



Actualización y análisis de las curvas intensidad - duración - frecuencia para la localidad de Balcarce, provincia de Buenos Aires, Argentina

Update and analysis of intensity - duration - frequency curves for Balcarce, Buenos Aires province, Argentina

Puricelli, Marino

Recibido: 30 de septiembre de 2013 • Aceptado: 17 de febrero de 2014

Resumen

Tanto en terrenos urbanos como en espacios rurales, la valoración de la capacidad de generación de escurrimiento superficial del terreno resulta fundamental para el diseño de obras de drenaje para el manejo de excedentes hídricos y el control de la erosión de suelos (incluyéndose aquí el potencial arrastre de agroquímicos). Por ello, el conocimiento de los valores de intensidad de las precipitaciones a escala sub-diaria es esencial para el desarrollo de proyectos hidrológicos e hidráulicos. En este trabajo se procesaron datos de precipitaciones con el objetivo de actualizar y analizar la curva IDF (intensidad – duración – frecuencia) representativa de la ciudad de Balcarce y su zona de influencia. Se contó con información registrada durante el período 1991 – 2006 en la estación meteorológica de la Estación Experimental Balcarce, del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.

Para concretar el objetivo se consideraron dos enfoques diferentes, mostrando ambos un buen ajuste con la información disponible. No obstante, el procedimiento de estimación conjunta de las curvas IDF mostró ventajas sobre el método de estimación tradicional ya que brindó información respecto a la incertidumbre asociada los mismos. El intervalo de confianza estimado fue de utilidad para evaluar diferencias entre curvas IDF.

Palabras clave: *curvas IDF, incertidumbre, Balcarce, Argentina.*

Abstract

Both in urban and in rural areas, the assessment of the runoff generation capacity of the land surface is essential for the design of drainage works in order to manage excess water and control soil erosion (including here the potential agrochemicals runoff). Knowledge of the rainfall intensity values at sub-daily scales is essential for developing hydrologic and hydraulic projects. Rainfall data were processed in order to update and analyze IDF curves (Intensity - Duration - Frequency) representative of Balcarce and area. Information

Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Estación Experimental Agropecuaria Balcarce, Ruta nacional 226, Km 73.5, 9620 Balcarce, provincia de Buenos Aires.

✉ mmpuri.geo@gmail.com

recorded at the meteorological station of the National Institute of Agricultural Technology Agricultura Experimental Station were analyzed.

Two different approaches were considered. Both of them showed a good agreement with available information. However the joint estimation method showed advantages over the traditional estimation method, providing information about uncertainty. Confidence limits was useful to assess differences between IDF curves.

Keywords: IDF curves, uncertainty, Balcarce, Argentina.

INTRODUCCIÓN

Los estudios y proyectos destinados al control de excesos hídricos superficiales tanto en ambientes rurales como en urbanos y periurbanos requieren de la disponibilidad de información básica apropiada y consistente respecto a las precipitaciones máximas y el nivel de probabilidad con la que están asociadas. La valoración de la capacidad de generación de escurrimiento superficial del terreno resulta fundamental para el diseño de obras de drenaje, el manejo de excedentes hídricos y el control de la erosión de suelos (incluyéndose aquí el potencial arrastre de agroquímicos).

En el caso de las áreas urbanas, Bertoni (2004) destacó la existencia de las grandes necesidades existentes respecto a la disponibilidad de información relacionada al proceso lluvia – escorrentía en Argentina. Esta situación impone serias dificultades al correcto diseño y planificación de obras de control y encauzamiento de excedentes hídricos. En el mismo grado de exposición se encuentran los sectores periurbano y rural, donde los problemas de drenaje superficial en rutas y caminos afecta a la comunicación, la actividad económica y reduce notablemente el nivel de vida de sus pobladores. (Maza y Bertoni, 2004; Van de Vyver y Demarée, 2010; Moreira et al., 2012; Puricelli y Moreira, 2012).

El diseño de obras hidráulicas de drenaje de los excesos de escurrimiento superficial parte de la identificación de las lluvias máximas, las cuales se caracterizan en función de su intensidad (I), duración (D) y frecuencia de ocurrencia (F) (Chow et al., 1994). Estas tres variables se relacionan mediante las curvas IDF, que permiten seleccionar un valor de precipitación para una duración y tiempo de recurrencia adecuados al sitio y magnitud de la obra (Chow, et al. 1994). Tal como se señala en la Ec. (1), i es la intensidad de precipitación, d es la duración del evento y T es el período de retorno o recurrencia, el cual en términos estadísticos representa al tiempo que separa la aparición de dos sucesos de igual magnitud. La relación del período de retorno con el valor de probabilidad de excedencia p de un fenómeno dado se expresa en la Ec. (2), donde la probabilidad de excedencia es la probabilidad de que un determinado valor sea superado (Chow et al., 1994).

