



Derivación de curvas Intensidad-Duración-Recurrencia (IDR) para las ciudades de Casilda y Zavalla, Santa Fe, Argentina

Pedro A. Basile^{1,2}, Erik Zimmermann^{1,2,4}, Gerardo Riccardi^{1,2,3} y Hernán Stenta^{1,2}

¹ Departamento de Hidráulica – Escuela de Ingeniería Civil (FCEIA – UNR)

² Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales (FCEIA – UNR)

³ Consejo de Investigaciones de la Universidad Nacional de Rosario

⁴ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas

Mail de contacto: pbasile@fceia.unr.edu.ar

RESUMEN

Se presenta la derivación de curvas intensidad-duración-recurrencia (IDR) para las ciudades de Casilda (Estación INTA-Agencia de Extensión Rural) y Zavalla (Estación Agro-Experimental), ubicadas en el sur de la provincia de Santa Fe, Argentina. La metodología para la construcción de tales curvas fue basada en la transposición de las relaciones $R_{24h,1d,R}$ y $\Gamma_{Dj,24h}$ derivadas a partir de información de lluvia registrada en la Estación Rosario Aero (SMN). Los resultados obtenidos son satisfactorios y pueden ser aplicados para el diseño de obras hidráulicas en la zona de influencia de las ciudades de Casilda y Zavalla, desde el diseño de sistemas de drenajes pluviales urbanos hasta el dimensionamiento de alcantarillas, puentes y canales artificiales en sectores rurales.

Palabras clave: curvas Intensidad-Duración-Recurrencia, Casilda, Zavalla.

ABSTRACT

The derivation of intensity-duration-recurrence (IDR) curves for the cities of Casilda (INTA-Rural Extension Agency) and Zavalla (Agro-Experimental Station), both located in the southern part of Santa Fe province, Argentina, is presented. The methodology for the construction of these curves was based on the transposition of $R_{24h,1d,R}$ and $\Gamma_{Dj,24h}$ relationships, derived from rainfall information recorded in Rosario Aero Station (SMN). The obtained results are satisfactory and can be applied for the design of hydraulic works in the area of influence of Casilda and Zavalla cities, from the design of urban stormwater drainage systems to the design of culverts, bridges and artificial canals in rural areas.

Keywords: Intensity-Duration-Recurrence curves, Casilda, Zavalla.

Introducción

Las curvas intensidad-duración-recurrencia (IDR) se emplean en el diseño hidrológico para estimar intensidades medias máximas de lluvia, de determinadas duraciones y recurrencias, como así también, para la construcción de hietogramas de diseño (Orsolini et al., 2008; Caamaño Nelli et al., 1999). Tales herramientas posibilitan especificar los escenarios de entrada a los modelos de transformación lluvia-caudal para la determinación de caudales máximos o hietogramas de diseño (Riccardi et al., 2009; Stenta et al., 2009; Zimmermann et al., 2009a y b; García et al., 2000).

El presente trabajo tiene como objetivo general actualizar y ampliar los estudios estadísticos de precipitaciones registradas en la Estación INTA-Agencia de Extensión Rural de Casilda y la FCAG-UNR Estación Agro-Experimental de Zavalla, ubicadas en el sur de la provincia de Santa Fe, Argentina. Por otra parte, se plantea como objetivo específico

derivar curvas IDR parametrizadas para las ciudades de Casilda y Zavalla.

Tales curvas permitirán abordar el diseño de obras hidráulicas en la zona de influencia de ambas ciudades, desde el diseño de sistemas de drenaje pluvial urbano; incluyendo conductos pluviales, cordón cuneta, bocas de tormenta, reservorios de detención, etc.; hasta el dimensionamiento de alcantarillas, puentes y canales artificiales en sectores rurales.

