

## Nuevas curvas intensidad-duración-frecuencia de precipitación para el departamento de Montevideo, Uruguay

Silveira Luis<sup>1</sup>, Usera Gabriel<sup>1</sup>, Alonso Jimena<sup>1</sup>, Scavone Martín<sup>1</sup>, Chreties Christian<sup>1</sup>, Perera Gonzalo<sup>2</sup>, González Meliza<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República. J. Herrera y Reissig 565, 11200 Montevideo, Uruguay. Correo electrónico : lesy@fing.edu.uy*

<sup>2</sup>*Instituto de Matemática y Estadística, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República. J. Herrera y Reissig 565, 11200 Montevideo, Uruguay.*

Recibido: 27/8/13 Aceptado: 10/2/14

### Resumen

Las curvas intensidad-duración-frecuencia utilizadas en Uruguay se basan, según el autor, en información pluviográfica registrada entre 1906 y 1990. La disponibilidad de datos de las últimas décadas y la percepción generalizada que indica una tendencia creciente en la frecuencia de las precipitaciones intensas registradas en este último período, motivan la necesidad de actualizar las curvas intensidad-duración-frecuencia del Uruguay. La actualización hasta 2005 de la curva del Departamento de Montevideo no generó diferencias significativas. Los cuantiles de precipitación extrema para todas las duraciones no variaron en más de 5 % respecto de sus correspondientes de la serie histórica. No obstante, si se considera solamente el período 1981-2005, las curvas mostraron una disminución en los valores de intensidades máximas de precipitación de entre 10 y 20 % para períodos de retorno medio, excepto para eventos de corta duración, entre 1 hora hasta 20 minutos, en que se constató un aumento de igual magnitud al observado para las intensidades máximas correspondientes a períodos de retorno medios.

**Palabras clave:** eventos extremos, tormenta de diseño

### Summary

## New Rainfall Intensity-duration-frequency Curves for the Department of Montevideo, Uruguay

The intensity-duration-frequency curves used in Uruguay are based, according to the author, in recording raingauges data recorded between 1906 and 1990. The availability of data from the last decades and the widespread perception that indicates an increasing trend in the frequency of heavy rainfall events recorded in these last decades, are the main reason to update the intensity-duration-frequency curves used in Uruguay. The update until 2005 of the curves for the Department of Montevideo had no generated significant differences. Extreme rainfall quantiles for all durations did not vary by more than 5 % from their corresponding values of the historic series. However, by analyzing only the 1981-2005 period, the curves showed a decrease between 10 and 20 % in peak intensity values of rainfall for average return periods, except for short duration events, from 1 hour to 20 minutes, where an increase of equal magnitude was found.

**Keywords:** extreme events, storm design

## Introducción

El diseño de obras hidráulicas requiere como dato de entrada, entre otros, la tormenta de diseño, que se construye a partir de las curvas intensidad-duración-frecuencia (en adelante, IDF). Las curvas IDF utilizadas a nivel nacional fueron desarrolladas por Rodríguez Fontal (1980), tomando como base información de la red nacional de pluviómetros y pluviómetros, correspondiente al período comprendido entre 1906 y 1974. Su trabajo dividió el Uruguay en ocho subregiones, para las cuales desarrolló fórmulas que relacionan intensidad de lluvia, duración, período de retorno y riesgo. Posteriormente, Genta *et al.* (1998) transformaron las fórmulas de Rodríguez Fontal (1980) en un mapa de isoyetas de tres horas de duración y 10 años de período de retorno, conjuntamente con ecuaciones que permiten calcular coeficientes de corrección según el período de retorno y la duración. Además, para el Departamento de Montevideo, se utiliza la expresión conocida como «Ley de Montana», desarrollada en el marco del Plan Director de Saneamiento de Montevideo, de la Intendencia de Montevideo (IMM, 1994). Esta ley extendió la serie de información utilizada por Terra (1977a; 1977b), consistente en datos de la Estación Meteorológica Prado correspondientes al período 1912-1972, ampliándola al período 1912-1990.

El tiempo transcurrido desde la realización de las curvas IDF de Rodríguez Fontal (1980) y/o la Ley de Montana (IMM, 1994), los trabajos que indican una tendencia creciente en la frecuencia de las precipitaciones intensas al menos desde la década de 1950, y especialmente en la última década del siglo pasado (Bidegain *et al.*, 2012; Caffera, 2003; Genta y Chreties, 2004; IMFIA, 2003; Mechoso y Pérez Iribarren, 1992; Silveira, 2004) y la percepción de los usuarios de dicha información, motivan la necesidad de actualizar las curvas IDF del Uruguay, con base en la información que actualmente dispone la Dirección Nacional de Meteorología. Este trabajo presenta la actualización de la curva IDF del Departamento de Montevideo, como primer paso hacia la actualización de las curvas IDF nacionales, y compara, para eventos de diferentes duraciones, los valores generados en la actualización con los resultantes de los trabajos de Rodríguez Fontal (1980) y Ley de Montana (IMM, 1994) utilizados hoy en día.

## Materiales y métodos

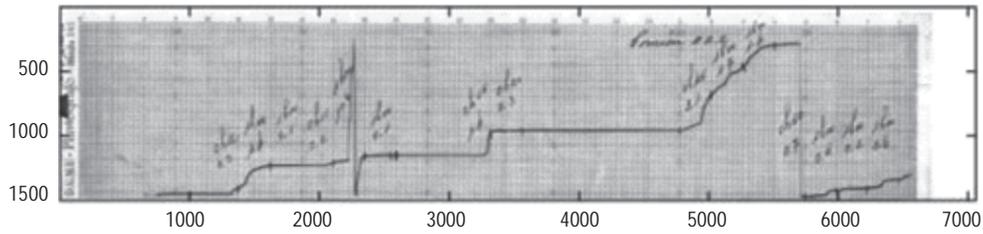
### Información de base

Para la realización de este trabajo se dispuso de las series de máximos anuales de precipitación para duracio-

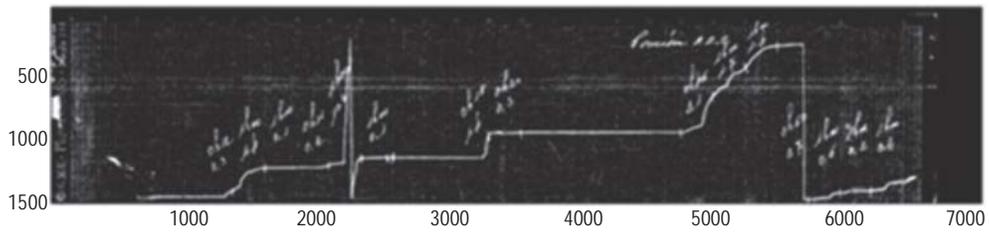
nes de 1, 2, 3, 6, 12 y 24 horas y para eventos de corta duración (10, 20 y 30 minutos), correspondientes a los períodos 1906-1974 y 1913-1974, respectivamente. Dichas series fueron las utilizadas por Rodríguez Fontal (1980). Estas se ampliaron, digitalizando y procesando las bandas pluviográficas de la Estación Meteorológica Prado (en adelante, EM Prado), sita en el Departamento de Montevideo, que registraron precipitaciones de al menos 1 mm de lluvia en 24 horas entre 1969 y 2005, excepto los años con falta de datos (1971, 1975, 1976, 1977, 1978, 1979, 1980, 2000); con lo que se obtuvo una serie de 29 años de datos. La serie histórica de dicha estación finaliza en 2005, debido a que desde ese año se carece de pluviógrafo en la EM Prado.