$$i=f(d,T) \tag{1}$$

$$T=\frac{1}{(1-p)} \tag{2}$$

Desde el punto de vista hidrológico y para el diseño de obras de drenaje de escorrentía, el valor de (d) se relaciona con el tiempo de concentración de la cuenca o extensión del área que se analiza. A los efectos de estimar el máximo caudal de

escurrimiento en una cuenca, se toma como criterio general que la duración del mismo debe ser como mínimo igual al tiempo de concentración de la cuenca (Chow et al., 1994). El tiempo de concentración se define como el tiempo para el cual toda la cuenca empieza a contribuir (Chow et al., 1994), equivalente al tiempo de flujo desde el punto más alejado hasta la salida de la cuenca (Dingman, 2002). El tiempo de concentración depende de la forma de la cuenca y de su geomorfología y se considera que es un valor que la caracteriza (Dingman, 2002). Existen diferentes expresiones para su estimación, siendo la más citada la Ecuación (3), donde t_c es el tiempo de concentración (en minutos), L es la longitud del canal desde aguas arriba hasta la salida (en pies), y S es la pendiente promedio de la cuenca (en pies/pie) (Chow et al., 1994; Dingman, 2002).

$$t_c=0,0078 L^{0,77} S^{0,385} \tag{3}$$

Para la construcción de curvas IDF existen diferentes enfoques (Chow et al., 1994; Vázquez et al., 1987; Gómez Caffarena, 1988; Stedinger et al., 1992; por citar algunos ejemplos). En general, los pasos a seguir para el diseño de curvas IDF son: a) identificar los valores de intensidad máximos anuales, b) elaborar el ajuste de una función de distribución de extremos para cada intervalo de tiempo considerado, y c) estimar los parámetros de la familia de curvas IDF, ya sea de forma conjunta o individual (Vázquez et al., 1987; Koutsoyiannis et al., 1998).

Las funciones de distribución de probabilidad para eventos extremos máximos frecuentemente mencionadas en la literatura están sintetizadas en la Función Generalizada de Extremos (en inglés: Generalized Extreme Value), simbolizados por la sigla GEV. Esta se define en la Ecuación (4), donde κ , λ y ψ son los parámetros de forma, escala y ubicación, respectivamente. Si $\kappa=0$ la GEV se transforma en la función de distribución de Gumbel, frecuentemente citada en publicaciones y reportes técnicos referidos a construcción de curvas IDF (Chow et al., 1994; Chen, 1983; Vázquez et al., 1987; Gómez Caffarena, 1988; Stedinger et al., 1992; Ben-Zvi, 2009).

$$F(x)=exp\left\{-\left[1+\kappa\left(\frac{x}{\lambda}-\psi\right)\right]^{-1/\kappa}\right\} \tag{4}$$

En el caso de series de corta longitud, es conveniente optar por funciones de distribución como la de Pareto generalizada (Ec. 5), en reemplazo de funciones del tipo GEV (Van de Vyver y Demarée, 2010), donde κ y λ deben tomar valores positivos.

$$F(x)=1-\left[1+\kappa\left(\frac{x}{\lambda}-\psi\right)\right]^{-1/\kappa} \tag{5}$$

En todos los casos se debe comprobar el grado de ajuste de esta función a los datos (variable x en las ecuaciones (4) y (5)). Además de los test estadísticos usuales como Chi-cuadrado o Kolmogrov-Smirnov (Montgomery y Runger, 1996), los datos se asocian a un valor de período de retorno empírico. Éste se obtiene a partir de ordenar los valores de mayor a menor, estableciendo un orden de probabilidad de excedencia llamado "posiciones de graficación" (Chow et al. 1994). Existen diferentes propuestas para las mismas. La forma general es la señalada en la Ecuación (6), donde i es el número de orden que se le asignó a cada valor x , n es el total de valores de x analizados y a es un parámetro que permite transformar a la Ecuación (6) en alguna de las diferentes expresiones existentes para obtener las posiciones de graficación (Chow et al., 1994).

$$q_i = \frac{i-a}{(n+1-2a)} \quad (6)$$

Finalmente. El período de retorno, T , se calcula como:

$$T = \frac{1}{q_i} \quad (7)$$

En términos generales, las curvas IDF se pueden representar según la Ecuación (8), donde ω , θ , η y ν son parámetros positivos y no nulos, que deben ser estimados según el lugar y período de retorno, siendo el producto $\eta\nu \leq 1$ (Koutsoyiannis et al., 1998).

$$i = \frac{\omega}{(d^\nu + \theta)^\eta} \quad (8)$$

Para Koutsoyiannis et al. (1998) existe una forma generalizada de curvas Intensidad-Duración-Frecuencia que incluye en su formulación a la Ecuación (8) y tiene la forma que se presenta en la Ecuación (9). En esta última ecuación $a(T)$ representa a la función de distribución de la probabilidad de un evento extremo de intensidad i para un período de retorno T dado, y $b(d)$ se define en la Ec. (10), en la cual θ y η son parámetros a ser estimados ($\theta > 0$; $0 < \eta < 1$) relacionados a la duración del evento de precipitación (Koutsoyiannis et al. 1998).