Descripción de los datos utilizados

En el estudio se utilizó una serie de registros pluviométricos de 44 años (1962-2007), de la Estación INTA-Agencia de Extensión Rural de Casilda (que en adelante denominaremos Estación Casilda), localizada a una latitud de 33° 02' Sur, una longitud de 61° 09' Oeste y una altura de 70,5 m sobre el nivel del mar. Por otra parte, se utilizaron 35 años (1973-2007) de datos pluviométricos registrados en la FCAG-UNR Estación Agro-Experimental de Zavalla (que en adelante denominaremos

Estación Zavalla), localizada a una latitud de 33° 01' Sur, una longitud de 60° 53' Oeste y una altura de 50 m sobre el nivel del mar. Además, se utilizó una serie de registros pluviográficos de 43 años (1942-1984) y una serie de registros pluviométricos de 73 años (1935-2007), de la Estación Rosario Aero (SMN); distante aproximadamente 40 km de la Estación Casilda y 16 km de la Estación Zavalla y localizada a una latitud de 32° 55' Sur, una longitud de 60°46' Oeste y a 22,5 m sobre el nivel del mar.

La Estación Zavalla se encuentra dentro de la cuenca del A° Ludueña (sur de la provincia de Santa Fe, Argentina), mientras que, la Estación Casilda se ubica fuera de dicha cuenca en proximidad del límite Sur-Oeste. El área de la cuenca es aproximadamente de 700 km², con una pendiente media del curso principal de 0,00133. En la Fig. 1 se presenta la ubicación de la cuenca del A° Ludueña y se indican las distintas estaciones de medición de lluvia consideradas en el presente estudio.

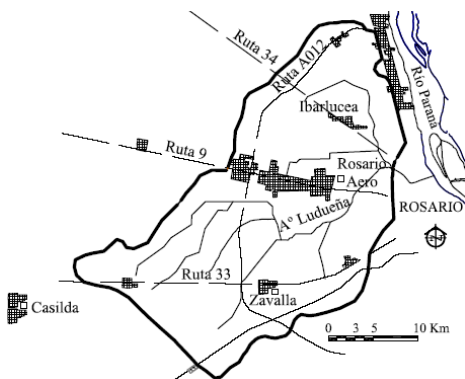


Fig. 1. Cuenca del A° Ludueña y estaciones de medición de lluvia consideradas.

Metodología implementada

En función de los datos pluviométricos registrados se procedió a realizar la construcción de las muestras de lluvias máximas para distintas duraciones. A partir de los registros se seleccionaron lluvias máximas anuales para duraciones de 1, 2, 3, 4 y 5 días. Además, a partir de los datos pluviográficos, se seleccionaron las láminas máximas anuales para duraciones de 5, 15, 30, 60, 180, 360, 720 y 1440 minutos.

A cada una de las muestras se le ajustaron cinco funciones de distribución de probabilidades teóricas (FDP) o modelos probabilísticos (MP): LogGauss, Gumbel, GEV (General Extremes Values), Pearson y Exponencial, empleando el programa AFMULTI

(Paoli et al., 1994), por otra parte, la probabilidad experimental se calculó con la ecuación de Hazen.

La metodología implementada para desagregar temporalmente hacia duraciones menores que 24 horas en Casilda y Zavalla, consistió, en primer lugar, en multiplicar la lámina de duración 1 día ($P_{1d,R}$) de Casilda y Zavalla por la relación $R_{24h,1d,R}$:

$$P_{24h,R} = R_{24h,1d,R} P_{1d,R} \quad (1)$$

donde $R_{24h,1d,R}$ es la relación entre las láminas máximas de igual recurrencia R , P_{24h} y P_{1d} , correspondientes a períodos de 24 horas móviles (datos pluviográficos) y a períodos de 1 día fijos (datos pluviométricos), derivada de los datos de la Estación Rosario Aero:

$$R_{24h,1d,R} = \left(\frac{P_{24h}}{P_{1d}} \right)_R \quad (2)$$

Es decir, se introdujo la diferencia entre el día pluviométrico (generalmente con horario de inicio y fin prefijados) y el intervalo móvil de 24 horas que rastrea las láminas máximas de cada tormenta (García et al., 2001). De esta manera se determinaron las lámina de lluvia $P_{24h,R}$ de las Estaciones Casilda y Zavalla.

