

XXIV CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
PUNTA DEL ESTE, URUGUAY, NOVIEMBRE 2010

EVALUACIÓN DE 3 METODOLOGÍAS PARA LA DETERMINACIÓN DE
HIDROGRAMAS EXTREMOS EN EL ESTUDIO DE LA SOBRE-
ELEVACIÓN DE LA PRESA DE PASO SEVERINO

Christian Chreties, Magdalena Crisci, Santiago Symonds, Luis Silveira y Luis Teixeira.
Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA), Universidad de la República, Uruguay.
chreties@fing.edu.uy, mcrisci@fing.edu.uy, ssymonds@fing.edu.uy, lesy@fing.edu.uy, luistei@fing.edu.uy.

RESUMEN:

En este trabajo se presenta una evaluación de tres metodologías independientes para la determinación de los hidrogramas de crecidas en la cuenca hidrográfica de aporte a la presa de Paso Severino, motivado por el proyecto de recrecimiento de la misma. La cuenca en Paso Severino ocupa aproximadamente 2500 Km² conteniendo la sub-cuenca con cierre en Florida (1800 Km² de extensión) en la cual se dispone de información de extensas series históricas de información hidroclimática. El primero de los métodos propuestos se basa en análisis estadístico de caudales máximos en Florida, la determinación del hidrograma adimensional en dicha estación y su regionalización a toda la cuenca de Paso Severino. En el segundo método se realiza la modelación hidrológica en la cuenca de paso diario, calibrándose los parámetros en la sub-cuenca con cierre en Florida y luego regionalizándolos a la cuenca de Paso Severino. El tercer método está basado en la modelación hidrodinámica del río Santa Lucía Chico entre Florida y Paso Severino, utilizando como condición de borde los hidrogramas observados en Florida. Para este tercer método, la calibración del modelo hidrodinámico se realiza en base a la información de niveles observados en el embalse de Paso Severino. Los resultados obtenidos de la aplicación de los tres métodos son similares para cualquier recurrencia considerada, siendo el método 3 el que resultó de mayor confianza. A su vez, se verificó que el primer método resulta una primera estimación muy razonable, siendo este método el de mayor simplicidad y menor información requerida.

ABSTRACT:

This paper presents an evaluation of three methods to determine flood hydrographs in Paso Severino dam basin, which was done as part of a project for increasing its capacity. Dam basin covers approximately 2500 km² including the Florida sub-basin (1800 km²), in which extensive observed data series are available. The first method is based on statistical analysis of observed peak flows in Florida station, a dimensionless hydrograph calculation and its regionalization to Paso Severino basin. Hydrological daily modelling is performed in the second method. Model parameters were calibrated at Florida sub-basin, and then regionalized to Paso Severino basin. The third method is based on hydrodynamic modelling of Santa Lucia Chico river. Observed hydrographs in Florida station were used as upstream boundary condition and the model calibration was performed using observed level data at Paso Severino reservoir. Similar results were obtained with the three methods, being the third one the most appropriate. It was also observed that the first method is a reasonable first estimation.

PALABRAS CLAVES: Hidrología de eventos extremos, Modelación hidrológica, Comparación de metodologías.

INTRODUCCIÓN

La presa de Paso Severino, sobre el río Santa Lucía Chico, es el principal reservorio de agua que dispone Uruguay para el suministro de agua potable a la zona metropolitana del país (1.5 millones de habitantes). Se trata de una presa de materiales sueltos con un vertedero central de hormigón y un vertedero de máximas ubicado fuera del cuerpo de la presa. El volumen de almacenamiento a cota de vertido (36.00 m) de la presa es de 75 millones de m³.

A raíz de la ocurrencia de diferentes eventos extremos de sequía (especialmente en el verano 2008/2009) la Administración Nacional de las Obras Sanitarias del Estado (OSE), responsable del suministro de agua potable a nivel nacional, decidió estudiar la posibilidad de sobre-elevar la presa de Paso Severino de modo de aumentar el volumen de almacenamiento máximo disponible, con el objetivo de minimizar el riesgo de no satisfacer la demanda de agua potable del Sistema Metropolitano. Para ello resulta imprescindible que la nueva configuración de la represa cumpla con las máximas exigencias de seguridad de acuerdo a las normativas existentes a nivel internacional para este tipo de obras. Esto implica efectuar todos los estudios hidrológicos de crecidas en la cuenca, los estudios hidráulicos vinculados al funcionamiento de los vertederos, y los estudios de estabilidad estructural de la presa, requeridos para asegurar las condiciones de seguridad exigidas por la normativa internacional, tanto en la situación actual como para las distintas opciones de recrecimiento del embalse.