$$i = \frac{a(T)}{b(d)} \quad (9)$$

$$b(d) = (d + \theta)^\eta \quad (10)$$

Independientemente de la metodología empleada en la estimación de valores máximos probables, existe la incertidumbre en los valores derivados de cualquier proceso de estimación. En Hidrología, la incertidumbre se asocia con el grado de duda propio de la predicción elaborada, ya sea por la presencia de errores determinísticos como aleatorios en la generación de los datos analizados. (Beven et al., 2010). Pappemberger y Beven (2006) señalan que en los últimos años el análisis de incertidumbre ha comenzado a tener importancia y conviene que se incluya en los trabajos relacionados a la hidrología, tanto por razones conceptuales como prácticas. En el caso concreto de la intensidad de precipitación, la incertidumbre es tradicionalmente considerada durante el análisis de frecuencia de los valores de intensidad, pero rara vez en la etapa posterior de diseño de las curvas. Esta forma de proceder puede favorecer a la subestimación de los riesgos al momento del diseño de una obra (Overeem et al. 2008). Se debe considerar que los datos disponibles de intensidad de precipitación sólo cubren un período limitado de tiempo, usualmente reducido, por lo que asumir la

incertidumbre se torna relevante (Van de Vyver y Demarée, 2010). Una de las formas propuestas para incluir a la misma en las curvas IDF es la generación de cuantiles de intensidad para diferentes valores de tiempo empleando algún método estadístico de simulación y en base a los mismos elaborar un intervalo de confianza para cada curva IDF (Overeem et al., 2008; Van de Vyver y Demarée, 2010).

Para el área de interés de este estudio, las primeras estimaciones de la distribución de frecuencias de la intensidad de precipitación para diferentes duraciones, siguiendo los procedimientos disponibles para la época, se obtuvieron a partir de trabajos realizados hasta principios de la década de los 80 (Vidal y Cousillas, 1982). En los mismos se establecieron los primeros valores de referencia de intensidad de precipitación para diferentes períodos de retorno y duración. En épocas más recientes, se realizaron nuevos registros de intensidad de precipitación en la estación meteorológica de la Estación Experimental Agropecuaria Balcarce del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), dando la oportunidad para una estimación independiente de las curvas IDF en la localidad de Balcarce y su comparación con los valores antecedentes disponibles.

Por lo expuesto, el objetivo de este trabajo es actualizar y analizar los valores obtenidos para las curvas de Intensidad - Duración - Frecuencia (IDF) de la localidad de Balcarce, en la provincia de Buenos Aires. Se presenta una discusión acerca de las metodologías más apropiadas para su obtención, y un conjunto de valores de referencia de intensidad de precipitación para diferentes duraciones y probabilidades de ocurrencia. Se considera que este aporte contribuye a mejorar la calidad de información de entrada en el desarrollo de propuestas y proyectos hídricos e hidráulicos en el sudeste bonaerense.

MATERIALES Y MÉTODOS

El área de estudio se localiza en la región Sudeste de la provincia de Buenos Aires (Figura 1), y presenta un clima subhúmedo-húmedo, con deficiencias estacionales de agua. En la zona se distingue una región ecológica homogénea denominada mixta papera (Suero et al., 2002) de relevancia agrícola y económica a nivel nacional.

Perteneciente al sector sur de la llanura Chacopampeana (Russo et al., 1979) se caracteriza por la presencia aislada de unidades de paisaje serrano asociado al sistema de Tandilia (Dalla Salda et al., 2006). En general, el relieve es llano con suaves ondulaciones, las cuales son más pronunciadas en las cercanías del paisaje serrano (INTA, 1989). En el Partido de Balcarce, la amplia mayoría de los suelos (96%) se localizan en terrenos con pendientes que varían entre 0 y 3% (INTA, 1989).

Basados en la información obtenida durante el período 1972 - 1979, Vidal y Cousillas (1982) consideraron el valor de tiempo de retorno empírico con la ecuación de Weibull (Ecuación (11)), la cual deriva de la Ecuación (6) haciendo $a = 0$. En consecuencia, la distribución de frecuencias ajustada a cada curva presentada por estos autores fue la de Gumbel (Tabla 1).

$$q_i = \frac{i}{(n+1)} \quad (11)$$

Para la actualización de las curvas IDF de localidad de Balcarce se contó con información de precipitación a escala horaria y sub horaria (30 minutos) correspondiente al período 01/01/1991 - 31/12/2006, contabilizando un total de 3858 valores para duraciones entre de 30, 60, 90, 120, 180, 300 y

360 minutos. Los datos corresponden a la Estación Meteorológica de la Estación Experimental Agropecuaria de Balcarce, provincia de Buenos Aires, perteneciente al Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Se trata de una estación meteorológica convencional, localizada en las coordenadas 37,75° latitud Sur y 58,30° longitud Oeste (Figura 1).