Sucesivamente, las láminas para las diferentes duraciones menores que 24 horas y para cada una de las recurrencias adoptadas, $P_{D_i,R}$, se determinaron multiplicando las láminas de duración 24 horas, obtenidas precedentemente, por las respectivas relaciones entre láminas $r_{D_i,24h,R}$:

$$P_{D_i,R} = P_{1d,R} R_{24h,1d,R} r_{D_i,24h,R} \quad (3)$$

donde $r_{D_i,24h}$ son las relaciones entre las láminas máximas de igual recurrencia para duraciones menores o iguales que 24 horas (1440 minutos) calculadas con la FDP teórica ajustada a los datos pluviográficos de la Estación Rosario Aero:

$$r_{D_i,24h,R} = \left(\frac{P_{D_i}}{P_{24h}} \right)_R, \quad D_i \leq 24 \text{ hs} \quad (4)$$

donde P_{D_i} y P_{24h} son láminas para duraciones D_i y 24 horas respectivamente, asociadas a la recurrencia R . Obviamente, para la duración $D_i=24$ horas se verifica que $r_{D_i,24h,R} = 1$.

Las intensidades medias máximas para cada duración y cada recurrencia se determinaron mediante el cociente entre las respectivas láminas y sus correspondientes

duraciones. Luego, las curvas IDR derivadas se parametrizaron, para cada R, ajustando ecuaciones del tipo Sherman de tres parámetros:

$$i = \frac{\alpha}{(\beta + D)^\gamma} \quad (5)$$

donde α , β y γ son parámetros, D es la duración de lluvia expresada en minutos e i es la intensidad expresada en (mm/h). El ajuste de los parámetros se realizó con la función Solver de Excel® minimizando la función objetivo, definida como el error relativo promedio, es decir:

$$ERP = \left(\frac{1}{N_D} \sum_{k=1}^{N_D} \left(\frac{|i_{ECP,k} - i_{FDP,k}|}{i_{FDP,k}} \right)^2 \right)^{1/2} \quad (6)$$

donde N_D es el número total de duraciones consideradas, $i_{ECP,k}$ e $i_{FDP,k}$ son las intensidades medias máximas, para la k-ésima duración de lluvia, calculadas respectivamente con la ecuación parametrizada y con la función de distribución de probabilidades teórica seleccionada.

Análisis de resultados

De acuerdo a las pruebas de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov y χ^2 (Chi-Cuadrado) ninguno de los modelos probabilísticos es descartado para los tres niveles de significancia: 5%, 1% y 0,1%. Sin embargo, el modelo que mejor ajusta, considerando los valores del error cuadrático medio de la variable (ECMV) y de la frecuencia (ECMF), para el conjunto de duraciones, es el modelo de valores extremos tipo I de Gumbel. Por lo tanto, se adoptó el modelo probabilístico de Gumbel para caracterizar la distribución de probabilidades de las precipitaciones registradas en la Estación Rosario Aero, Casilda y Zavalla.

El modelo de Gumbel muestra un comportamiento robusto y estable, inclusive para recurrencias elevadas. La robustez y la estabilidad indican que el modelo no diverge ni oscila para recurrencias elevadas. El modelo LogGauss (Galton) tiene un comportamiento similar al de Gumbel con valores de ECMV y ECMF ligeramente superiores o iguales en algunos casos. El modelo Exponencial es el que peor ajuste brinda, con valores del ECMV y del ECMF aproximadamente 50 % y 160 % superiores respectivamente al de Gumbel. El modelo GEV, respecto al de Gumbel, es ligeramente divergente y aumenta

considerablemente la lámina en su extremo superior cuando la FDP se representa en términos de recurrencias crecientes. El modelo Pearson presenta errores cuadráticos similares al modelo GEV pero su comportamiento es ligeramente inestable para valores crecientes de la recurrencia.

