

Actualización de la Estimación de la Crecida Máxima Probable para la Presa de Salto Grande

Adolfo Villanueva¹, Sergio Menajovsky¹, Manuel Irigoyen²

¹ EVARSA-INCOVIC HIDRO URUGUAY UTE

² CTM - Comisión Técnica Mixta de Salto Grande

Mail de contacto: aonvilla@gmail.com

RESUMEN

Este artículo presenta el proceso de estimación actualizada de la Creciente Máxima Probable de la represa de Salto Grande. El punto de partida del cálculo de la CMP fueron los análisis de Precipitación Máxima Probable en la cuenca de aporte a la represa, desarrollados, de forma separada, en una etapa anterior. La metodología básica de generación de la CMP fue la transformación de las posibles PMP en caudales mediante modelación matemática. Este artículo describe brevemente los resultados del estudio de PMP, y con un poco más de detalle la modelación lluvia-caudal utilizada para generar los hidrogramas de aporte a Salto Grande. A continuación se presenta un somero análisis del comportamiento de la cuenca ante eventos extremos y el montaje de las lluvias críticas a partir de la combinación de tormentas extremas en la cuenca alta y la cuenca baja, según reglas indicadas en el estudio de la PMP. Finalmente las combinaciones de tormentas son transformadas en hidrogramas de aporte a Salto Grande a través de la modelación lluvia-caudal. Se presentan los hidrogramas generados por las lluvias críticas y se comentan sus características.

Palabras clave: tormentas críticas, hidrogramas críticos, CMP

1 INTRODUCCIÓN

El estudio original de la Crecida Máxima Probable (CMP) para la represa de Salto Grande fue realizado en la década del '60, siendo posteriormente revisado en los años '70. Dado el tiempo transcurrido desde esos estudios, y considerando la nueva información hidrometeorológica disponible, las alteraciones en la cuenca y los posibles cambios en el sistema climático, la Comisión Técnica Mixta de Salto Grande (CTM) decidió hacer un nuevo estudio de la CMP. Por razones internas de la CTM, ese estudio fue dividido en dos componentes, la Precipitación Máxima Probable como primer componente y la Crecida Máxima Probable como segundo componente. Este artículo presenta brevemente el desarrollo y los resultados del componente CMP.

Las principales crecidas en el río Uruguay han ocurrido en 1959, 1983, 1992, 1997 y 1998, viéndose incrementada la frecuencia de aparición de picos extremos en los últimos 30 años.

A excepción de la crecida del año 1983, que fue la mayor en todos los sitios analizados, se aprecia que las crecidas no han sido homogéneas a lo largo del río en cuanto a su caudal máximo, siendo distinto el orden de importancia de cada una según el lugar analizado. Esto es claramente justificable por la magnitud y características fisiográficas de la cuenca. La cuenca de aportes del río Uruguay a Salto Grande alcanza unos 244000 Km².

Tradicionalmente la cuenca que llega hasta la presa de Salto Grande (figura 1) ha sido dividida por la Comisión Técnica Mixta de Salto Grande (CTM) en: Cuenca Alta, Media e Inmediata:

La Cuenca Alta abarca desde las nacientes (en la confluencia de los ríos Pelotas y Canoas) hasta la provincia argentina de Misiones, con un área de aportes de 75000 Km² en la desembocadura del río Pepirí-Guazú. Es la región con mayores precipitaciones (que llegan a ser superiores a 2000 mm/año).

La Cuenca Media se considera hasta la ciudad de Paso de los Libres, con unos 125000 Km². Desde la margen izquierda resultan importantes los aportes de los ríos Ijuí, Piratíní e Ibicuí.

La Cuenca Inmediata abarca los aportes desde Paso de los Libres hasta la represa, incluyendo los ríos y arroyos que desembocan directamente en el lago, correspondiendo aproximadamente un 20% del total del área que aporta a la presa.