La cantidad de datos con los que se realizó el análisis, para cada uno de los valores de duración d considerados y del valor máximo de tiempo de retorno empírico asignado (T_{max}) se expone en la Tabla 2.

El rango de duraciones seleccionado es coherente con los tiempos de concentración estimados con la Ec. 3. Se emplearon para ello los valores más frecuentes de pendiente informados por INTA (1979) cubriendo un amplio conjunto de longitudes posibles de cauce y áreas de cuenca, tanto urbanas como rurales y periurbanas en la región.

De acuerdo a la notación propuesta por Koutsoyiannis et al. (1998), se contó con k grupos de duración d_j ($d = 30, 60, 120, 180, 300,$ y 360 minutos, respectivamente) donde $j = 1, 2, \dots, k$. Cada uno de estos grupos contiene un total de n_j observaciones, ordenadas según $l = 1, 2, \dots, n_j$ posiciones. En consecuencia, cada observación de intensidad se simboliza como i_{jl} .

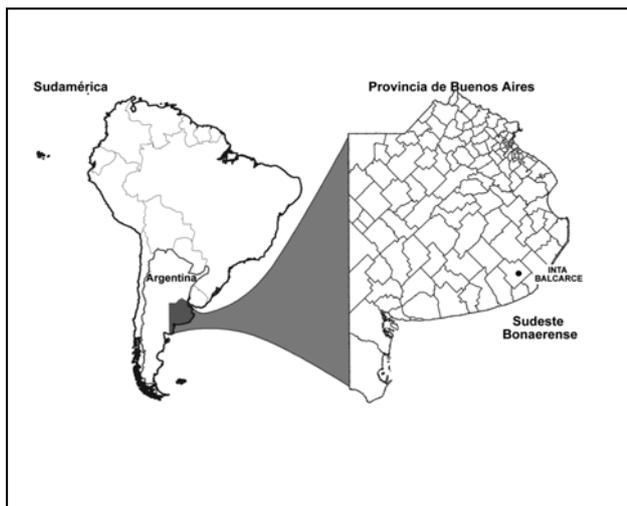


Figura 1. Situación la localidad de estudio.

Tabla 1. Valores de intensidad para diferentes duraciones y tiempos de retorno, estimados por Vidal y Cousillas (1982).

d [minutos]	T [años]					
	2	5	10	25	50	100
5	127,2	158,4	177,6	202,8	222,0	240,0
30	49,0	68,6	81,8	98,2	110,4	122,6
60	33,6	44,0	52,8	63,8	72,0	80,2
360	9,0	12,6	15,2	18,4	20,8	23,3
720	5,5	8,4	10,3	12,7	14,4	16,2
1440	3,0	5,0	6,1	7,6	8,8	9,9

Tabla 2. Cantidad de eventos de intensidad de precipitación considerados para cada valor de duración (d) y valor máximo de tiempo de retorno empírico asignado (T_{max}).

d [minutos]	n_j	T_{max} [años]
30	1887	28,8
60	945	25,2
120	483	28,8
180	275	28,8
300	192	25,2
360	76	27,0

Para la elaboración de las curvas IDF se consideraron dos enfoques diferentes: el tradicional, y el propuesto por Koutsoyiannis et al. (1998). En ambos enfoques, para la elaboración de las posiciones de graficación se empleó la expresión de Gringorten, la cual deriva de la Ecuación (6), con $a = 0,44$ (Chow et al., 1994).

En el caso del enfoque tradicional para la elaboración de curvas IDF se realizó el ajuste de una distribución de frecuencia a los cuantiles pertenecientes a cada uno de los k grupos de intensidad de duración d . Se empleó la función de distribución de frecuencias de Gumbel la cual fue ajustada por el método los momentos (Chow et al., 1994).

En un análisis previo respecto a la bondad de ajuste de funciones de distribución de frecuencias para valores extremos de intensidad para diferentes valores de duración d , se detectó que la función de Gumbel cumplía aceptablemente bien la condición de buen ajuste general a los datos, aún con un reducido número de variables. La Tabla 3 señala los resultados obtenidos comparando los valores de D_{max} del test de Kolmogorov-Smirnov (Montgomery y Runger, 1996) para las distribuciones GEV,

Pareto y Gumbel. En todos los casos, el test de Kolmogorov-Smirnov indicó aceptar la hipótesis de bondad de ajuste.