En las Figs. 2, 3 y 4 se observan los valores de las láminas máximas en función de la recurrencia, para las duraciones de 1, 2, 3, 4 y 5 días, determinadas con el modelo probabilístico de Gumbel y los valores determinados con la ecuación de probabilidad experimental de Hazen para las Estaciones Rosario Aero, Casilda y Zavalla.

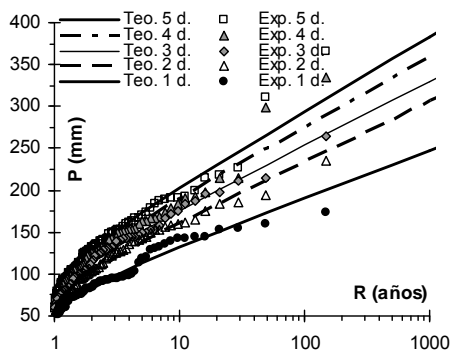


Fig. 2. Ajuste de la FDP Gumbel, datos pluviométricos Estación Rosario Aero.

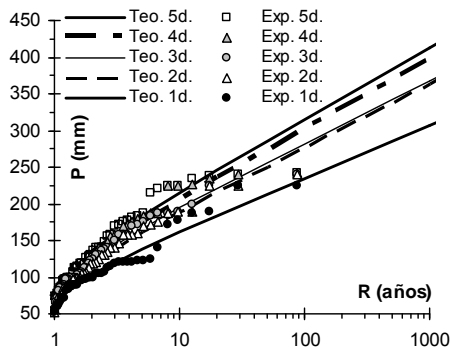


Fig. 3. Ajuste de la FDP Gumbel, datos pluviométricos Estación Casilda.

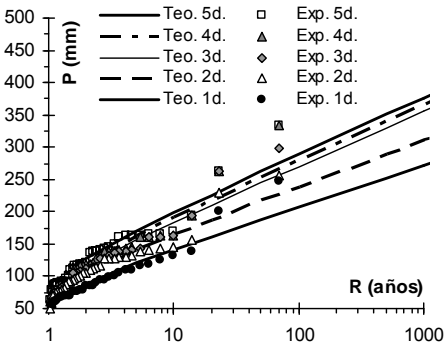


Fig. 4. Ajuste de la FDP Gumbel, datos pluviométricos Estación Zavalla.

Por otra parte, en la Fig. 5 se presentan los valores de las láminas máximas en función de la recurrencia, para las duraciones de 5, 15, 30, 60, 180, 360, 720 y 1440 minutos, determinadas con la FDP Gumbel y los respectivos valores calculados con la probabilidad experimental de Hazen para la Estación Rosario Aero.

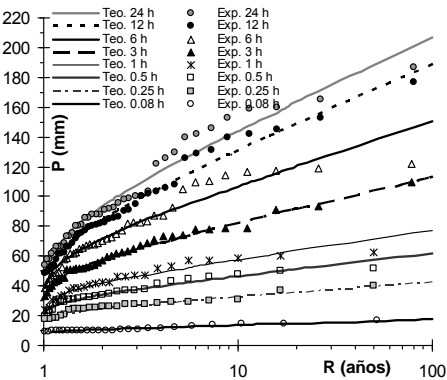


Fig. 5. Ajuste de la FDP Gumbel, datos pluviográficos Estación Rosario Aero.

La relación $R_{24h,1d,R}$ entre las láminas máximas de igual recurrencia R , P_{24h} y P_{1d} , correspondientes a períodos de 24 horas móviles (datos pluviográficos) y a períodos de 1 día fijos (datos pluviométricos) respectivamente, se calculó utilizando los datos de la Estación Rosario Aero a partir de una regresión lineal entre las láminas máximas P_{24h} y P_{1d} calculadas en con la FDP teórica adoptada para cada una de las recurrencias especificadas. El valor obtenido es $R_{24h,1d,R} = 1,086$ (Basile et al., 2009). Tal valor es similar al valor medio de 1.08 determinado para la región central de Argentina

(García et al., 2001) y ligeramente menor que el valor 1.13 calculado por Hershfield (1961).