### Digitalización de bandas pluviográficas de la EM Prado

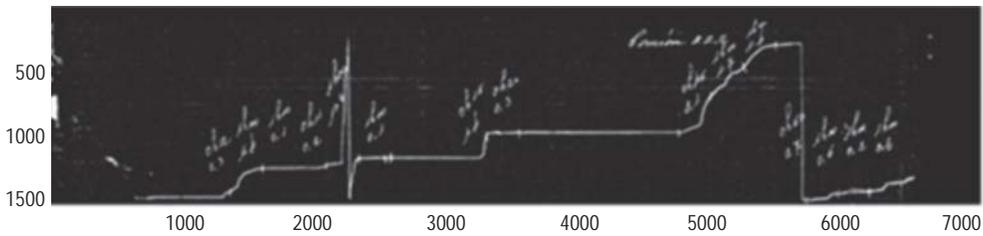
La digitalización de bandas consistió de las siguientes etapas: i) escaneo de ambas caras de cada banda, registrando en el anverso las fechas de colocación y retiro, utilizando un scanner de alta productividad; ii) desarrollo de un código computacional para el ingreso de fechas, que permitió ingresar los datos en el anverso de cada banda, para generar una base de datos de fechas correspondientes a cada banda digitalizada; iii) desarrollo de algoritmos de segmentación de la imagen escaneada cruda (Figura 1), pasando a una imagen en blanco y negro que retiene únicamente las porciones que contienen información relativa a la traza del pluviógrafo, para posteriormente realizar el seguimiento de esta traza y obtener la salida numérica. La primera etapa consistió en una segmentación cromática estadística, que produjo una imagen con alto contenido de ruido y la presencia de caracteres manuscritos que existían en el registro original (Figura 2). A continuación se aplicó un filtro basado en la comparación con un banco de imágenes testigo y con el descarte de regiones de píxeles de pequeño tamaño (Figura 3); seguidamente se aplicó un segundo conjunto de algoritmos, para la detección por forma y color de los caracteres manuscritos, lo que permitió extraerlos dejando una imagen más limpia (Figura 4). Finalmente, un tercer conjunto de algoritmos permitió realizar el tracking de la curva del pluviógrafo (Figura 5), una vez que las principales patologías fueron removidas. Una etapa final de control de calidad del resultado y detección de errores permitió la mejora iterativa del resultado volviendo a interrogar la imagen original en las zonas donde se dispararon alarmas de baja calidad de la traza. El procedimiento descrito guarda similitudes con el trabajo de Piggelen *et al.* (2011).



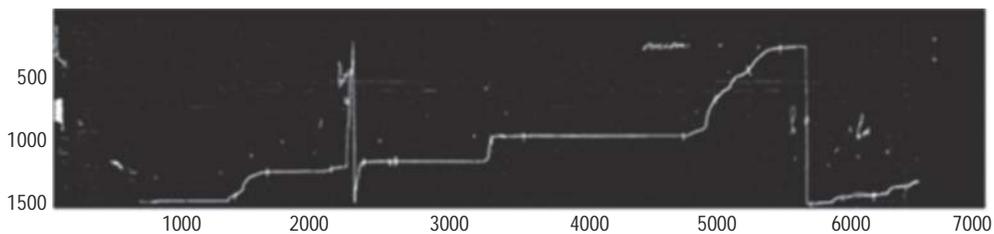
**Figura 1.** Imagen cruda de una típica banda de pluviógrafo.



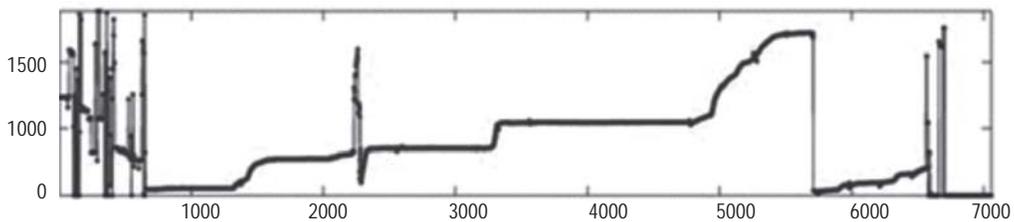
**Figura 2.** Segmentación de la imagen cruda escaneada, con alto contenido de ruido y presencia de caracteres manuscritos existentes en la imagen original.



**Figura 3.** Resultado después de una comparación con un banco de imágenes testigo y consecuente descarte de regiones de píxeles de pequeño tamaño.



**Figura 4.** Resultado luego de aplicar un conjunto de algoritmos para la detección por forma y color de los caracteres manuscritos, y extracción para la obtención de una imagen más limpia.



**Figura 5.** «Tracking» de la curva del pluviógrafo, una vez que las principales patologías fueron removidas.

### Procesamiento de las bandas digitalizadas

El procesamiento de las bandas digitalizadas constó a su vez de dos etapas: i) desarrollo de la aplicación Curve Explorer, ii) procesamiento de la base de datos. La primera consistió en la aplicación de un módulo desarrollado sobre Matlab que permite ingresar manualmente y en forma gráfica líneas poligonales que siguen la traza identificada por el operador en la banda escaneada que se despliega en pantalla. Esta experiencia resultó positiva para el procesamiento de conjuntos acotados de imágenes y permitió elaborar una base de referencia para la validación de los algoritmos de procesamiento automático. La segunda etapa consistió en un procesamiento de cada imagen, resultando una estructura Matlab compuesta de un registro para cada banda, o período de 24 horas de cada estación. Estos registros cuentan con cinco campos alfanuméricos: tres campos numéricos corresponden a la fecha, en forma de año, mes y día; un campo alfanumérico descriptivo indica en cada caso las unidades de los datos, correspondiendo a «mm de lluvia acumulados en períodos de un minuto»; y un quinto campo vectorial contiene la serie temporal de datos para el día correspondiente al registro, conteniendo en total 1560 datos, uno por cada minuto desde la hora 6 del día de la fecha hasta la hora 8 del día siguiente. Normalmente los registros discurren de la hora 7 a la hora 7 del día siguiente, pero existen excepciones en los casos de bandas que permanecen colocadas más de un día y/o cuando el cambio de banda no se produce exactamente las 7 de la mañana.