El enfoque tradicional se describe en *Vázquez et al. (1987)*, *Gómez Caffarena (1988)*, *Stedinger et al. (1992)* y *Koutsoyiannis et al. (1998)*, entre otros. En la primera de las obras mencionadas se elaboraron ajustes de frecuencia para diferentes valores de tiempo de retorno. Es decir, a partir de las distribuciones de intensidad de lluvia obtenidas se determinaron, para cada duración d , las intensidades medias de precipitación y sus tiempos de retorno T . Luego se ajustó un modelo general que representó al conjunto. Este se obtuvo a partir de una simplificación de la Ecuación (8) al hacer nulos los parámetros θ y ν . Ello resulta en la Ecuación (12), con τ , ϵ y η como parámetros de ajuste no nulos. El ajuste se realizó por mínimos cuadrados.

$$i = \frac{\tau T^\epsilon}{d^\eta} \quad (12)$$

El segundo enfoque se basa en el procedimiento propuesto por *Koutsoyiannis et al. (1998)*. Este consiste en la estimación conjunta de los parámetros para las funciones $a(T)$ y $b(d)$ en un solo paso, minimizando el error cuadrático total de las curvas IDF obtenidas, respecto a los datos disponibles. La estimación de los diferentes valores de intensidad correspondientes a los 6 grupos de duración es la que se expresa en la Ecuación (13), donde j hace referencia a las k duraciones seleccionadas ($j = 1, \dots, k$) y l a los n números de años en los que se dispone de mediciones de intensidades de precipitación ($l = 1, \dots, n$).

Tabla 3. Bondad de ajuste según el test de Kolmogorov-Smirnov (Dmax) para las distribuciones GEV, Pareto y Gumbel para diferentes duraciones de precipitación.

d [minutos]	D_{max}		
	GEV	Pareto	Gumbel
30	0,076	0,188	0,093
60	0,079	0,379	0,084
120	0,077	0,094	0,126
180	0,137	0,109	0,127
300	0,113	0,182	0,108
360	0,147	0,115	0,148

$$\hat{i}_{jl} = \frac{a(T_{jl})}{b(d_j)} \quad (13)$$

La función de distribución de frecuencia seleccionada fue la Gumbel (Ecuación 14) (*Koutsoyiannis et al., 1998*).

$$a(T_{jl}) = \lambda \{ \varphi - \ln[-\ln(1 - (1/T))] \} \quad (14)$$

Los errores correspondientes se expresan en la Ecuación (15). La transformación logarítmica fue aplicada a fin de balancear los errores entre datos de duraciones altas y bajas (*Koutsoyiannis et al., 1998*).

$$e_{ji} = \ln(i_{jl}) - \ln(\hat{i}_{jl}) \quad (15)$$

El error cuadrático medio se expresa como:

$$e^2 = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \frac{1}{n_j} \sum_{l=1}^{n_j} e_{jl}^2 \quad (16)$$

Así el ajuste simultáneo de las curvas IDF se reduce a un problema de optimización para minimizar el valor de los errores (Ecuación (17)).

$$\min(e_{ij}) = f(\eta, \theta, \lambda, \kappa, \varphi, \dots) \quad (17)$$

Posteriormente, para diferentes valores de período de retorno, se evaluó la incertidumbre de los resultados obtenidos, tal lo propuesto por *Overeem et al. (2008)* y *Van de Vyver y Demarée 2010*). Para estimar los valores de la ecuación (13) se empleó el método de Montecarlo con el que se generaron 180000 realizaciones en cada una de las cuales se procedió a un muestreo con reposición a partir del conjunto de datos disponible. Los límites de confianza se fijaron en 99%. Los resultados obtenidos fueron comparados con los publicados por *Vidal y Cousillas (1982)* y con los obtenidos mediante el enfoque tradicional (Ecuación (12)).

Para el procesamiento estadístico de la información se empleó el paquete estadístico R (<http://www.r-project.org/index.html>), la hoja de cálculo Gnumeric (*Nash, 2010*) y la aplicación Hydrognomon (*Kozanis et al., 2005*).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como referencia para las condiciones hidroclimáticas de la región estudiada, el módulo pluviométrico anual registrado en la Estación Meteorológica de INTA Balcarce durante el período 1971 - 2012 es de 924,9 mm. A escala diaria, los meses con mayor variabilidad de precipitación y mayor registro de valores son los meses de febrero, marzo, abril, mayo, octubre y diciembre, respectivamente.

Se realizaron los tests "t" y "F" para verificar las diferencias de medias y desvíos estándares, respectivamente (*Montgomery y Runger, 1996*), ambos con un nivel de significancia de 0,01. Por medio de los mismos se comprobó que no hay diferencias entre medias ni entre desvíos estándares para el conjunto de datos de precipitación diaria del período 1972 - 1979 respecto a los registrados entre 1991 y 2006.

La Tabla 4, expone los valores de las variables ajustadas para la Ecuación (12) según el enfoque tradicional. Se destaca el alto valor del coeficiente de determinación (R^2). La Tabla 5 señala los valores de intensidad estimados para diferentes combinaciones de duración d y período de retorno T según el mencionado enfoque. De la misma forma, las tablas 6 y 7 exponen resultados análogos según el enfoque alternativo propuesto por *Koutsoyiannis et al. (1998)*. Complementariamente, las tablas 8 y 9 señalan los valores de los límites inferior y superior de los valores de la Tabla 7.