Los estudios hidrológicos e hidráulicos mencionados fueron ejecutados por el Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA) mediante un Convenio suscrito entre OSE y la Facultad de Ingeniería. Como parte de los estudios se efectuó un análisis hidrológico del sistema, cuyo objetivo principal fue la determinación de los hidrogramas extremos para el diseño y evaluación de la sobre-elevación de la presa de Paso Severino. En este artículo se presenta la comparación, evaluación y discusión de la aplicación de 3 métodos independientes para la determinación de los hidrogramas extremos de la cuenca.

CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA CUENCA

La cuenca del río Santa Lucía Chico con cierre en la presa de Paso Severino ocupa aproximadamente 2497 Km². Esta cuenca contiene la ciudad de Florida, en donde se dispone de información histórica de niveles y curva de aforo registrados con paso diario y/o horario. A la altura de Florida, donde se encuentran la estación hidrométrica mencionadas, el área de la cuenca del río Santa Lucía Chico ocupa aproximadamente 1754 Km², lo que representa un 70.2 % del área de la cuenca de Paso Severino. Esta situación es destacable ya que en la cuenca con cierre en Florida se cuenta con información sobre 45 años de datos diarios/horarios de caudal.

Se cuenta además con información pluviométrica de 10 estaciones en toda la cuenca con datos diarios de precipitación. En la Figura 1, se presenta la cuenca del río Santa Lucía Chico con cierre en Paso Severino, la cuenca con cierre en Florida y las estaciones hidrométricas y pluviométricas de la cuenca.

En base a la información de curvas de nivel cada 10 metros, fue elaborado para la cuenca un modelo numérico de terreno (MNT) mediante la técnica de triangulación (TIN). En base al MNT elaborado, se determinaron los límites de las cuencas presentadas, así como los restantes parámetros hidrológicos de interés, los que se presentan en la Tabla 1.

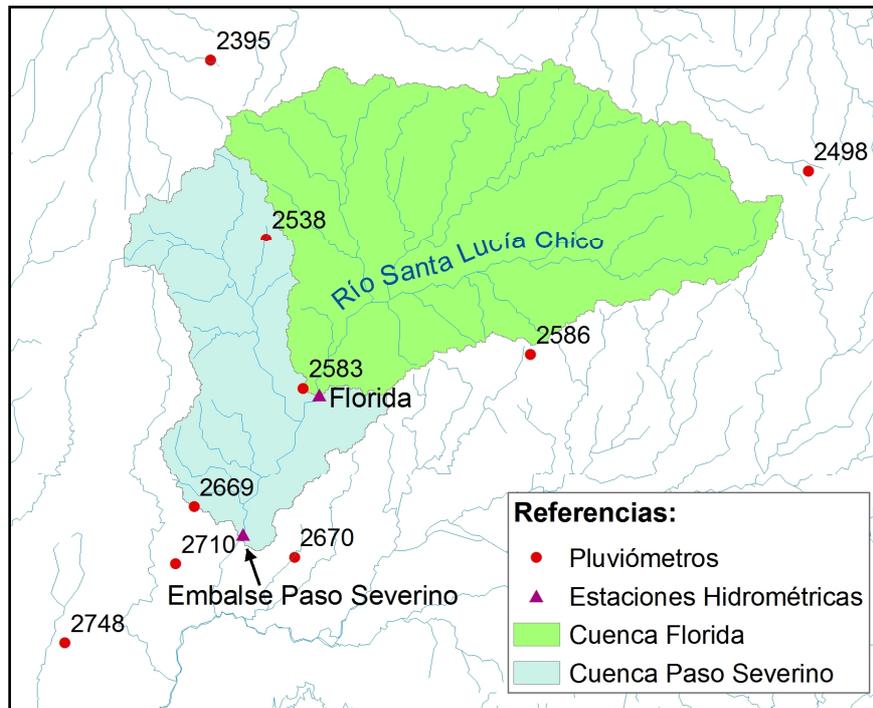


Figura 1.- Cuenca de estudio y ubicación de la presa de Paso Severino.

El tiempo de concentración de cada cuenca fue calculado aplicando el método de Ramser-Kirpich (Chow, 1994), ya que todas las sub-cuencas e incluso la cuenca con cierre en el Dique, se corresponden con las hipótesis con que fue desarrollado este método. En particular se verifica que el flujo en la cuenca debe ser esencialmente de tipo concentrado.