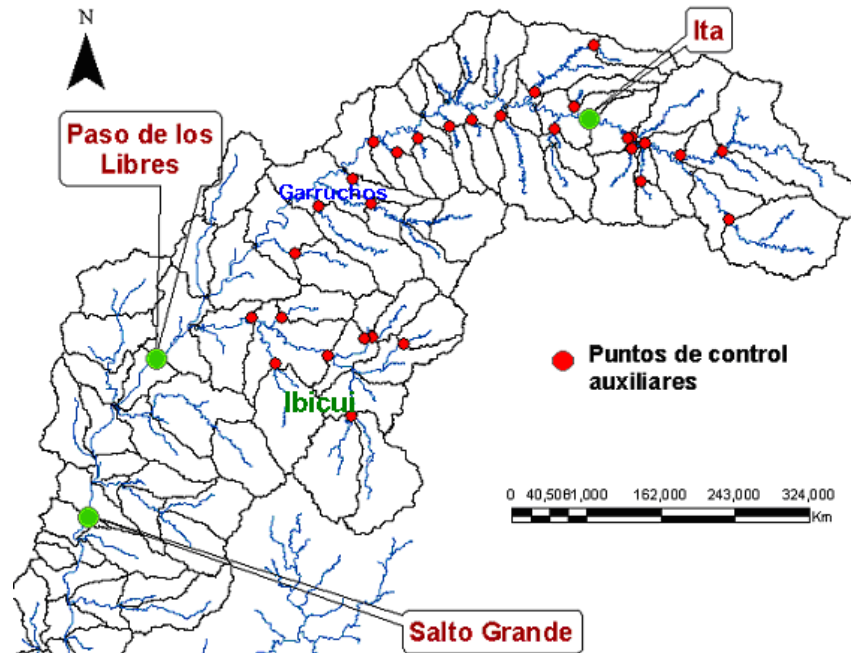


Figura 1:

2 METODOLOGÍA DE ESTIMACIÓN DE LA CMP

La metodología adoptada para la estimación de la CMP parte de la estimación de la PMP (Precipitación Máxima Probable) presentada por Hidroestructuras (2007). Ese trabajo establece que las tormentas críticas de las cuencas alta y baja del río Uruguay pueden ocurrir en diversas condiciones de localización y de sincronización temporal. A partir de esa afirmación se analizaron varias combinaciones posibles (tiempo y espacio) de tormentas críticas para seleccionar aquellas que parecían capaces de generar los hidrogramas más críticos en Salto Grande.

A los eventos críticos resultante del proceso anterior fue aplicada una transformación lluvia-caudal con un modelo previamente calibrado y verificado con eventos críticos (3 de calibración y 3 de verificación). El resultado fue un conjunto de hidrogramas que representan la crecida máxima probable. Es posible elegir uno de ellos en particular como "la CMP" o hacer un análisis general de las condiciones más críticas que la cuenca de aportes podría generar. La variación entre los diversos hidrogramas generados no fue grande, por lo que cualquiera de los dos análisis lleva a resultados semejantes.

2.1 PMP y tormentas de proyecto

Según recomendado en el estudio de la PMP (HidroEstructuras, 2007) la Tormenta de Proyecto fue analizada a partir de la combinación de las tormentas maximizadas de 1959 y 1983, que son los eventos más críticos para la cuenca baja y la cuenca alta, respectivamente.

El procedimiento seguido para combinar las tormentas tiene tres componentes:

1. Desplazamiento de la tormenta, de su posición original a otras posiciones, para maximizar el caudal generado. Ese desplazamiento es en los sentidos norte-sur y este-oeste, y no incluye rotación de la tormenta. Esos desplazamientos son llamados de aquí en más "corrimientos";
2. Sincronización de las tormentas de cuenca alta y cuenca baja, de manera que los caudales pico lleguen juntos a Salto Grande;
3. Definición de la lluvia a utilizar en la cuenca media, ya que debido al desplazamiento se genera un área de superposición de las tormentas utilizadas. El área de superposición coincide aproximadamente con la cuenca del río Ibicuí.

2.2 Modelación lluvia-caudal

La transformación lluvia-caudal se hizo con la combinación de un modelo hidrológico (HEC-HMS, HEC, xxx), que simula la generación de escurrimiento de las cuencas de aporte, con un modelo hidrodinámico (HEC-RAS, HEC, xxx) para la propagación de ese escurrimiento a lo largo del río Uruguay. El objetivo básico de la modelación hidrológica – hidrodinámica fue disponer de un modelo calibrado para grandes crecidas (aguas muy altas) para luego aplicar el mismo a la propagación de crecidas maximizadas, y generar la CMP. El modelo hidrodinámico fue utilizado porque las características del río Uruguay, en especial su baja pendiente, hacen que no sea válida la aplicación del método Muskingum-Cunge disponible en el HEC-HMS.