Tabla 4. Valores de parámetros de ajuste de la Ecuación (12) para curvas IDF según el procedimiento tradicional.

τ	ϵ	η	R^2
381,12	0,37	0,85	87 %

Tabla 6. Valores de parámetros de ajuste de la Ecuación (13)

λ	ψ	θ	η
7,21	2,85	0,001	0,858

Los resultados indican que, independientemente del método seleccionado, las estimaciones realizadas con la información del período 1991 - 2006 no se diferencian claramente de las propuestas por *Vidal y Cousillas (1982)*. Sin embargo existen ciertas evidencias que permiten comparar los resultados. Al cotejar los valores obtenidos por estos autores y los obtenidos aplicando el método tradicional, para la misma combinación de T y d , y aplicando el criterio de error señalado en la Ecuación (16), se obtiene un error de 0,4582. Mientras que al

compararlos con el enfoque conjunto, el error es de 0,3049. Este valor de error está aportando evidencias a favor de un mejor ajuste con este último método.

Los intervalos de confianza aportan información a la hora de la toma de decisiones prácticas. Los límites superiores estimados a partir del modelo propuesto por *Koutsoyiannis et al. (1998)* contienen a las estimaciones realizadas mediante el enfoque tradicional. En cambio los límites inferiores contienen parcialmente a los estimados por el enfoque tradicional, en general partir de $T = 25$ años. Se puede afirmar que, en general, las estimaciones realizadas según el enfoque conjunto engloban a las estimadas según el enfoque tradicional y que no existen evidencias concretas respecto a cambios significativos en los valores de intensidad de precipitación entre los períodos de tiempo analizados.

Respecto a los resultados presentados por *Vidal y Cousillas*, el enfoque propuesto por *Koutsoyiannis et al. (1998)* contempla dentro de sus límites inferiores a todos los valores superiores a $d = 5$ minutos. En cambio el límite superior sólo contiene a un limitado número de valores, particularmente a los asociados a d menor o igual a 30 minutos y los correspondientes a 90 y 180 minutos para valores de T mayores o iguales a 25 años. En consecuencia y tomando en cuenta los resultados

Tabla 5. Valores de intensidad de precipitación estimados según la Ecuación (12) para curvas IDF según el procedimiento tradicional.

d [minutos]	T [años]					
	2	5	10	25	50	100
5	126,0	176,9	228,6	320,8	414,6	535,8
15	49,7	69,7	90,1	126,5	163,5	211,3
30	27,6	38,8	50,1	70,3	90,9	117,5
60	15,4	21,6	27,9	39,1	50,5	65,3
90	10,9	15,3	19,8	27,7	35,8	46,3
180	6,1	8,5	11,0	15,4	19,9	25,7
360	3,4	4,7	6,1	8,6	11,1	14,3
720	1,9	2,6	3,4	4,8	6,2	8,0
1440	1,0	1,5	1,9	2,6	3,4	4,4

Tabla 7. Valores de intensidad de precipitación estimados según la Ecuación (13) para curvas IDF según el procedimiento generalizado.

d [minutos]	T [años]					
	2	5	10	25	50	100
5	193,5	261,7	306,7	363,7	406,0	448,0
15	75,9	102,6	120,3	142,7	159,3	175,7
30	41,9	56,7	66,5	78,9	88,0	97,1
60	23,2	31,3	36,7	43,5	48,6	53,6
90	16,4	22,1	25,9	30,8	34,3	37,9
180	9,0	12,2	14,3	17,0	18,9	20,9
360	5,0	6,7	7,9	9,4	10,5	11,5
720	2,7	3,7	4,4	5,2	5,8	6,4
1440	1,5	2,1	2,4	2,9	3,2	3,5

anteriormente expuestos, se puede afirmar que las estimaciones presentadas por Vidal y Cousillas sobreestiman parcialmente a los valores de intensidad, en relación con los propuestos según el enfoque de *Koutsoyiannis et al. (1998)* y el enfoque tradicional.

Parte del origen de las diferencias entre estimaciones puede atribuirse a la cantidad de datos disponibles, como principal limitante en la validez de los resultados. En el caso de *Vidal y Cousillas (1982)* la misma es inferior a la empleada en el presente trabajo. Las estimaciones para tiempos de retorno superiores a 30 años superan el límite de la información disponible para ambos casos debiendo ser consideradas como extrapolaciones a partir de la información disponible. También son extrapolaciones los resultados para valores de d menores a 30 minutos, o mayores 6 horas.