Una vez obtenida la base de datos resultante del proceso de digitalización y procesamiento descrito, se procedió a extraer las series de máximos anuales para diferentes duraciones. Para ello, se efectuó una conversión de la serie continua de datos a una serie de acumulados, utilizando ventanas móviles, de ancho igual a cada duración (d). Ello implicó efectuar un reconocimiento de bandas contiguas a través de una rutina de Matlab, para detectar eventos de duración mayor a 24 horas. La salida de esta etapa se almacenó en una estructura, con los mismos campos de la estructura original, para la cual se computó la precipitación acumulada en ventanas móviles de duración d= 5, 10, 20 y 30 minutos, y 1, 2, 3, 6, 12 y 24 horas. Por último, se extrajo para cada año la precipitación máxima de cada duración d.

### Análisis de consistencia de la información pluviográfica

La consistencia de la información digitalizada de la EM Prado se analizó mediante la comparación de los registros pluviográficos con los registros pluviométricos de la misma

estación. Esta se realizó comparando los acumulados diarios de pluviómetro con los acumulados diarios a partir de los registros pluviográficos con ventana fija (7 a 7 am), para todos los días correspondientes a bandas pluviográficas digitalizadas.

Además, se analizó la correlación de fechas de ocurrencia de los máximos anuales de todas las duraciones. Este análisis permitió detectar la existencia de tres grupos de coincidencia: 1) 24 y 12 h; 2) 6, 3 y 2 h y 3) 1 h, 30 min, 20 y 10 min. Seguidamente se aplicó un criterio cualitativo de validación de los eventos máximos anuales por duración, que se expone en la Figura 6.

### Actualización de las curvas IDF para Montevideo

Aparicio Mijares (1989) reúne los enfoques tradicionalmente aplicados para la determinación de las curvas IDF. Según este autor, existen básicamente dos métodos: i) intensidad-período de retorno, que relaciona estas dos variables para cada duración por separado, mediante algunas de las funciones de distribución de probabilidad utilizadas en hidrología para eventos extremos; ii) familia de curvas, que relaciona simultáneamente las tres variables mediante ecuaciones de la forma:

$$i(T_r, d) = \frac{k \cdot T_r^m}{(d+c)^n} \quad [1]$$

Una ecuación similar plantean Chow *et al.* (1994):

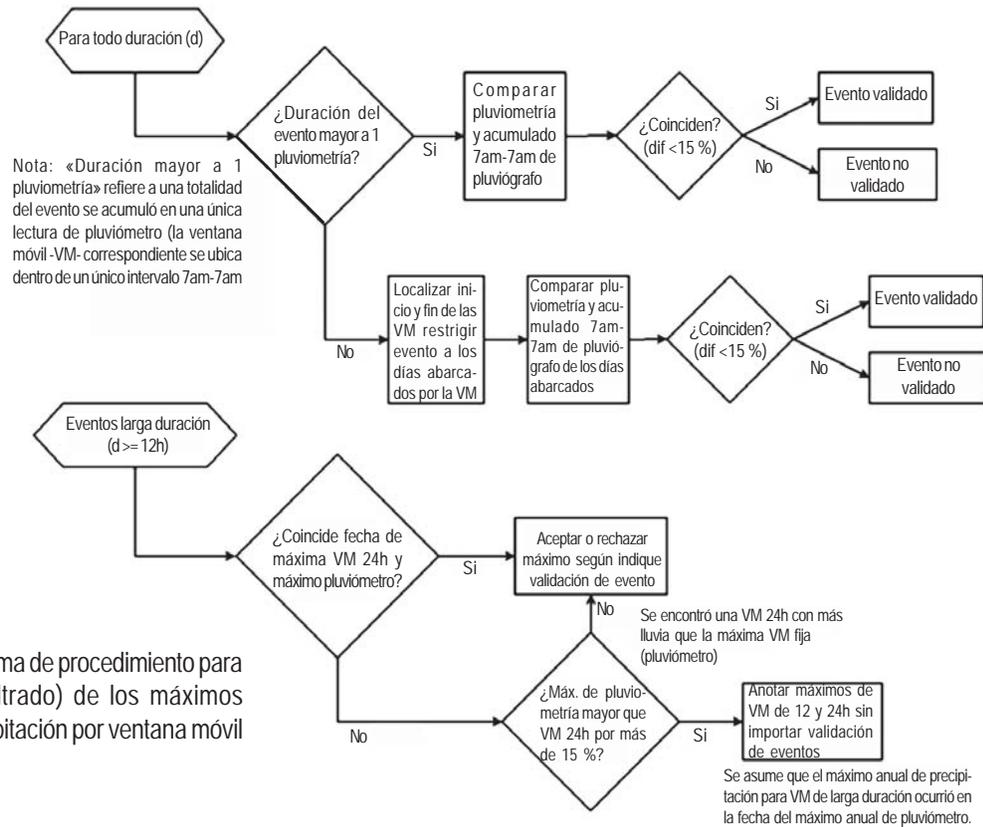
$$i(T_r, d) = \frac{c \cdot T_r^m}{d^p + f} \quad [2]$$

En ambos casos,  $i$  representa la intensidad,  $T_r$  el período de retorno y  $d$  la duración. Las constantes de las ecuaciones [1] y [2] ( $k, m, n, c, p$  y  $f$ ) se calculan mediante un análisis de correlación lineal múltiple.

En el ámbito nacional, Rodríguez Fontal (1980) desarrolló fórmulas que relacionan intensidad de lluvia, duración, período de retorno y riesgo:

$$P_i(T_r, r) = \varepsilon_i \left( 1 + K_i \log_{10} \left( \frac{1}{1 - (1-r)^{T_r}} \right) \right) \quad [3]$$

Siendo:  $P_i(T_r, r)$  la precipitación máxima en una duración  $t$  correspondiente a un período de retorno  $T_r$ ; a menos de un riesgo  $r$ ;  $\varepsilon_i$  y  $K_i$  parámetros que surgen del ajuste de los máximos anuales a una distribución del tipo Gumbel (distribución de valores extremos tipo 1) (Chow *et al.*, 1994).



**Figura 6.** Diagrama de procedimiento para la validación (filtrado) de los máximos anuales de precipitación por ventana móvil (VM).

Pizarro *et al.* (2003) determina las curvas IDF para zonas semiáridas de Chile Central y Zamanillo *et al.* (2008) para la Provincia de Entre Ríos, Argentina. En ambos casos aplican la metodología de la familia de curvas (Aparicio Mijares, 1989), adoptando la distribución de Gumbel.

Por otra parte Koutsoyiannis *et al.* (1998) proponen una expresión general para la relación Intensidad-Duración-Frecuencia, de la forma:

$$I(T_r, d) = \frac{\alpha(T_r)}{(d + \theta)^\eta} \quad [4]$$

Siendo:  $I(T_r, d)$  la intensidad de la lluvia (mm/hora) para un período de retorno  $T_r$  y duración  $d$ ;  $\theta$  y  $\eta$  parámetros que se ajustan mediante cálculo numérico, mientras que  $\alpha(T_r)$  adquiere una expresión analítica en base a la función de distribución seleccionada.