Se calibraron los modelos con las crecidas correspondientes a los años 1983, 1992 y 1997/98, y se utilizaron para verificar la validez de las calibraciones las crecidas de los años 1959, 1986 y 1990. La figura 1 muestra la cuenca del río Uruguay, los puntos inicial y final de la simulación hidrodinámica (Itá y Salto Grande) y algunos de los otros puntos de control utilizados en las modelaciones hidrológica e hidrodinámica. Los puntos de control principales fueron los puestos fluviométricos del río Uruguay, adicionalmente se usaron estaciones fluviométricas sobre los ríos interiores como puntos auxiliares de control para la calibración hidrológica.

2.2.1 Modelación hidrológica.

El proceso de calibración del modelo hidrológico, aguas arriba de Salto Grande, tuvo como objetivo definir los parámetros de los métodos adoptados en el montaje de la re-presentación de los aportes al río Uruguay en el trecho Itá – Salto Grande. A los efectos de la calibración el trecho

fue dividido en dos partes: Itá – Paso de los Libres y Paso de los Libres – Salto Grande. El programa utilizado para implementar el modelo hidrológico es el HEC-HMS, versión 3.0.1, desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros de EEUU.

La configuración del modelo hidrológico montado en el HEC-HMS utiliza los siguientes algoritmos: i) SMA-HMS, algoritmo de simulación continua para separación de escurrimiento. Este algoritmo incluye la propagación subterránea; ii) Clark-HMS, para propagación en cuenca; iii) Muskingum-Cunge, para propagación en los cursos de agua interiores de la cuenca de aporte al río Uruguay.

Para asegurar la representatividad del modelo final, el juego de parámetros resultante de la calibración debía cumplir dos requisitos: i) ser válido para todos los eventos, admitiendo pequeñas variaciones para situaciones específicas tales como condiciones iniciales de largo plazo; ii) la variación espacial de los parámetros debe corresponderse aproximadamente con la variación espacial de las características de las subcuencas. El primer requisito implica que el conjunto final de parámetros representa adecuadamente todos los eventos, pero no es el óptimo para eventos individuales.

Los principales criterios utilizados para la discretización en subcuencas de la cuenca de aporte al río Uruguay fueron: i) Límites de tamaño definidos en el pliego de licitación (subcuencas no mayores que 15.000 km² hasta Paso de los Libres y no mayores que 5.000 km² entre ese punto y Salto Grande); ii) Posibles puntos de control para calibración (puestos fluviométricos con datos de caudal). Los puestos fluviométricos utilizados como puntos auxiliares fueron 29, y están mostrados en la figura 1; iii) Agrupamiento de subcuencas pequeñas resultantes del procesamiento del modelo digital de elevación (MDE).

A partir del procesamiento del MDE y de la consolidación de los resultados de ese procesamiento se generó una primera versión de la división en subcuencas. Esa discretización fue sometida a CTM, que sugirió algunas modificaciones. EL resultado final de ese proceso de interacción es una división en 87 subcuencas, con un tamaño máximo de cuenca de 10000 km² (río Canoas, Brasil) y solo 5 % de las subcuencas tienen menos de 1000 km²

La estrategia general de calibración fue:

- Calibración basada en secuencias de eventos (1997-98, 1992) que incluyen tormentas tipo I, II y III
- Control de consistencia y ajustes locales por subcuenca
- Calibración regional
- Transposición espacial de parámetros entre regiones y a las subcuencas sin datos
- Parámetros validos entre eventos

Las principales fuentes de incerteza en la calibración fueron los errores en la lluvia, los errores en los caudales (extrapolación de la curva h-Q), los cambios a lo largo del tiempo en las condiciones de la cuenca (de las subcuencas) y las limitaciones en los algoritmos del modelo

En la calibración, las inconsistencias detectadas en la lluvia fueron corregidas, cuando posible, y lo mismo fue hecho con las otras fuentes de incerteza. En la verificación no hubo correcciones, los resultados del modelo absorben todos los errores.

2.2.2 Modelación Hidrodinámica

El objetivo básico fue disponer de un modelo hidrodinámico calibrado para grandes crecidas (aguas muy altas) para luego aplicar el mismo a la propagación de la CMP, así como a simulaciones de rotura de presa. El software utilizado fue el HEC-RAS 4.0B, desarrollado por el U.S. Army Corps of Engineers – Hydrologic Engineering Center.