De los resultados obtenidos se puede destacar que la inclusión de la incertidumbre en las estimaciones permitió distinguir con claridad suficiente al enfoque propuesto por *Koutsoyiannis et al. (1998)* como el más adecuado para los datos analizados, ya que contiene a la mayoría de las estimaciones alternativas e

información histórica, y brinda información respecto a los límites aceptables para la aplicación de las estimaciones de intensidad de precipitación. En consecuencia, en este trabajo queda claro que el mencionado enfoque es el apto para ser considerado en futuros trabajos y cálculos derivados de la información pluviográfica, particularmente los desarrollados con fines de diseño hidráulico de obras civiles, donde se requiere de criterios concretos para la estimación de los límites de seguridad en su diseño y construcción.

Los resultados presentados permiten confirmar que la incertidumbre incorpora información a las estimaciones de las curvas IDF, aportando criterios adicionales para la correcta selección de los métodos de estimación y la evaluación de sus resultados.

Finalmente, puede afirmarse que el método de análisis conjunto propuesto por *Koutsoyiannis et al. (1998)* es más robusto en sus estimaciones que el enfoque tradicional, por analizar en conjunto a la información disponible, lo cual fue demostrado en la comparación de estos resultados con los históricos y los provenientes del enfoque tradicional.

Tabla 8. Intervalos de confianza para los valores estimados de curvas IDF según Ecuación (13). Límite inferior.

d [minutos]	T [años]					
	2	5	10	25	50	100
5	147,1	204,1	237,4	274,3	300,1	326,2
15	57,7	80,0	93,1	107,6	117,7	127,9
30	31,9	44,2	51,5	59,5	65,1	70,7
60	17,6	24,4	28,4	32,8	35,9	39,0
90	12,4	17,3	20,1	23,2	25,4	27,6
180	6,9	9,5	11,1	12,8	14,0	15,2
360	3,8	5,3	6,1	7,1	7,7	8,4
720	2,1	2,9	3,4	3,9	4,3	4,6
1440	1,2	1,6	1,9	2,2	2,4	2,6

Tabla 9. Intervalos de confianza para los valores estimados de curvas IDF según Ecuación (13). Límite superior.

d [minutos]	T [años]					
	2	5	10	25	50	100
5	225,9	340,1	417,1	509,9	574,5	635,8
15	88,6	133,4	163,6	200,0	225,4	249,4
30	49,0	73,7	90,4	110,5	124,5	137,8
60	27,0	40,7	49,9	61,0	68,8	76,1
90	19,1	28,8	35,3	43,1	48,6	53,8
180	10,5	15,9	19,5	23,8	26,8	29,7
360	5,8	8,8	10,7	13,1	14,8	16,4
720	3,2	4,8	5,9	7,2	8,2	9,0
1440	1,8	2,7	3,3	4,0	4,5	5,0

CONCLUSIONES

El presente trabajo expuso la validez de la aplicación de un procedimiento para calcular las curvas IDF para la localidad de Balcarce, que brindó un enfoque más consistente que el tradicionalmente empleado.

En este trabajo, la incertidumbre fue un factor clave para la selección del modelo final. Los límites de confianza fueron útiles para evaluar las diferencias entre las curvas IDF. La incertidumbre como criterio de selección permitió encontrar la mejor metodología de estimación. Los resultados permitieron identificar al enfoque conjunto como el más adecuado, ya que brinda información respecto a la incertidumbre asociada los mismos.

Se pudo corroborar, además, que la incertidumbre es un factor clave para la selección del modelo final de curva, demostrando la utilidad de los intervalos de confianza para evaluar las diferencias entre los distintos modelos.

El procesamiento conjunto permitió mejorar la estimación de las curvas IDF para la localidad de Balcarce, lo que

contribuirá a la toma de decisiones en futuros proyectos hidrológicos e hidráulicos.

En términos generales, puede afirmarse que el método de análisis conjunto es más robusto que el enfoque tradicional cuando la información disponible es reducida.

Finalmente, se recomienda el empleo del método de estimación conjunta de curvas IDF en trabajos con fines de diseño hidráulico de obras civiles, ya que aporta criterios para la estimación de los límites de seguridad en su diseño y construcción.

AGRADECIMIENTOS

A la Sra. Laura Malena, Observadora Meteorológica de la Estación Experimental Agropecuaria Balcarce, por la toma de datos, custodia y registro en formato digital.

Al Sr. Hernán Angelini, por proveer la figura de localización geográfica de la Estación Experimental Agropecuaria Balcarce.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

BEN-ZVI, A. 2009.

Rainfall intensity–duration–frequency relationships derived from large partial duration series. *Journal of Hydrology*, 367: 104-114.

BERTONI, J. C. 2004.

Rasgos físicos característicos de la Argentina. En: Bertoni, J. C. (Org.). *Inundaciones Urbanas en Argentina: 23-42. Global Water Partnership. Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.*

BEVEN, K., LEEDAL, D. Y ALCOCK, R. 2010.

Uncertainty and good practice in hydrological prediction. *Vatten*, 66: 159-163.

CHEN, C. I. 1983.

Rainfall intensity-duration-frequency formulas, *J. Hydraul. Eng.*, 109 (12): 1603-1621.