Los principales antecedentes nacionales utilizados actualmente, que fueron reseñados en la introducción, adoptaron la distribución de Gumbel para el cálculo de las IDF nacionales. En ese caso, para datos cuyo comportamiento sigue la ley de Gumbel,  $\alpha(T_r)$  tiene la siguiente expresión:

$$\alpha(T_r) = \mu - \alpha \ln \left( \ln \left( \frac{T_r}{T_r - 1} \right) \right) \quad [5]$$

En esta expresión,  $\mu$  y  $\alpha$  se calculan de la media y la desviación estándar del conjunto de datos de base.

En función de estos antecedentes, la metodología aplicada para la actualización de las curvas IDF del departamento de Montevideo constó de las siguientes etapas:

1) Reconstrucción de las curvas IDF de Rodríguez Fontal (1980) y validación de la metodología de Koutsoyiannis *et al.* (1998), para los períodos 1906-1974 en lo que refiere a duraciones mayores o iguales a 1 hora y 1913-1974 para duraciones menores a 1 hora. Para ello, se ajustaron las series de máximos anuales a una distribución de Gumbel, levantando la simplificación realizada por Rodríguez Fontal (1980), (que aproximó la función doble logarítmica de la distribución a una función simple logarítmica limitado por las disponibilidades computacionales de la época). En ambos trabajos, original y reconstrucción, se aplicó la fórmula de Weibull (Chow *et al.*, 1994) para el cálculo de probabilidades empíricas correspondientes a los datos observados. Seguidamente se aplicó el método de cálculo propuesto

por Koutsoyiannis *et al.* (1998), a efectos de validarlo para su aplicación en la actualización de las curvas IDF.

2) Actualización de las curvas IDF del Departamento de Montevideo con base en máximos anuales correspondientes al período 1906-2005. En primer lugar se ajustó la ley de Gumbel para cada una de las duraciones consideradas. Posteriormente, se distinguió entre eventos cortos (duración < 1 hora) y eventos largos (duración > 1 hora), y se implementó la metodología de Koutsoyiannis *et al.* (1998).

3) Determinación de las curvas IDF con base en máximos anuales correspondientes al período 1975-2005, para analizar eventuales incrementos en la intensidad de los eventos registrados en las últimas décadas, aplicando la misma metodología descrita en el punto anterior.

En todos los casos, se aplicaron las pruebas de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov y Anderson-Darling (Anderson y Darling, 1954; Aparicio Mijares, 1989; Stephens, 1977; Stedinger *et al.*, 1993)

## Resultados y discusión

### Análisis de consistencia de la información pluviográfica (1975-2005)

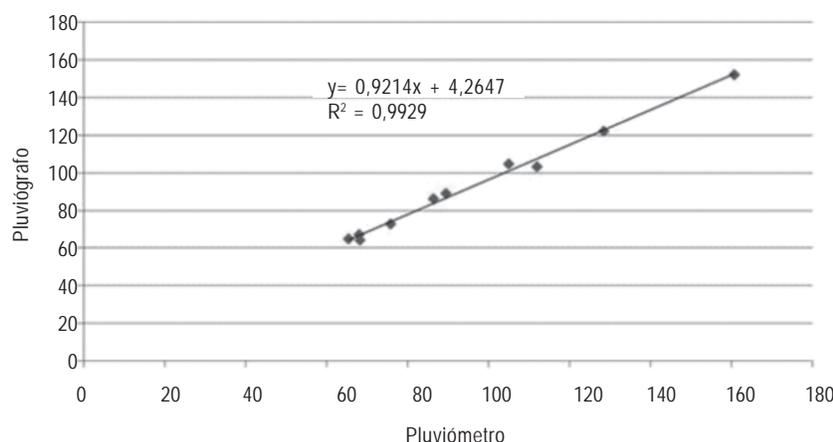
De la comparación pluviómetro-pluviógrafo en la EM Prado surgió que en los 25 años del período común de datos registrados en ambos instrumentos, dichos máximos coinciden por fecha en 16 años, en otros siete no existe la banda de la fecha del máximo, y en los restantes dos el pluviógrafo tuvo otro registro mayor en distinta fecha (posible mal funcionamiento del equipo en la fecha del máximo).

Los valores de serie coincidentes presentaron diferencias mayores al 15 % en seis de los 16 años. La correlación entre las parejas con diferencias menores al 15 % se presenta en la Figura 7, de la que resulta que el pluviógrafo subestimó los máximos registrados en un 7,9 %. Este resultado es coherente con lo obtenido en otros estudios en que se comparó la relación pluviómetro-pluviógrafo (PROHIMET, 2012).

Aplicando el algoritmo de la Figura 6, se extendieron las series de máximos anuales de la EM Prado con los máximos correspondientes al período 1975-2005, extraídos de las bandas de pluviógrafo barridas por ventana móvil. El Cuadro 1 muestra los resultados de la extensión de las series de máximos anuales para cada duración.

**Cuadro 1.** Longitud de las series de máximos anuales resultantes de los registros pluviográficos en la Estación Meteorológica Prado.

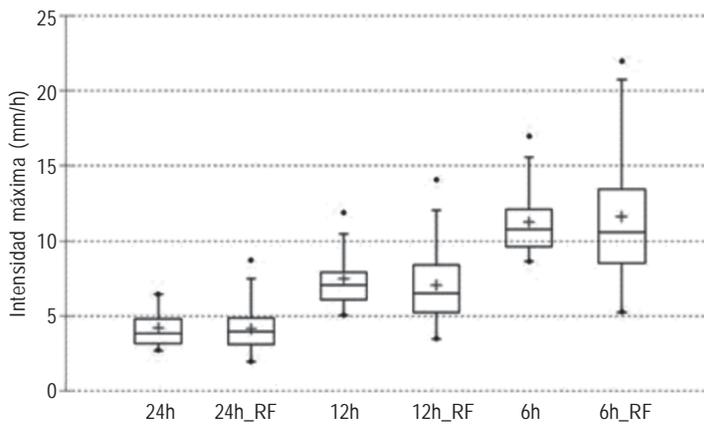
Duración	Longitud hasta 1974 (años)	Longitud hasta 2005 (años)
24 h	69	80
12 h	69	80
6 h	69	86
3 h	69	87
2 h	69	85
1 h	69	86
30 min	57	73
20 min	57	73
10 min	57	73



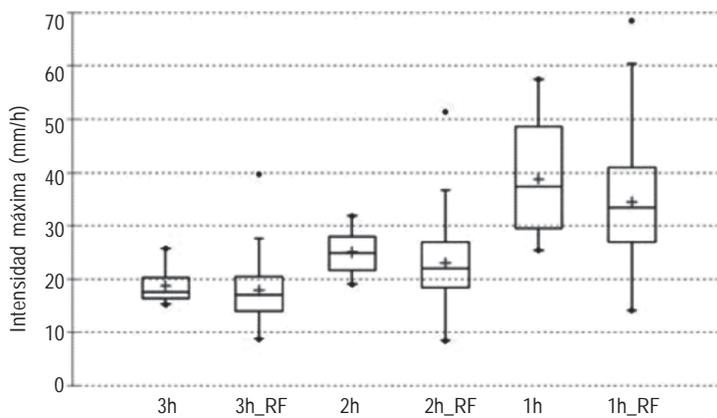
**Figura 7.** Relación entre los registros máximos anuales de pluviometría, medidos en el pluviómetro y pluviógrafo de la Estación Meteorológica Prado.