VIII Congreso Argentino de Presas y Aprovechamientos Hidroeléctricos
22 al 25 de abril de 2015
Santa Fe - Argentina

En total, en el tramo Itá – Presa se dispuso de 549 secciones topobatimétricas transversales entre recopiladas y relevadas, discriminadas de la siguiente forma (tabla xx):

Tabla xx. Perfiles Transversales Utilizados

Tramo	Cant. de secciones transversales
Itá – El Soberbio	186 sec. tr. en 345 Km; resulta un promedio de 1 sec. tr. c/ 1.9 Km
El Soberbio – Garruchos	140 sec. tr. en 288 Km; resulta un promedio de 1 sec. tr. c/ 2 Km
Garruchos – Monte Caseros	132 sec. tr. en 74 Km; resulta un promedio de 1 sec. tr. c/ 2.8 Km
Monte Caseros – Presa	37 sec. tr. en 142 Km; resulta un promedio de 1 sec. tr. c/ 3.8 Km

Como condición de borde aguas arriba se utilizaron hidrogramas (caudal – tiempo) observados o simulados:

Aguas arriba: hidrograma (Q-t) en Itá, observado u obtenido de la simulación hidrológica HEC-HMS.

Aguas abajo: liminigrama (h-t) en presa, observado.

Afluentes laterales: obtenidos de la simulación hidrológica con HEC-HMS u observados (cuando se disponían para calibración). Dadas las características de los aportes, éstos se consideran como puntuales (en general para los cursos más importantes) y distribuidos (aportes de cuencas intermedias entre dos secciones de aporte puntual)

Los afluentes más relevantes de la cuenca inmediata al embalse se han simulado como ramas del modelo (Miriñay, Cuareim, Mocoretá, Yacuy, Arapey, Mandisoví, Itapeby, Gualeguaycito).

Para la calibración, siempre que fue posible se utilizaron caudales observados en los diversos puntos de aporte. En los puntos de ingreso de caudales al modelo donde no existe información, se adoptaron los valores que surgen de la simulación hidrológica HEC-HMS. Cabe destacar que los "caudales observados" son, en general, alturas observadas transformadas a caudal por alguna relación h-Q; esta es la principal fuente de incerteza de la modelación hidrodinámica, ya que al trabajar con eventos extremos los caudales son usualmente mucho mayores que los medidos, y la curva h-Q es una extrapolación con un margen de error desconocido.

Teniendo en cuenta la información disponible de estaciones con información hidrométrica en los afluentes al río Uruguay (ver figura de la cuenca), el procedimiento de calibración consistió en subdividir el modelo en subtramos: Subt. 1: Paso de los Libres – Presa; Subt. 2: San Javier – Paso de los Libres; Subt. 3: Itá – San Javier

Se comenzó desde el tramo aguas abajo, comparándose en primer lugar las diferencias entre volúmenes de crecidas observados y simulados, procediéndose de manera iterativa con el ajuste en paralelo del modelo hidrológico, si era necesario. Una vez alcanzadas diferencias de volúmenes consideradas razonables, de acuerdo a todos los condicionantes intervinientes (en general menores al 5% - 10%), se prosiguió con el ajuste de la forma entre hidrogramas simulados y observados, a través de los coeficientes de Manning.

Una vez considerada suficiente la concordancia entre hidrogramas y limnigramas (observados y simulados) del subtramo de aguas abajo (cuenca inmediata) se procedió a simular el tramo que se inicia en San Javier, ajustándose los parámetros de rugosidad del tramo San Javier – Paso de los Libres. Se destaca que en todos los casos, la condición de borde de aguas abajo, es la cota del pelo de agua en la presa de Salto Grande.