Las relaciones $r_{Di,24h}$ entre las láminas máximas de igual recurrencia para $D \leq 24$ horas (1440 minutos), calculadas a partir de la FDP teórica adoptada, muestran una cierta variabilidad con la recurrencia, aunque no en forma sustancial, sobre todo para $R < 10$ años y duraciones 15 minutos $< D < 360$ minutos (ver Fig. 6).

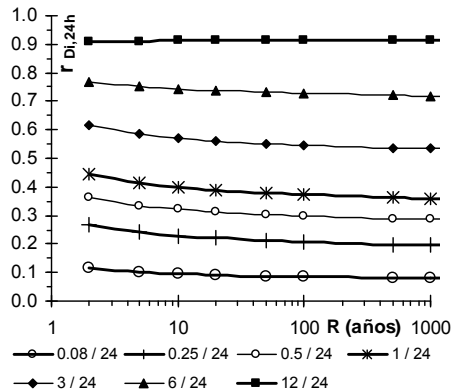


Fig. 6. Relaciones entre láminas, FDP Gumbel, datos pluviográficos Estación Rosario Aero.

En las Tablas 1 y 2 se presentan las 7 ecuaciones de las curvas IDR parametrizadas para Casilda y Zavalla respectivamente. Es decir, se presenta una ecuación tipo (5) para cada valor de R , donde se observan los valores de los parámetros α , β y γ . Considerando las dos estaciones, el error relativo promedio (ERP) mínimo obtenido a partir del proceso de ajuste fue del 3% y el máximo del 8%. El ajuste alcanzado es muy satisfactorio. Las ecuaciones son válidas para duraciones de lluvia comprendidas entre 5 y 7200 minutos.

Tabla 1 Ecuaciones de las curvas IDR parametrizadas para Casilda (Sta Fe, Arg.).

Ec. Nº	R (años)	α	β	γ
1	2	2503,818	19,263	0,8693
2	5	1849,399	12,403	0,7920
3	10	2050,044	13,443	0,7848
4	20	2200,032	13,529	0,7769
5	50	2300,082	11,977	0,7637
6	100	2400,057	11,021	0,7567
7	500	2400,292	8,609	0,7322

Tabla 2 Ecuaciones de las curvas IDR parametrizadas para Zavalla (Sta Fe, Arg.).

Ec. N°	R (años)	α	β	γ
1	2	2503,818	19,288	0,8844
2	5	1849,364	15,723	0,8074
3	10	2050,044	13,446	0,8010
4	20	2199,966	16,501	0,7942
5	50	2300,047	16,071	0,7811
6	100	2400,034	16,000	0,7715
7	500	2400,289	10,309	0,7477

En las Figs. 7 y 8 se presenta la comparación entre las ecuaciones de las curvas IDR continuas parametrizadas y los valores puntuales determinados con modelo probabilístico (MP) para recurrencias de 2, 10, 50 y 500 años; para las ciudades de Casilda y Zavalla respectivamente.

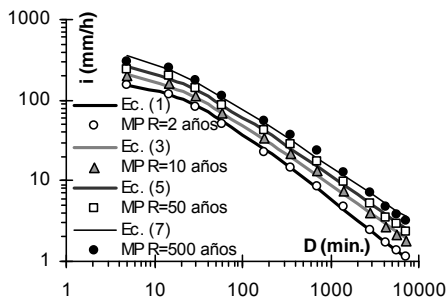


Fig. 7. Ecuaciones parametrizadas y valores puntuales del MP para R=2, 10, 50 y 500 años; Estación Casilda.