Los diagramas «box-plot» de las Figuras 8 a 10 resumen la descripción estadística de las series de información del período original y del período extendido, para todas las duraciones. Estos diagramas permiten interpretar la dispersión de los datos utilizando la mediana, los percentiles 25 y 75 y los valores máximos y mínimos; también propor-

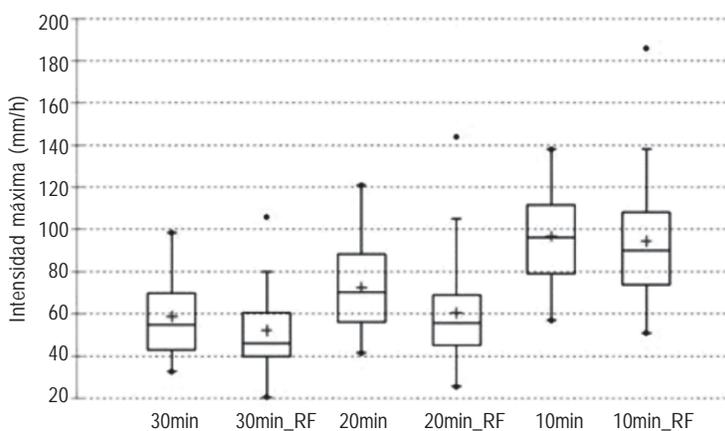
cionan una visión general de la simetría de la distribución de los datos y muestran la presencia de valores atípicos (outliers). En particular, se observa que la media y mediana tienden a ser mayores para duraciones menor o igual a dos horas para el período más reciente (1975-2005), en comparación con el antecedente histórico (1906-1974).



**Figura 8.** Estadísticas de los máximos anuales de pluviometría de 24, 12 y 6 horas de duración, en el período 1906-1974 (RF=Rodríguez Fontal) y 1975-2005.



**Figura 9.** Estadísticas de los máximos anuales de pluviometría de 3, 2 y 1 hora de duración, en el período 1906-1974 (RF=Rodríguez Fontal) y 1975-2005.



**Figura 10.** Estadísticas de los máximos anuales de pluviometría de 30, 20 y 10 minutos de duración, en el período 1906-1974 (RF=Rodríguez Fontal) y 1975-2005.

### Reconstrucción de las curvas IDF de Rodríguez Fontal y validación de la metodología de Koutsoyiannis *et al.*

En el Cuadro 2 se explicitan los valores de los parámetros de la distribución de Gumbel obtenidos de la reconstrucción de las curvas de Rodríguez Fontal (1980) para las series de máximos anuales en el período 1906-1974, así como los obtenidos originalmente por dicho autor (utilizando la simplificación del doble logaritmo). Los parámetros  $\varepsilon_t$ ,  $K_t$  corresponden a la formulación propuesta por Rodríguez Fontal (1980), ecuación 1, siendo el primero comparable con el parámetro  $\mu$  de la distribución de Gumbel. Aplicando las pruebas de bondad de ajuste se obtuvo que la hipótesis fue aceptada para todas las duraciones por las pruebas Kolmogorov-Smirnov y Anderson-Darling.

A modo de ejemplo, en el Cuadro 3 se comparan, para diferentes períodos de retorno, los valores de precipitación de la reconstrucción de la curva intensidad-frecuencia, para una duración de tres horas, utilizando los datos del período 1906-1974, con los resultantes de aplicar la formulación de Rodríguez Fontal (1980). La última columna expresa el «error» de la reconstrucción, tomando como cierto el valor de Rodríguez Fontal (1980), por ser estos los que se utilizan actualmente. La diferencia máxima en la comparación se da para los períodos de retorno menores, allí donde la simplificación del doble logaritmo realizada por Rodríguez Fontal (1980) tiene mayor incidencia; mientras que para períodos de retorno mayor o igual a 10 años es menor o igual a 1 %.

**Cuadro 2.** Parámetros de la distribución de Gumbel: originales de la forma simplificada de Rodríguez Fontal (1980) y calculados sin simplificación.

Duración	Parámetros originales (Rodríguez Fontal, 1980)		Parámetros Gumbel (calculados)	
	$\varepsilon_t$	$K_t$	$\mu$	$\alpha$
24 h	83,2	0,774	83,22	27,97
12 h	70,7	0,770	71,07	23,55
6 h	58,3	0,770	58,46	19,45
3 h	45,0	0,791	44,96	15,45
2 h	39,3	0,728	38,88	12,23
1 h	29,1	0,718	29,26	9,02
30 min	22,0	0,733	22,01	7,00
20 min	17,0	0,721	17,05	5,34
10 min	13,5	0,687	13,45	4,01

**Cuadro 3.** Comparación entre la curva intensidad-frecuencia ( $T_r$ ) original de Rodríguez Fontal (1980) y su reconstrucción, sin simplificación logarítmica, para una duración de tres horas.

Tr (años)	Duración: 3 h		Error (%)
	Precipitación (mm)		
	Rodríguez Fontal	Reconstrucción	
2	55,72	50,62	-9,14
5	69,88	68,13	-2,50
10	80,60	79,72	-1,08
20	91,31	90,84	-0,51
25	94,76	94,37	-0,41
50	105,47	105,24	-0,23
100	116,19	116,02	-0,14

Seguidamente, se ajustó la distribución de Gumbel para la misma serie de precipitaciones máximas anuales, aplicando las relaciones propuestas por Koutsoyiannis et al. (1998). Combinando las ecuaciones [4] y [5] se obtuvo la relación [6], válida para duraciones mayores o iguales a 1 hora.

$$I(T_r, d) = \frac{32.68 - 12.61 \ln \left[ \ln \left( \frac{T_r}{T_r - 1} \right) \right]}{(d + 0.46)^{0.775}} \quad [6]$$

En el Cuadro 4 se comparan los valores numéricos de la precipitación de tres horas de duración calculados originalmente por Rodríguez Fontal (1980) con los resultantes de aplicar la ecuación [6], obtenida por el método de Koutsoyiannis *et al.* (1998), con base en la serie de datos correspondientes al período 1906-1974. La última columna del Cuadro 4 indica el error que se comete con el método de Koutsoyiannis *et al.* (1998), tomando como referencia el resultante de Rodríguez Fontal (1980). Las diferencias resultantes no son significativas, siendo inferiores al 1,5 % para periodos de retorno mayor o igual a 10 años, lo cual valida la metodología propuesta. La diferencia máxima en la comparación se da en el entorno a los dos años de período de retorno, por la incidencia de la simplificación aplicada por Rodríguez Fontal (1980).