2.1.3 Resultados de la Calibración y Verificación

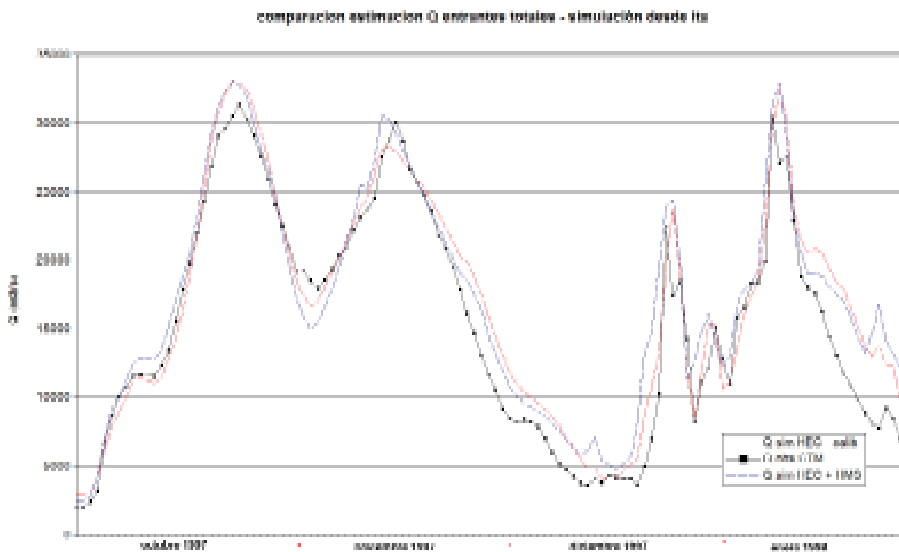
Un indicador práctico y completo de una calibración es la comparación visual de la crecida simulada versus la observada, cuando se adoptan para visualizar escalas apropiadas según la precisión requerida en el trabajo. Sin embargo, esta comparación puede ser subjetiva, y por lo tanto, además de la misma, resulta conveniente adoptar otros indicadores para cuantificar errores de simulación.

En el proceso de calibración y verificación fueron controlados entre 200 y 300 hidrogramas. En general, en los puntos auxiliares de la calibración hidrológica el proceso de análisis fue visual y cualitativo, mientras que en los puntos a lo largo del río Uruguay (calibración hidrológica-hidrodinámica) el proceso incluyó la cuantificación de los errores.

No existe un criterio internacionalmente aceptado para evaluar la bondad de los modelos aplicados en simulación hidrológica e hidráulica. No obstante es frecuente encontrar trabajos donde una diferencia porcentual entre caudales observados y calculados del 10 – 15% es considerada buena y coeficientes de correlación superiores a 0.85 son también considerados como indicadores de una buena performance del modelo. Esto último es particularmente cierto en casos de simulaciones lluvia – caudal de tipo continuo.

Los valores generales adoptados como errores aceptables (en %) para volúmenes y caudales pico fueron entre 10 y 15 % para calibración y aceptando hasta 20 % en la verificación. En el tramo más cercano a la presa (Paso de los Libres - Salto Grande) el valor fue de 10 % para ambos casos.

La figura 2 presenta la comparación entre los caudales de entrada al embalse observados por CTM, calculados con el RAS alimentado con caudales observados y calculados por el RAS alimentado por HMS. Ese último caso es la "síntesis" de la modelación, ya todos los procesos son simulados en toda la extensión de la cuenca y del río, y a su vez es representativo de la capacidad de la modelación, ya que se simulan 4 picos de crecida a lo largo de 4 meses (oct. 97 - ene. 98).



Crecida oct./97-ene.98. Caudales totales ingresantes al embalse

3 DEFINICIÓN DE LAS TORMENTAS DE PROYECTO

Como mencionado en el ítem 2.1, la Tormenta de Proyecto fue analizada a partir de la combinación de las tormentas maximizadas de 1959 y 1983. Dado que el objetivo final es maximizar los caudales (hidrogramas) en Salto Grande, es imposible conocer el real impacto de una combinación de tormentas solo a partir de la lluvia. En función de eso fueron montadas varias

VIII Congreso Argentino de Presas y Aprovechamientos Hidroeléctricos
22 al 25 de abril de 2015
Santa Fe - Argentina

combinaciones de corrimientos y sincronizaciones de las tormentas maximizadas. La tabla xx presenta los corrimientos considerados más críticos, que fueron utilizados en la composición de las posibles tormentas de proyecto, y la figura xx muestra un ejemplo de esos corrimientos.

Tabla xx: Corrimientos de las tormentas 1959 y 1983 maximizadas.