Tabla 1: Parámetros hidrológicos de la cuenca del río Santa Lucía Chico.

Cierre	Área de cuenca (Km ²)	$L^0.77$ (m)	Longitud cauce (Km)	Pendiente (m/m)	Tiempo de Concentración (hs)
Dique P. Severino	2497.3	200	109.7	0.0018	28.7
Florida	1754.4	173	84.7	0.0020	22.5

METODOLOGÍA

La determinación de los hidrogramas extremos en la cuenca se realizó utilizando tres métodos esencialmente independientes. El primero en base a un análisis estadístico de caudales máximos en Florida, la determinación del hidrograma adimensional y la extensión para toda la cuenca de Paso Severino. El segundo en base a modelación hidrológica en la cuenca (Precipitación-Escorrimento para eventos extremos), calibrando los parámetros en la sub-cuenca Florida y luego extendiendo a la cuenca de Paso Severino. En esta segunda alternativa, durante el proceso de calibración se utilizó la información pluviométrica de la cuenca, mientras que para la determinación de hidrogramas de diferente recurrencia (en especial $T_r = 1000$ y $T_r = 10000$) se utilizaron las curvas IDF del Uruguay. (Genta et al., 1998). El tercer método está basado en la modelación hidrodinámica del río Santa Lucía Chico entre Florida y Paso Severino, utilizando como condición de borde los hidrogramas extremos observados en Florida. Para este método, la calibración del modelo hidrodinámico se realiza en base a la información de niveles observados en el embalse de Paso Severino.

Para la aplicación de cada uno de los métodos, previamente, se realizó un análisis estadístico de los caudales observados en la estación Florida, y la determinación del hidrograma adimensional en dicha cuenca.

Análisis estadístico de caudales en Florida

Se realizó un análisis estadístico sobre la información de caudales extremos de la cuenca con cierre en Florida. Luego de un análisis de calidad y consistencia de datos, fueron considerados un total de 38 años de datos válidos para el cálculo de caudales máximos anuales.

Fueron ajustadas las distribuciones Normal, Log-Normal, PearsonIII, LogPearsonIII y Gumbel para la serie de caudales máximos, para posteriormente seleccionar la distribución que mejor ajusta en base a analizar las gráficas de probabilidad, el error cuadrático medio y los test Chi-cuadrado Kolmogorov-Smirnov.

El resultado indica que solamente las distribuciones Log-Normal y Gumbel aceptan los test de bondad, pero la distribución Log-Normal tiene un error cuadrático medio muy superior a Gumbel y a su vez, el ajuste en el papel probabilístico es notoriamente superior para el caso de Gumbel que para el caso de la distribución Log-Normal. Por lo tanto, la distribución que mejor ajusta a los caudales máximos de Florida es la distribución Gumbel. Los parámetros de la distribución seleccionada (Gumbel), al igual que para todas las distribuciones, se obtuvieron aplicando el método de los momentos (Chow, 1994).

Los caudales extremos en función del período de retorno resultantes para la cuenca con cierre en Florida se presentan en la Tabla 2 y en la Figura 2, donde también se agregan los intervalos de confianza del 95%.

Tabla 2: Caudales máximos ajustados en la cuenca con cierre en Florida.

Tr (años)	Q(m ³ /s) Gumbel
2	1094
10	2216
25	2781
50	3200
100	3616
200	4030
500	4576
1000	4990
10000	6361