#### Actualización de las curvas IDF con base en máximos anuales 1906-2005

En el Cuadro 5 se presentan los valores de los parámetros de la distribución de Gumbel obtenidos para cada una de las series de máximos anuales extendidas al período

**Cuadro 5.** Parámetros de la distribución de Gumbel calculados para las series extendidas 1906-2005 (1 a 24 horas) y 1913-2005 (10 a 30 minutos).

Dur	$\mu$	$\alpha$
24 h	83,7804	27,2010
12 h	72,0812	22,9457
6 h	58,8304	18,0710
3 h	46,2079	14,1242
2 h	40,1458	11,3866
1 h	30,1626	8,9509
30 min	22,6431	7,1532
20 min	17,7161	5,6419
10 min	13,6634	3,7978

1906-2005, para duraciones entre una a 24 horas, y 1913-2005 para duraciones entre 10 a 30 minutos. Para verificar la bondad de ajuste de la distribución de Gumbel se aplicaron las pruebas de Kolmogorov-Smirnov y Anderson-Darling. En la primera la hipótesis fue aceptada en todos los casos, mientras que en la segunda fue rechazada únicamente en la duración 3 h.

Los valores de precipitación de las curvas IDF, para las duraciones consideradas y diferentes períodos de retorno, resultantes de la serie extendida, se compararon con los originales de Rodríguez Fontal (1980) para el período 1906-1974 y con los obtenidos de las ecuaciones de la Ley de Montana en el período 1912-1990 (IMM, 1994). A modo de ejemplo, en el Cuadro 6 se presentan las diferencias encontradas para eventos de tres horas de duración.

**Cuadro 4.** Comparación entre las curvas intensidad-frecuencia ( $T_r$ ) original de Rodríguez Fontal (1980) y calculada por el método de Koutsoyiannis *et al.* (1998), para una duración de tres horas.

Tr (años)	Duración: 3 h		Error (%)
	Precipitación (mm)		
	Rodríguez Fontal	Koutsoyiannis	
2	55,72	51,23	-8,06
5	69,88	68,13	-2,50
10	80,60	79,33	-1,57
20	91,31	90,07	-1,36
25	94,76	93,47	-1,36
50	105,47	103,97	-1,43
100	116,19	114,38	-1,55

**Cuadro 6.** Precipitación máxima según el período de retorno ( $T_r$ ), para eventos de 3 horas de duración. Comparación entre Rodríguez Fontal (1980), Ley de Montana (IMM, 1994) y actualización (1906-2005).

Tr (años)	Rodríguez Fontal 1906-1974 (mm)	Ley de Montana 1912 - 1990 (mm)	Actualización 1906-2005 (mm)	Diferencia entre la actualización y la ley de Montana(%)	Diferencia entre la actualización y Rodríguez Fontal (%)
2	50,62	50,16	51,38	2,45%	1,50%
5	68,13	69,70	67,39	-3,31%	-1,08%
10	79,72	82,66	77,99	-5,65%	-2,17%
20	90,84	95,10	88,16	-7,29%	-2,95%
25	94,37		91,38		-3,16%
50	105,24		101,32		-3,72%
100	116,02		111,18		-4,17%

Puede observarse que, para eventos de tres horas de duración, la incorporación de los últimos 30 años al análisis no generó diferencias significativas en cuanto a estadística de tormentas extremas refiere; los valores de precipitación extrema no han variado en más de 5 % respecto de sus correspondientes de las curvas de Rodríguez Fontal (1980). Asimismo, esta observación es válida para todas las duraciones de eventos, entre 10 minutos y 24 horas, que fueron consideradas en el estudio. En cambio, las diferencias con la Ley de Montana fueron más acentuadas en comparación con las curvas de Rodríguez Fontal (1980), alcanzando hasta 15,2 % para eventos de una hora de duración y 20 años de período de retorno. Estas diferencias pueden explicarse en una parte por la metodología de ambos trabajos. En efecto, tanto Rodríguez Fontal (1980) como la presente actualización consideran el evento extremo registrado cada año, para cada duración; en tanto, la Ley de Montana adopta para la selección de eventos umbrales arbitrarios para cada duración y, seguidamente, selecciona los 30 mayores para el cálculo de las curvas IDF. Esta forma de selección de eventos presenta un sesgo, tal que en la actualización del trabajo de Terra (1977a; 1977b), cuando incorpora el período de datos 1973-1990, tan solo considera, dependiendo de la duración, entre cuatro y nueve datos de los 18 años de registros disponibles (IMM, 1994). Esto asigna mayor peso, por ejemplo décadas extremadamente lluviosas, mientras que la selección de extremos anuales toma en cuenta las variaciones interanuales e interdecadales. Por otra parte, la probabilidad de ocurrencia o período de retorno asignado a los 30 eventos seleccionados por la ley de Montana se efectuó adoptando la fórmula de Weibull, concebida para extremos anuales. En cambio, Chow *et al.*

(1994) proponen una reducción del período de retorno cuando el umbral se determina de modo tal que el número de eventos seleccionados coincida con la longitud de la serie, existiendo en la literatura otras propuestas dependiendo del criterio de selección del umbral, como se presenta en la recopilación de Ben-Zvi (2009). Asimismo, debe notarse que los períodos de información utilizados no coinciden (1912 a 1990 para la Ley de Montana y 1906 o 1913 a 2005 para la presente actualización).

Aplicando la metodología de Koutsoyiannis *et al.* (1998), se dedujo la ecuación [7], que representa la relación IDF para eventos entre una y 24 horas de duración, resultante del procesamiento conjunto de las series de máximos anuales de los eventos de 1, 2, 3, 6, 12 y 24 horas de duración, registrados entre 1906 a 2005. Tanto el test de Kolmogorov-Smirnov como el de Anderson-Darling prueban la bondad del ajuste. El estadístico de Kruskal-Wallis (Hirsch *et al.*, 1992) óptimo resultó de 0,029 [umbral crítico 5 % = 11,07], validando la curva global.

$$I(T_r, d) = \frac{44.648 - 14.036 \ln \left[ \ln \left( \frac{T_r}{T_r - 1} \right) \right]}{(d + 0.795)^{0.761}} \quad [7]$$

#### Curvas IDF con base en máximos anuales 1975-2005

La misma metodología se aplicó a la serie de información de la EM Prado exclusivamente al período de información extendida 1975-2005, que luego de los análisis de disponibilidad y calidad de datos se reduce al período 1981-2005. En el Cuadro 7 se presentan los resultados del ajuste de la distribución de Gumbel a los máximos anuales de

**Cuadro 7.** Parámetros de la distribución de Gumbel para cada duración, de la serie 1975-2005.

Dur	$\mu$	$\alpha$
24 h	86,9872	22,9383
12 h	78,3420	19,3564
6 h	61,0958	11,2039
3 h	52,0492	7,2077
2 h	46,4485	6,2566
1 h	33,9789	8,3540
30 min	24,9877	7,5532
20 min	20,3786	6,2314
10 min	14,4330	3,0130
5 min	10,0213	2,4561

este período. Se agrega en este caso el ajuste de la distribución para la serie de duración cinco minutos.