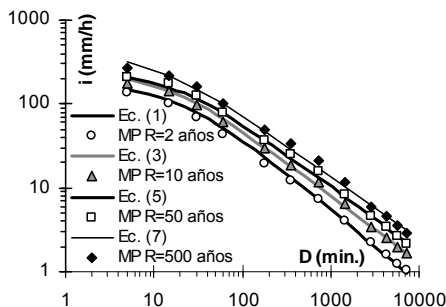


Fig. 8. Ecuaciones parametrizadas y valores puntuales del MP para R=2, 10, 50 y 500 años; Estación Zavalla.

En las Figs. 9 y 10 se presenta la comparación entre las ecuaciones de las curvas IDR continuas parametrizadas y los valores puntuales determinados con modelo probabilístico (MP) para recurrencias de 5, 20 y 100 años; para las ciudades de Casilda y Zavalla respectivamente.

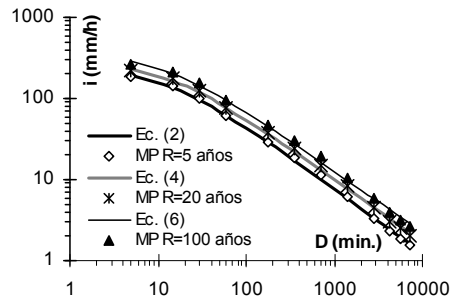


Fig. 9. Ecuaciones parametrizadas y valores puntuales del MP para R=5, 20 y 100 años; Estación Casilda.

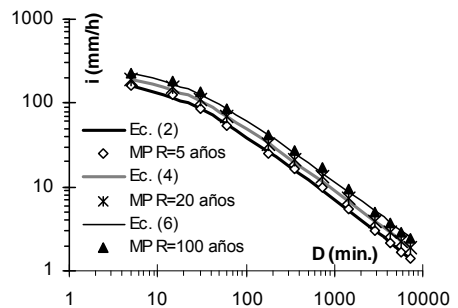


Fig. 10. Ecuaciones parametrizadas y valores puntuales del MP para R=5, 20 y 100 años; Estación Zavalla.

En las Figs. 7 a 10 es posible observar el ajuste satisfactorio de las ecuaciones parametrizadas a los valores puntuales calculados con la FDP Gumbel, en dichas figuras se observa también el rango de duración para el cual son válidas las ecuaciones presentadas en las Tablas 1 y 2, es decir, su validez comprende desde los 5 minutos hasta los 7200 minutos (5 días).

Conclusiones

Se construyeron curvas intensidad-duración-recurrencia, para las ciudades de Casilda y Zavalla, utilizando en forma conjunta datos pluviométricos y datos pluviográficos. La

metodología fue basada en la transposición de las relaciones $R_{24h,1d,R}$ y $r_{D_i,24h}$ derivadas a partir de información de lluvia registrada en la Estación Rosario Aero (SMN), Santa Fe, Argentina.

El valor calculado de la relación $R_{24h,1d,R}$ a partir de la FDP teórica adoptada (Gumbel) es similar al valor medio calculado para la región central de la República Argentina por García et al. (2001) y ligeramente inferior al valor propuesto por Hershfield (1961).

Las relaciones $r_{D_i,24h,R}$ calculadas a partir del ajuste de la FDP Gumbel a los datos pluviográficos de la Estación Rosario Aeropuerto, no presentan una variación sustancial con la recurrencia. Tales relaciones permitieron desagregar temporalmente láminas máximas para duraciones $D_i \leq 24$ hs en función de los datos pluviométricos registrados en las Estaciones de Casilda y Zavalla.

Las curvas IDR construidas constituyen una herramienta fundamental para el dimensionamiento de obras hidráulicas en zonas urbanas y rurales de las ciudades de Casilda y Zavalla, localizadas en el sur de la provincia de Santa Fe, República Argentina.

Agradecimientos

Los autores agradecen al CONICET, la ANPCYT y el MASPOMA (Provincia de Santa Fe) por el apoyo brindado mediante los proyectos PIP 5308, PICTO 23187 y Convenio MASPOMA-FCEIA, UNR, respectivamente.