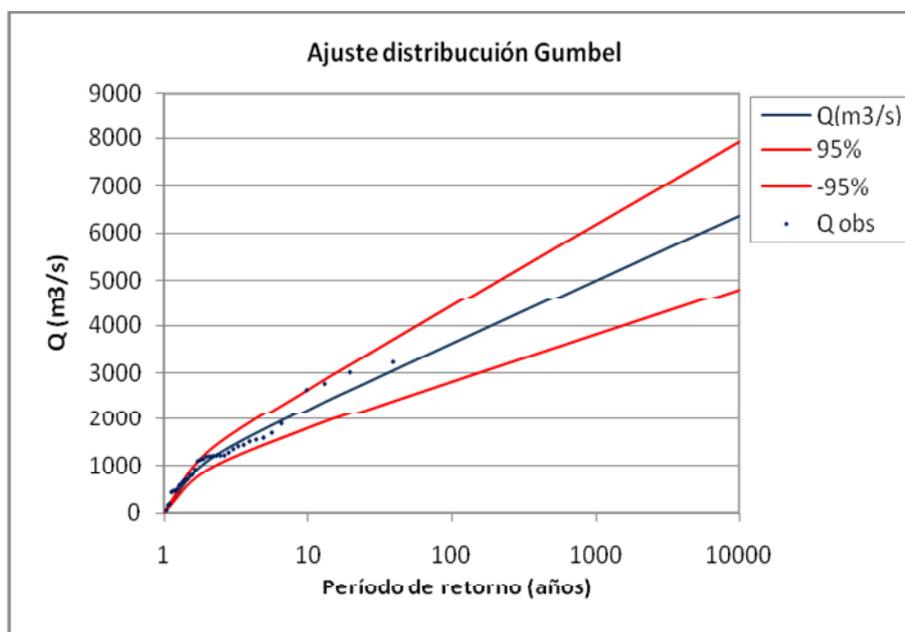


Figura 2.- Ajuste de la distribución de Gumbel en la cuenca con cierre en Florida.

Cálculo del hidrograma adimensional en Florida

Se determinó el hidrograma adimensional en Florida a partir de los datos de caudales observados en la estación hidrométrica de dicha ciudad. Para ello, se seleccionaron algo más de 20 eventos extremos que cumplen con la condición de ser unimodales y disponer de datos continuos durante todo el evento.

Para cada uno de los eventos seleccionados, se calculó el caudal máximo (Q_{max}) del evento y se calculó el hidrograma adimensional del evento como el cociente entre $Q(t)$ (evolución temporal del caudal durante el evento) y Q_{max} en cada instante de tiempo. Finalmente se normalizaron los tiempos de cada hidrograma de manera de hacer coincidir los tiempos pico y se comparó la forma de todos los hidrogramas adimensionales.

En la Figura 3, se presentan los hidrogramas adimensionales resultantes y se presenta el hidrograma adimensional promedio (calibrado). Debido a la baja dispersión obtenida entre los hidrogramas adimensionales, resulta razonable considerar como forma del hidrograma en Florida, el hidrograma adimensional calibrado.

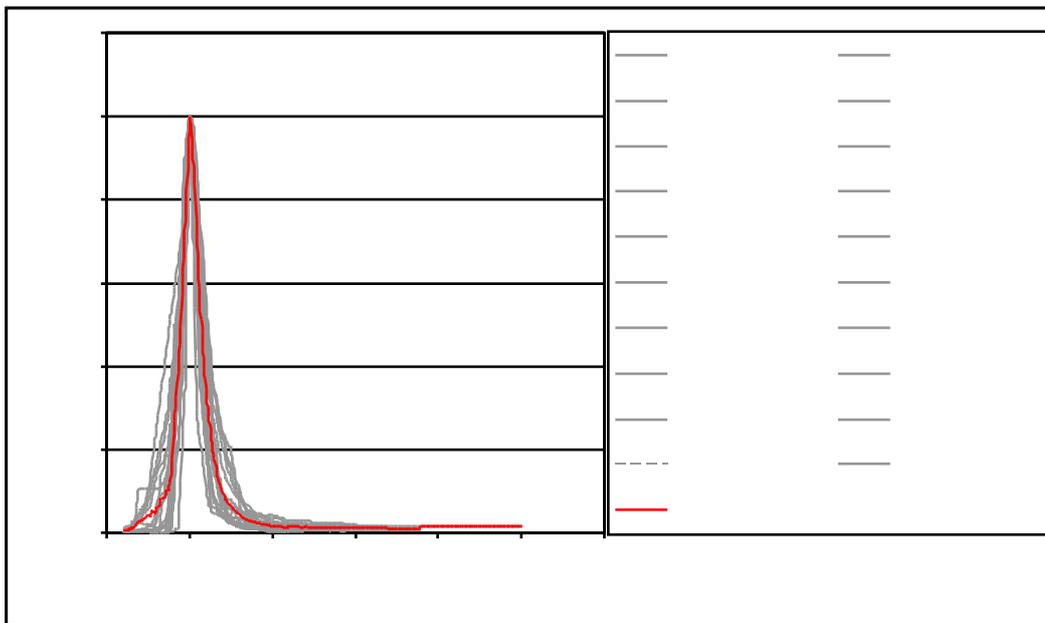


Figura 3.- Hidrograma adimensional en la estación Florida.