Las pruebas de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov y Anderson-Darling muestran que, en la primera hipótesis fue aceptada en todos los casos y en la segunda fue rechazada para la duración 3 h.

Los valores de precipitación de las curvas IDF para todas las duraciones y diferentes períodos de retorno, obtenidos para el período 1975-2005, se compararon con los

originales de Rodríguez Fontal (1980) para el período 1906-1974 y con los obtenidos de las ecuaciones de la Ley de Montana en el período 1912-1990 (IMM, 1994). El Cuadro 8 muestra esta comparación para eventos de tres horas de duración. En general, los eventos de larga duración ( $d > 2$  h) reportan una tendencia de disminución de hasta un 20 % en el caso de períodos de retorno de 25 años. En segundo lugar, para las duraciones cortas, desde 1 hora hasta 20 minutos, se observa una tendencia al aumento de las intensidades máximas (10 a 20 %), también para períodos de retorno medios. La tendencia se revierte nuevamente para las duraciones muy cortas, de 10 y 5 minutos, donde se dan disminuciones del orden de 10 %. El análisis para períodos de retorno mayores no resulta consistente ya que la serie de origen no alcanza los 30 años.

Para verificar que la disminución y aumento constatada en la serie 1975-2005 no es dependiente de la selección de la series, se consideraron las diferencias en porcentaje de los valores de precipitación para tiempos de retorno ( $Tr$ ) de 2, 5, 10 y 20 años entre el escenario actualizado (1975-2005) y la serie histórica de Rodríguez Fontal (1980), para eventos de 20 minutos y seis horas de duración (Cuadro 9). A efectos de probar la significación estadística de las diferencias encontradas, se sortearon 160 escenarios tomados de la serie histórica y se recalcularon las diferen-

**Cuadro 8.** Precipitación máxima según el período de retorno ( $Tr$ ), para eventos de tres horas de duración. Comparación entre Rodríguez Fontal (1980), Ley de Montana (IMM, 1994) y serie 1981-2005.

$Tr$ (años)	Rodríguez Fontal 1906-1974 (mm)	Ley de Montana 1912 - 1990 (mm)	Serie 1981-2005 (mm)	Diferencia entre la serie 1981-2005 y la Ley de Montana (%)	Diferencia entre la serie 1981-2005 y Rodríguez Fontal (1980) (%)
2	50,62	50,16	54,69	9,04%	8,03%
5	68,13	69,70	62,86	-9,82%	-7,74%
10	79,72	82,66	68,27	-17,41%	-14,37%
20	90,84	95,10	73,46	-22,75%	-19,14%
25	94,37		75,10		-20,42%

**Cuadro 9.** Diferencias porcentuales entre los valores de precipitación del escenario actualizado (1975-2005) y la serie histórica (1906-1974).

Duración	$Tr = 2$ años	$Tr = 5$ años	$Tr = 10$ años	$Tr = 20$ años
20 min	10,03	12,56	13,65	14,46
6 h	3,42	-7,20	-11,72	-14,98

**Cuadro 10.** Probabilidad (p) y límites del intervalo de confianza (IC) al 95 %, de las diferencias entre la proporción de eventos «más extremos» identificados a partir de 160 escenarios extraídos aleatoriamente de la serie histórica (1906-1974) y el escenario actualizado (1975-2005).

Duración		Tr = 2 años	Tr = 5 años	Tr = 10 años	Tr = 20 años
20 min	p	0,125	0,1125	0,125	0,1375
	IC 95%	(0,07; 0,18)	(0,06; 0,16)	(0,07; 0,18)	(0,08; 0,19)
6 h	p	0,69	0,30	0,16	0,14
	IC 95%	(0,62; 0,76)	(0,23; 0,37)	(0,11; 0,22)	(0,08; 0,19)

cias con el escenario actualizado. Estas fueron comparadas con el Cuadro 9 y se recodificaron con el valor uno a aquellas diferencias que resultaron «más extremas» y cero las restantes. Para eventos de 20 minutos de duración se tomaron las diferencias superiores y para seis horas de duración las diferencias inferiores, con relación al Cuadro 9.

Cada vector binario tiene una distribución binomial, cuyos parámetros representan la probabilidad de encontrar una diferencia mayor a la indicada en el Cuadro 9. Utilizando la aproximación asintótica Normal de la distribución Binomial se calcularon los límites del intervalo de confianza al 95 % para la proporción de los eventos «más extremos» que fueron identificados. Analizando el Cuadro 10 puede observarse que los intervalos para las proporciones no incluyen el cero en ninguno de los casos, por lo que las diferencias resultaron superiores a las diferencias o umbrales iniciales (Cuadro 8), con un 95 % de confianza, en cada tiempo de retorno y duración de evento consideradas.

## Conclusiones

Los antecedentes nacionales más relevantes en cuanto al ajuste de curvas intensidad-duración-frecuencia en el Uruguay refieren a los trabajos de Terra (1977a; 1977b), Rodríguez Fontal (1980) y la Ley de Montana (IMM, 1994). Este trabajo tomó como base metodológica el trabajo de Rodríguez Fontal (1980) por considerarse más riguroso desde el punto de vista del tratamiento de la información y la metodología del ajuste de probabilidad, en tanto los trabajos de Terra (1977a; 1977b) y Ley de Montana (IMM, 1994) presentan un sesgo de selección de datos.

La actualización de las curvas IDF con base en máximos anuales 1906-2005, en que se incorporaron los últimos 30 años al análisis, no generó diferencias significativas en cuanto a estadística de tormentas extremas refiere; los cuantiles de precipitación extrema para todas las duracio-

nes no variaron en más de 5 % respecto de sus correspondientes de las curvas de Rodríguez Fontal (1980). Por otra parte, las diferencias con la Ley de Montana (IMM, 1994) fueron más acentuadas en comparación con las curvas de Rodríguez Fontal (1980), debido a la diferente metodología utilizada en ambos trabajos, particularmente el sesgo en la selección de datos utilizados en la Ley de Montana (IMM, 1994) y la consideración de diferentes periodos.

Aplicando la metodología de Koutsoyiannis *et al.* (1998), se dedujo una relación IDF para eventos de una a 24 horas de duración, resultante del procesamiento conjunto de las series de máximos anuales para el período 1906-2005. Tanto el test de Kolmogorov-Smirnov como el de Anderson-Darling y el estadístico de Kruskal-Wallis prueban que la curva global es válida.