Referencias

Basile, P.A., E. Zimmermann, G. Riccardi, H. Stenta, C. Scuderi, J.P. Rentería y A. González. 2009. Derivación de curvas Intensidad-Duración-Recurrencia unificadas para la ciudad de Rosario, Santa Fe, Argentina. *XXII Congreso Nacional del Agua*. CONAGUA 2009, Trelew, Chubut, Patagonia Argentina. Trabajo N° 199 (CD-ROM).

Caamaño Nelli, G. y C.M. García. 1999. Relación Intensidad-Duración-Recurrencia de Lluvias Máximas: Enfoque a través del Factor de Frecuencia, Caso Lognormal. *Revista Ingeniería Hidráulica en México*, ISSN 0186-4076, 14(3), 37-44. DF., México.

García, C.M., G. Caamaño Nelli y C.M. Dasso. 2001. Estimación de laminas máximas de lluvia a partir de información pluviométrica diaria. *Revista Ingeniería del Agua*, ISSN 1134-2196, 8(2), 179-189. Valencia, España.

García, C.M., G. Caamaño Nelli y C.M. Dasso, 2000. Coherencia entre la lámina y su distribución en la estimación del hietograma puntual de diseño. *XVIII Congreso Nacional del Agua*. Santiago del Estero, Argentina, ISBN 987-99083-4-1 (Libro resúmenes extendidos y CD-ROM).

Hershfield, D.M. 1961. Rainfall Frequency Atlas of the U.S. for Duration from 30' to 24h and Return Periods from 1-100 years. United States Weather Bureau. Technical Paper N° 40. Washington, USA.

Orsolini, H.E., E.D. Zimmermann y P.A. Basile. 2008. *Hidrología: Procesos y Métodos*. Editora de la Universidad Nacional de Rosario (UNR Ed.), Segunda Edición, 414 p., ISBN: 978-950-673-657-6. Rosario, Argentina.

Paoli, C., J. Bolzicco y P. Cacik. 1994. Análisis de Frecuencia de Variables Hidrológicas. Reporte técnico. Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH), Universidad Nacional del Litoral (UNL).

Riccardi, G., E. Zimmermann, P.A. Basile, H. Stenta, C. Scuderi, J.P. Rentería y L. Odicini. 2009. Aspectos metodológicos para la definición de crecidas de diseño en cuencas de la región del Gran Rosario. *XXII Congreso Nacional del Agua*. CONAGUA 2009, Trelew, Chubut, Patagonia Argentina. Trabajo N° 203 (CD-ROM).

Stenta, H., G. Riccardi, R. Navarro, E. Zimmermann, R. Postiglione, P.A. Basile, O. Zucca y S. Zacarias. 2009. Aplicación de un modelo matemático distribuido en la cuenca del arroyo Ludueña para diferentes alternativas de obras hidráulicas orientadas al saneamiento hídrico integral. *XXII Congreso Nacional del Agua*. CONAGUA 2009, Trelew, Chubut, Patagonia Argentina. Trabajo N° 239 (CD-ROM).

Zimmermann, E., P.A. Basile, C. López, G. Riccardi, H. Stenta, C. Scuderi y J.P. Rentería. 2009a. Distribución Espacial para la Tormenta de Diseño en el Área del Gran Rosario. *XXII Congreso Nacional del Agua*. CONAGUA 2009, Trelew, Chubut, Patagonia Argentina. Trabajo N° 202 (CD-ROM).

Zimmermann, E., P.A. Basile, C. López, G. Riccardi, H. Stenta, C. Scuderi y J.P. Rentería. 2009b. Condiciones antecedentes para la tormenta de diseño en el área Gran Rosario. *XXII Congreso Nacional del Agua*. CONAGUA 2009, Trelew, Chubut, Patagonia Argentina. Trabajo N° 201 (CD-ROM).