Método I

El primer método consiste en determinar el hidrograma de crecida en Florida como el producto del hidrograma adimensional por el caudal extremo para una recurrencia dada. Luego se transforma el hidrograma correspondiente a la cuenca con cierre en Florida al hidrograma de la cuenca con cierre en Paso Severino aplicando una relación de semejanza de acuerdo a la Ecuación [1]

$$\frac{Q_{F,t}}{Q_{PS,t}} = f\left(\frac{P_F}{P_{PS}}, \frac{A_F}{A_{PS}}, \frac{Suelo_F}{Suelo_{PS}}, \frac{S_F}{S_{PS}}\right)$$

donde los sub-índices F y PS corresponden a la cuenca con cierre en Florida y Paso Severino respectivamente, Q es el caudal, P es la precipitación sobre la cuenca, A es el área de la cuenca, S es la pendiente del cauce principal y "Suelo" son las características de cobertura y composición del suelo de la cuenca.

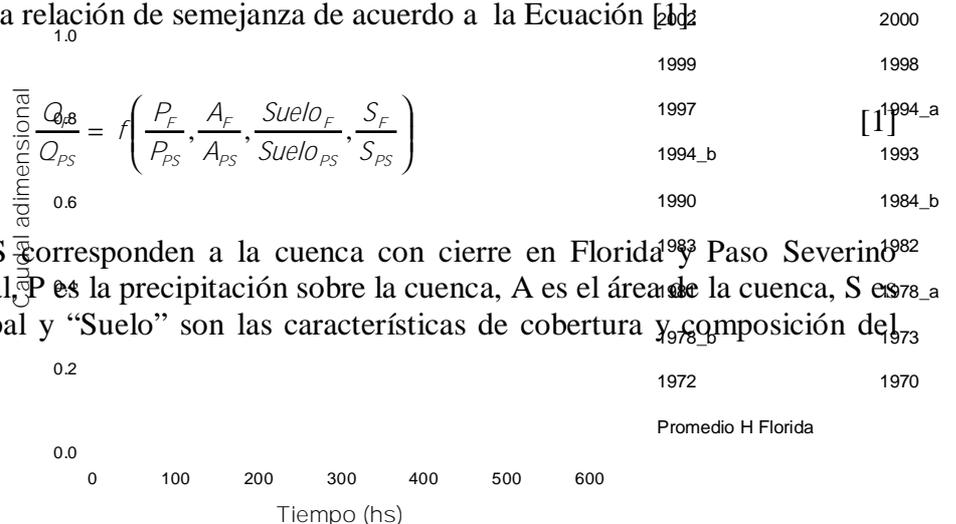


Figura 4.- Hidrograma adimensional en la estación Florida.

A partir de un análisis de los datos pluviométricos, topográficos y de suelos de ambas cuencas, se concluyó que resulta razonable simplificar la Ecuación [1] a la Ecuación [2], obteniendo una relación de caudales igual a la relación de áreas de cuencas, lo que constituye el caso más simple de la función f .

$$\frac{Q_F}{Q_{PS}} = f\left(\frac{A_F}{A_{PS}}\right) \quad [2]$$

De esta forma, a partir del hidrograma de crecida en Florida se obtiene el hidrograma de crecida en Paso Severino.

Método II

El segundo método consiste en la determinación de los hidrogramas de crecida en la cuenca de Paso Severino mediante modelación hidrológica. El modelo numérico utilizado es de tipo semi-distribuido, de paso diario, y fue elaborado en base al código HEC-HMS (U.S. Army Corps of Engineering). Mediante este software se resolvió el proceso precipitación-escorrentía para el caso de eventos extremos considerando la cuenca con cierre en Florida por un lado y por otro lado la cuenca incremental entre Florida y Paso Severino. En este sentido se consideró cada cuenca como un modelo de tipo concentrado, esto significa que todos los puntos de cada cuenca se comportan de igual forma.

El proceso precipitación-escorrentía incluyó la modelación del proceso de infiltración, la modelación del proceso de transformación y finalmente la generación del hidrograma en la salida de cada cuenca.

Los parámetros de calibración del modelo se ajustaron a partir de la información de caudales en la estación de Florida y luego regionalizados al resto de la cuenca. Estos parámetros fueron: el Número de Curva, la Abstracción Inicial y el Tiempo de Concentración de la cuenca. Sin embargo, se optó por agregar también un parámetro vinculado a la intensidad de lluvia, ya que solo se cuenta con información de precipitación diaria en la cuenca por no disponer de pluviógrafo. En este sentido, se entiende que la intensidad de lluvia juega un rol central en la generación de los eventos extremos y por lo tanto se incluyó como parámetro que representa la fracción del día lluviosa: "FRAC", el cual depende del volumen de precipitación diaria en la cuenca y depende de la estación del año que se considere (Silveira, 1998).

$$FRAC = \frac{P}{P_{max}} \text{ entre el 1 de mayo y el 31 de octubre.}$$

$$FRAC = \frac{P}{P_{max}} \text{ entre el 1 de noviembre y el 30 de abril.}$$

Los parámetros de la función FRAC fueron incluidos como parámetros de calibración.