Si solamente se considera el último período en que se dispone de datos, 1981-2005, contrariamente a lo esperado, estas curvas IDF muestran una disminución en los valores de intensidades máximas de precipitación de entre 10 y 20 % para periodos de retorno medio, excepto para eventos de corta duración, de una hora a 20 minutos, en que se observa un aumento de igual magnitud para las intensidades máximas correspondientes a periodos de retorno medios.

Los tests de bondad de ajuste comparan la función de distribución bajo estudio con la probabilidad empírica asignada a los datos, usualmente según la fórmula de Weibull (Chow *et al.*, 1994) que presupone datos continuos. En la extensión de la serie original manejada por Rodríguez Fontal (1980) o Ley de Montana (IMM, 1994) se priorizó la calidad de los datos en lugar de la continuidad. Ello puede afectar en alguna medida la probabilidad asignada a los datos y, por lo tanto, el resultado del test de bondad de ajuste. No obstante, esta incidencia probablemente tenga un peso menor sobre el diseño de obras.

## Agradecimientos

Este trabajo se realizó en el marco de un Convenio entre la Intendencia de Montevideo y la Universidad de la República-Facultad de Ingeniería, por el que se encomendó la realización de diversos «estudios de base y asesoramiento que sirvan como instrumentos de soporte de la actualización del Plan Director de Saneamiento de Montevideo».

Asimismo, se agradece a la Dirección Nacional de Meteorología, que facilitó las bandas pluviográficas de la Estación Meteorológica Prado, y particularmente a Alberto Rodríguez Fontal, quién nos proporcionó la información histórica base de su trabajo. Un reconocimiento a todos aquellos que a lo largo de los años contribuyeron a desarrollar las curvas intensidad-duración-frecuencia, herramienta fundamental para la ingeniería nacional.

Por último, un agradecimiento a quienes colaboraron en el proceso de búsqueda, digitalización y escaneo de las bandas pluviográficas.

## Bibliografía

- Anderson TW, Darling DA.** 1954. A test of goodness-of-fit. *Journal of American Statistical Association*, 49: 765 - 769.
- Aparicio Mijares FJ.** 1989. Fundamentos de hidrología de superficie. México: Limusa. 302p.
- Bidegain M, Crisci C, del Puerto L, Inda H, Mazzeo N, Taks J, Terra R.** 2012. Clima de cambios : Nuevos desafíos de adaptación en Uruguay [En línea]. Montevideo: FAO; MGAP. Consultado 12 marzo 2014. Disponible en: <http://www.mgap.gub.uy/gxpf/files/mgap/content/audio/source0000000083/AUD0000070000002469.pdf>.
- Ben-Zvi A.** 2009. Rainfall intensity-duration-frequency relationships derived from large partial duration series. *Journal of Hydrology*, 367: 104 - 114.
- Caffera M.** 2003. Primeros avances sobre eventos de inundación en Uruguay, y la circulación atmosférica en capas bajas. *Meteorológica*, 28(1-2): 97 - 107.
- Chow VT, Maidment DR, Mays LW.** 1994. Hidrología Aplicada. Bogotá : McGraw-Hill. 584p.
- Genta JL, Chreties C.** 2004. Variabilidad climática y gestión de recursos hídricos [Cd-Rom]. En: Memorias del XXI Congreso Latinoamericano de Hidráulica de la Asociación Internacional de Investigaciones Hidráulicas (AIH); São Pedro, Brasil. São Paulo : AIH.
- Genta JL, Charbonnier F, Rodríguez Fontal A.** 1998. Precipitaciones máximas en el Uruguay. En: 2º Congreso de la Vialidad Uruguaya. Montevideo : Asociación Uruguaya de Caminos. pp. 301-310.
- Hirsch RM, Helsen DR, Cohn TA, Gilroy EJ.** 1992. Statistical analysis of hydrologic data. En: Maidment DR [Ed.]. Handbook of Hydrology. Nueva York : McGraw-Hill. pp. 17.1 - 17.55.
- IMFIA** 2003. Balances hídricos en la cuenca del río Cuareim con vistas a la gestión del recurso y el impacto en las crecidas : Convenio entre la Comisión del Río Cuareim y la Universidad de la República. Montevideo : Facultad de Ingeniería. 75p.
- IMM** 1994. Plan director de saneamiento urbano de la Intendencia Municipal de Montevideo. Anexo I: Meteorología e Hidrología. Montevideo : Intendencia de Montevideo. 32p.
- Koutsoyiannis D, Kozonis D, Manetas A.** 1998. A mathematical framework for studying rainfall intensity-duration-frequency relationships. *Journal of Hydrology*, 206: 118 - 135.
- Mechoso CR, Pérez Iribarren G.** 1992. Streamflow in Southeastern South America and the Southern Oscillation. *Journal of Climate*, 5(12): 1535 - 1539.
- Piggelen HE, Brandsma T, Manders H.** 2011. Automatic Curve Extraction for Digitizing Rainfall Strip Charts. *Journal Of Atmospheric And Oceanic Technology*, 28: 891 - 906.
- Pizarro T, Abarza A, Fariás M, Jordán C.** 2003 Construcción de Curvas IDF (Intensidad-Duración-Frecuencia) en zonas semiáridas de Chile Central [Cd-Rom]. En: XII Congreso Forestal Mundial: Québec City, Canadá. Québec : FAO.
- PROHIMET.** 2012. Proyecto piloto PROHIMET: Alerta temprana para la ciudad de Durazno ante las avenidas del río Yí: Informe final. Montevideo: Facultad de Ingeniería. 208p.
- Rodríguez Fontal A.** 1980. Ecuaciones y ábacos para drenaje, desagüe de aeropuertos, autopistas y zonas urbanas, diques de tierra y defensa ante inundaciones. *Boletín de la Facultad de Ingeniería (Universidad de la República)*, 14(2): 9 - 219.
- Silveira L.** 2004. Proyecto URU/98/011 Prevención y Mitigación de Emergencias Ambientales de origen climático. Montevideo: Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente, 165p.
- Stedinger J, Vogel R, Foufoula-Georgiou E.** 1993. Frequency analysis of extreme events. En: Maidment DR [Ed.]. Handbook of Hydrology. Nueva York: McGraw-Hill. pp. 18.1-18.66.
- Stephens MA.** 1977. Goodness of fit for the extreme value distribution. *Biometrika*, 64(3): 583 - 588
- Terra E.** 1977a. Lluvias intensas en Montevideo. *Revista de Ingeniería*, 23: 31 - 41.
- Terra E.** 1977b. Lluvias intensas en Montevideo: Erratas de lo publicado en el ejemplar No 23. *Revista de Ingeniería*, 25: 69 - 70.
- Zamanillo E, Larenze G, Tito MJ, Pérez M, Garat, ME.** 2008. Tormentas de diseño para la Provincia de Entre Ríos. Buenos Aires : Universidad Tecnológica Nacional. 140p.