CHOW, V. T., MAIDMENT, D. Y MAYS, L. 1994.

Hidrología Aplicada. *McGraw-Hill Book Company, 1450 pp. Bogotá.*

DALLA SALDA, L.; SPALLETTI, L.; POIRÉ, D.; DE BARRIO, D.; ECHEVESTE, H. Y BENILAGO, A. 2006.

Tandilia. INSUGEO. *Temas de Geología Argentina. Serie correlación Geológica I, 21: 17-46.*

DINGMAN, S. L. 2002.

Physical Hydrology. *Prentice hall. 646 pp. New Jersey.*

GÓMEZ CAFFARENA, C. 1988.

Hacia el conocimiento de la intensidad máxima absoluta de las precipitaciones atmosféricas. Una deducción más de la curva idf. *Barcelona-Fabra. Revista de Obras Públicas, 135 (3269): 577-598.*

INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGÍA AGROPECUARIA (INTA). 1989.

Mapa de Suelos de la Provincia de Buenos Aires. *Escala 1: 500.000. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca, 550 pp. Buenos Aires.*

KOUTSOYIANNIS, D.; KOZONIS, D. Y MANETAS, A. 1998.

A mathematical framework for studying rainfall intensity-duration-frequency relationships. *Journal of Hydrology* 206: 118-135.

Kozanis, S.; Christofides, A.; Mamassis, N.; Efstratiadis, A. y Koutsoyiannis, D. 2005.

Hydrognomon. A hydrological data management and processing software tool. *European Geosciences Union General Assembly, Geophysical Research Abstracts, Vol 7: 04644.*

- MAZA, J. A. Y BERTONI, J. 2004.
Evaluación final y recomendaciones.
En : Bertoni, J. C. (Org.) *Inundaciones Urbanas en Argentina: 235-248. Global Water Partnership. Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.*
- MONGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. 1996.
Probabilidad y Estadística Aplicada a la Ingeniería.
Mc Graw Hill. pp: 1006. New York.
- MOREYRA, A.; PURICELLI, M., MERCADER, A., REY, I. CÓRDOBA, J. Y MARSANS, N.
El acceso al agua de los agricultores familiares de la región pampeana: un análisis multidimensional.
Mundo Agrario, 12 (24). 2012. Disponible en <http://www.mundoagrario.unlp.edu.ar/article/view/v12n24a09>, último acceso 20 de septiembre de 2013.
- NASH, J. 2010.
"Directions for open source software over the next decade".
Futures vol. 42: 427-433.
- OVEREEM, A. ; BUSHAND, A. Y HOLLEMAN, I. 2008.
Rainfall depth-duration-frequency curves and their uncertainties.
Journal of Hydrology, 348: 124-134.
- PAPPENBERGER, F. Y BEVEN, K. J. 2006.
Ignorance is bliss: Or seven reasons not to use uncertainty analysis.
Water Resources Research, Vol. 42: W05302, doi:10.1029/2005WR004820.
- PURICELLI, M. Y MOREYRA, A. 2012.
Protocolo de Relevamiento de la Infraestructura Hídrica. Su aplicación en viviendas y emprendimientos agropecuarios Familiares de áreas periurbanas y rurales de la Región Pampeana.
Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria; 33pp. Buenos Aires.
- RUSSO, A.; FERELLO, R. Y CHEBLI, G. 1979.
Llanura Chaco Pampeana.
Segundo Simposio de Geología Regional Argentina, (1): 139-183.
- STEDINGER, J. R.; VOGEL, R. M. Y FOULFULA-GEORGIU, E. CHAPTER
18: Frequency analysis of Extreme Events.
Maidment, D. R. (Ed.). Handbook of Hydrology. Mc Graw Hill, 850 pp. New York.
- SUERO, E. E.; SANTA CRUZ, J. N.; SILVA BUSSO, A.; DELLA MAGGIORA, A. I.; YRIGOYEN, A. I., COSTA, J. L. Y GARDIOL, J. M. 2002.
"Caracterización de los recursos naturales en sistemas bajo riego del Sudeste Bonaerense".
Rev. Inv. Agrop. 30 (1): 71-90.
- VAN DE VYVER, H. Y DEMARÉE, G. R. 2010.
Construction of Intensity-Duration-Frequency (IDF) curves for precipitation at Lubumbashi, Congo, under the hypothesis of inadequate data.
Hydrological Sciences Journal, 55(4): 555 – 564.
- VÁZQUEZ, R.; REDAÑO, A. Y LORENTE, J. 1987.
Curvas IDF. Barcelona - Fabra.
Revista de Obras Públicas, 134 (3261): 91-102.
- VIDAL, N. A. Y COUSILLAS, C. F. 1982.
Análisis de las precipitaciones del sudeste bonaerense. I: Período de retorno esperado para lluvias máximas.
Editorial EUDEM; Universidad Nacional de Mar del Plata; pp: 41. Mar del Plata.