Se consideraron 9 eventos para la calibración de los parámetros del modelo. Estos eventos cumplen en ser unimodales, contar con datos continuos durante todo el evento y tener datos de lluvia en todos los pluviómetros vinculados a la cuenca con cierre en Florida. Una vez calibrado el modelo, la determinación de los hidrogramas de crecida se realiza utilizando curvas I-D-F (Genta et al., 1998).

Método III

En este método, al igual que en el primero, se utiliza el hidrograma adimensional y los caudales extremos en Florida asociados a diferentes recurrencias. A partir de ello, se determinan los hidrogramas extremos en Florida tal como se detalló en el Método I.

El pasaje de los hidrogramas de crecida entre las cuencas de Florida a Paso Severino se efectúa en este método mediante la modelación hidrodinámica del río Santa Lucía Chico. Esta modelación se realiza en base al código computacional libre HEC-RAS (U.S. Army Corps of Engineering). El modelo se extiende por el río Santa Lucía Chico y abarca desde Florida hasta el dique de Paso Severino. Como condición de borde aguas abajo se utiliza la curva de descarga Q-H del vertedero de la presa. La condición de borde de aguas arriba es el hidrograma en Florida, afectado por un coeficiente de maximización ($C_f > 1$) que contempla el aporte de la cuenca incremental entre Florida y Paso Severino, de acuerdo a la ecuación [3]. En base a la información observada de caudales en Florida y niveles en el embalse (20 años) se calibra el coeficiente de Manning (rugosidad) y el coeficiente C_f .

$$\frac{Q_F}{Q_{PS}} = C_f \quad [3]$$

Para la implementación del modelo hidrodinámico se utilizaron secciones transversales al río cada aproximadamente 2 Km de equidistancia, batimetría del embalse a partir de la cual se trazaron curvas de 2 metros de equidistancia, información histórica de evaporación y precipitación en el embalse, así como información de operación de la presa: caudales vertidos, caudales descargados y niveles diarios en el embalse.

RESULTADOS

En relación al primer método, la Ecuación 2 se expresa en este caso como:

$$\frac{Q_F}{Q_{PS}} = \left(\frac{A_F}{A_{PS}} \right) = 1.43 \quad [4]$$

Por su parte, en la Figura 4, se presentan los hidrogramas observado y simulado en la estación Florida producto de la calibración del modelo HEC-HMS (Método 2). Los valores de los parámetros calibrados resultan muy similares a los valores teóricos (Chow, 1994); especialmente el número de curva y tiempo de concentración, lo que permitió la regionalización directa a la cuenca con cierre en Paso Severino. El parámetro que revistió más sensibilidad fue el correspondiente a la intensidad de lluvia (FRAC), mientras que el Número de Curva fue el de menor sensibilidad.

En la Tabla 3 se presentan los parámetros del modelo hidrológico resultantes de la calibración. Como se puede apreciar, el valor del exponente del parámetro FRAC fue variado para el mejor ajuste de 0.33 a 0.35. Es importante destacar que el valor 0.33 corresponde a la calibración realizada para la cuenca del Río Negro (Silveira, 1998) por lo que se entiende admisible desde el punto de vista teórico la variación obtenida. El tiempo de concentración se mantuvo constante e igual al valor teórico calculado por Kirpich, lo que coincide con las últimas investigaciones realizadas en el Uruguay para el caso de eventos extremos.

Tabla 3: Resultado de la calibración en la cuenca con cierre en Florida.

