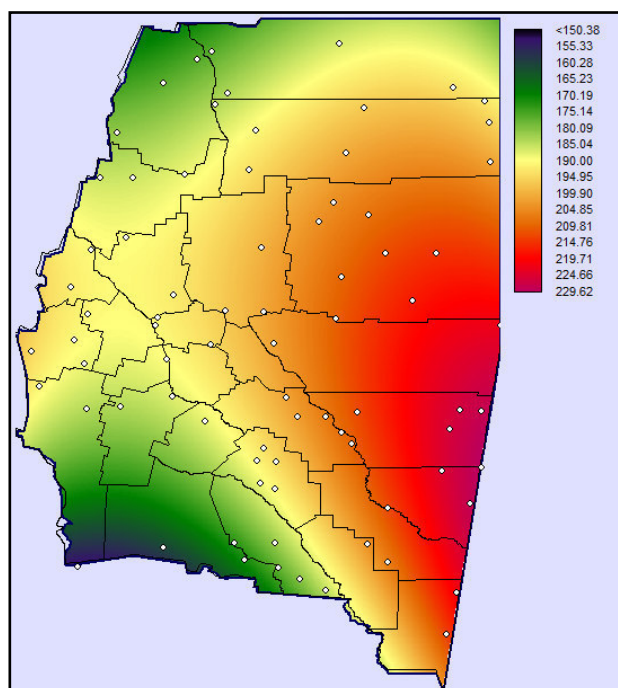


Figura 12: Mapa de lluvias máximas anuales para Periodo de retorno $T=100$ años [en mm].

CONCLUSIONES

9. Se recopilaron y procesaron registros de 91 estaciones pluviométricas en la región de estudio.
10. Se ubicaron espacialmente las estaciones notando una ausencia de las mismas en la zona de la Puna.
11. La determinación del año hidrológico Julio-Junio resultó ser el más adecuado para la región de estudio.
12. Se realizó una verificación exhaustiva de las hipótesis estadísticas para todas las estaciones encontradas, dando como resultado que los registros de 70 estaciones verificaron estas pruebas.
13. De las 6 alternativas de función de distribución de probabilidad y de método de ajuste ensayado se adoptó la función LOGNORMAL con parámetros estimados por el método de máxima verosimilitud como representativo y se verificó que la incertidumbre debido al tamaño de las muestras utilizadas es más significativo que la incertidumbre debido al modelo probabilístico utilizado.
14. Se utilizó un Sistema de información Geográfico (SIG) para representar los resultados obtenidos. El programa utilizado fue IDRISI Selva17.00.
15. Se realizó la interpolación espacial a través del método de Kriging, el cual evidenció la presencia de valores anómalos en el espacio.
16. Se crearon mapas tendenciales de isohietas de láminas de lluvias máximas diarias asociadas a diferentes periodos de retorno.

REFERENCIAS

Audagna, Yael (2014). "Regionalización de lluvias máximas diarias en la provincia de Santiago del Estero" - Trabajo final de la carrera de Ingeniería Civil – Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales – UNC – Córdoba, Argentina.

Belli, Virginia Soledad; Cueto, César Agustín; Lovera, Daniela Alejandra; Miguez Ruiz, Martín; Pinasco, Germán Horacio (2012). "Regionalización de lluvias máximas – Aplicación a las

provincias de Córdoba y Santa Fe” - Trabajo final de la carrera Ingeniería Civil – Facultad de Ingeniería – Universidad Católica de Córdoba – Córdoba, Argentina.

Caamaño Nelli, Gabriel; Dasso, Clarita (2003). “Lluvias de Diseño – Conceptos, Técnicas y Experiencias”.

Catalini, Carlos G.; Maidah, Andrea; García, Carlos M.; Caamaño Nelli, Gabriel (2010). “Mapas digitales de isohietas de lluvias máximas diarias para la provincia de Córdoba”. Catalini, Carlos G.;

Caamaño Nelli, Gabriel E.; García Carlos M., Belli, Virginia Soledad; Bianchiotti, Bernabé; Cueto, César Agustín; Lérída, Gastón; Lovera, Daniela Alejandra; Miguez Ruiz, Martín; Pinasco, Germán Horacio; Sánchez, Ezequiel. (2012). “Regionalización Paramétrica De Funciones I-D-T. Aplicación A Las Provincias De Córdoba Y Santa Fe”