Parámetro	Valor
NC	72
la (mm)	19.8
FRAC – verano	$0.158P^{0.35}$
FRAC- invierno	$0.21P^{0.35}$

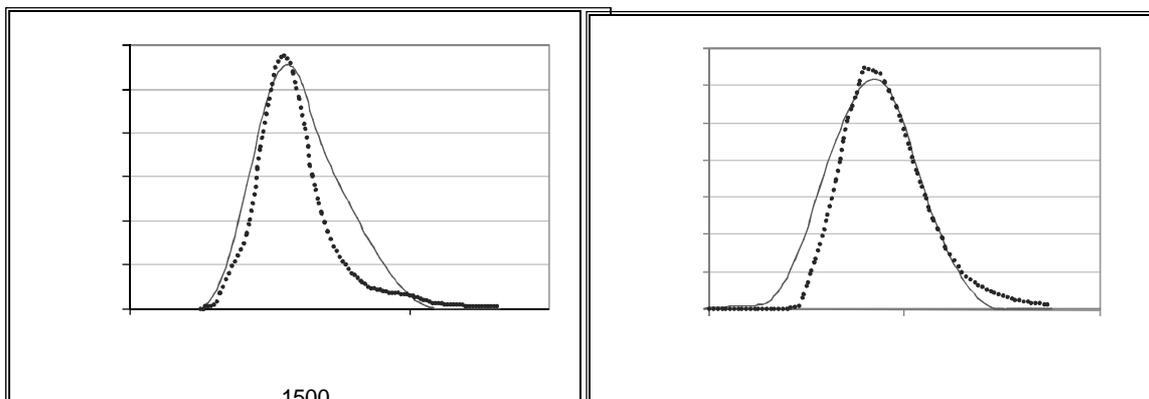


Figura 4.- Modelo hidrológico. Simulado (línea continua), Observado (línea a trazos).

Finalmente en relación al tercer método, se efectuó la simulación de 9 eventos extremos y se calibró el número de Manning en el tramo Florida-Paso Severino simultáneamente con el coeficiente de mayoración de los caudales en Florida. Se observó que el modelo es muy poco sensible a las variaciones del número de Manning, teniendo sensibilidad a los aportes de la cuenca. La calibración se realizó de manera de ajustar lo mejor posible los niveles modelados a los observados en el embalse. Las simulaciones se realizaron con paso horario, pero las medidas de nivel de embalse disponibles son diarias. El coeficiente de mayoración que mejor ajusta los eventos simulados varía entre 1.30 y 1.50, siendo este último el valor de la envolvente. En la Figura 5, se presenta el resultado de la calibración del modelo hidrodinámico correspondiente al Método 3. En dicha figura, se comparan los limnigramas simulados para $C_f = 1.3, 1.4$ y 1.5 con los niveles del embalse observados para dos eventos extremos registrados.

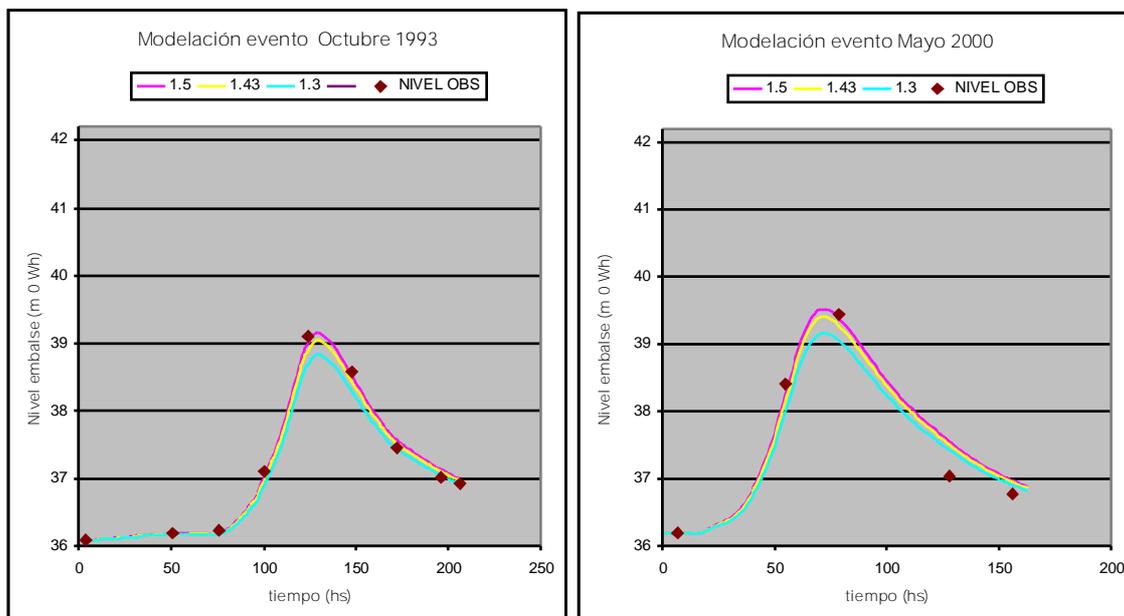


Figura 5.- Resultados experimentales para ancho de protección en grupo de pilas aplicando el método habitual (círculos) y el método propuesto (cuadrados).

En la Tabla 4, se presentan los caudales máximos para cada recurrencia correspondientes a todos los métodos.

Tabla 4.- Caudales máximos en Paso Severino.

Tr [años]	Método 1 Q [m ³ /s]	Método 2 Q [m ³ /s]	Método 3 Q [m ³ /s]
2	1557	1450	1641
10	3154	2797	3324
100	5147	4591	5424
1000	7103	6402	7485
10000	9055	8229	9542

CONCLUSIONES

Fueron aplicados y evaluados 3 métodos independientes para la estimación de los hidrogramas extremos para el análisis de la sobre-elevación de la presa de Paso Severino. Los resultados obtenidos de la aplicación de los tres métodos son similares para cualquier recurrencia considerada. El Método 3 resulta el de mayor confianza, ya que incluye en la calibración de sus parámetros los datos de nivel observados en el embalse. En el Método 2 la calibración se realiza únicamente respecto a caudales estimados en la estación Florida. En estos casos (estimación de caudales extremos mediante extrapolación de la curva de aforo) la incertidumbre asociada es alta debido a la “histéresis” que presenta la curva Q-H de los ríos aluviales en casos de avenidas. Asimismo el Método 2 incluye la utilización de curvas IDF actualizadas hasta 1980, lo que implica caudales inferiores a los restantes métodos. El valor obtenido para Cf es 1.50 (Método 3), valor similar a la relación de áreas de cuencas (1.43), por lo cual el cálculo aplicando el Método 1 resulta una primera estimación razonable. A los efectos del caso en estudio, se decidió considerar como hidrogramas de crecida, los resultantes del Método 3, los que se presentan en la Figura 6.

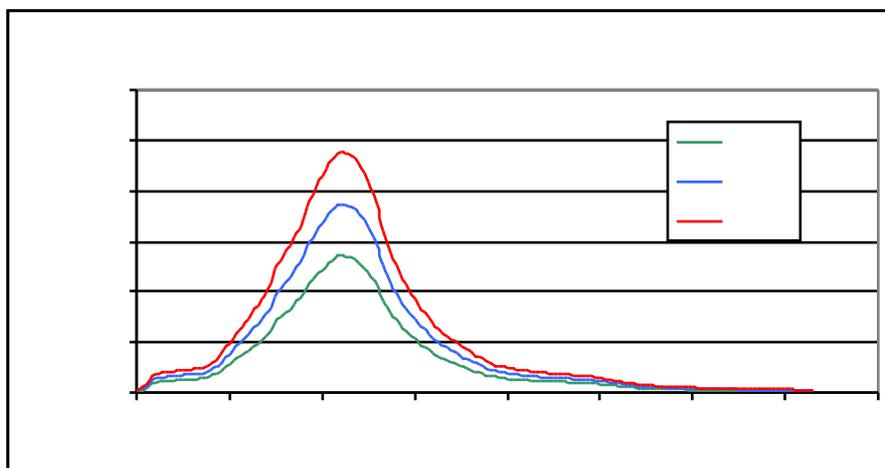


Figura 6.- Hidrogramas extremos en Paso Severino resultantes del Método 3.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Cameron D.S., K.J. Beven, J. Tawn, S. Blazkova, P. Naden. (1999) “Flood frequency estimation by continuous simulation for a gauged upland catchment (with uncertainty).” *Journal of Hydrology*. Vol 219 pp: 169–187

Chow, V. T. , D. R. Maidment, L. W. Mays (1994). “Hidrología Aplicada”. Mc. Graw Hill, Bogotá. ISBN 958-600-171-7

Coles, S. (2001). "An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values". Editora Springer-Verlag, London. ISBN 1-85233-459-2

Genta, J.L., Charbonnier, F., & Rodriguez, A. (1998) "Precipitaciones máximas en el Uruguay". *Congreso Nacional de Vialidad, Montevideo, Uruguay.*

Silveira, L. (1998). "Hydrological modelling of natural grasslands with small slopes in temperate zones". Doctoral Thesis. Department of Civil and Environmental Engineering. Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden. TRITA-AMI PHD 1022. ISSN 1400-1284.

Tucci C. E. M. (2002). "Regionalização de vazões", Editora da Universidade, UFRGS. ISBN 85-7025-615-9