Corrimiento 1959 - 1	1 grado al norte.
Corrimiento 1959 - 2	0.3 grados al norte y 1.12 grados al oeste.
Corrimiento 1959 - 3	0.5 grados al norte y 1 grado al oeste.
Corrimiento 1983 - 1	1.17 grados al sur y 0.58 grados al oeste
Corrimiento 1983 - 2	1.04 grados al oeste y 0.91 grados al sur
Corrimiento 1983 - 3	1.9 grados al sur y 2.4 grados al oeste

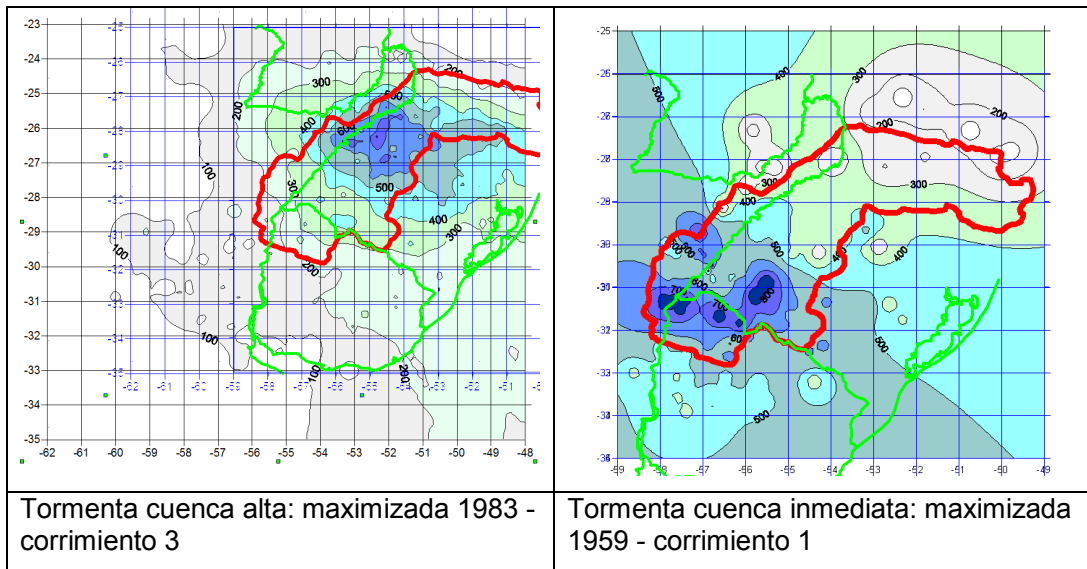


Figura xx: Combinación de eventos críticos de la CMP-1

A partir de los 3 corrimientos definidos para cada una de las tormentas críticas (1959 y 1983) se pueden generar 18 combinaciones diferentes. Eso es porque cada corrimiento de la tormenta de cuenca baja se puede combinar con cualquiera de los tres corrimientos de la tormenta de cuenca alta. A su vez, cada una de esas 9 combinaciones tiene 2 alternativas, usar en la cuenca del río Ibicuí la lluvia correspondiente a la tormenta de cuenca baja o la de cuenca alta.

Las 18 combinaciones mencionadas fueron simuladas en el modelo HMS para hacer una selección preliminar de aquellas combinaciones que generaban caudales más críticos. Esas simulaciones resultaron en la selección de 5 combinaciones, que fueron sometidas a un análisis más profundo y simulación completa con el tándem HMS-RAS; las combinaciones seleccionadas se presentan en la tabla xx y los resultados de las simulaciones de las mismas es presentado en el ítem 4.

Tabla xx - Combinaciones de tormentas críticas (1959 y 1983) para generar la CMP

Cuenca alta	Cca. inmediata	Ibicuí	CMP
c3 1983	c1 1959	Ibicuí 1959	CMP-1
c2 1983	c1 1959	Ibicuí 1959	CMP-2
c3 1983	c1 1959	Ibicuí 1983	CMP-3
c2 1983	c1 1959	Ibicuí 1983	CMP-4
c2 1983	c3 1959	Ibicuí 1959	CMP-5

4. HIDROGRAMAS DE LAS CMP

4.1 Simulación de las combinaciones de tormentas

Para la simulación hidrológica de los eventos críticos se utilizaron los mismos parámetros que resultaron del proceso de calibración y verificación. Esos eventos ya son *per se* eventos extremos, y el análisis de las variables de estado mostró que en general acaban saturando el suelo, situación a partir de la cual la reacción de la cuenca cambia muy poco con la magnitud de la lluvia. Además, el efecto de maximización generado por los corrimientos se debe al área (cantidad de subcuencas) afectada por las lluvias extremas, y por lo tanto es independiente de los parámetros hidrológicos.

Como proyecto base para montar la simulación de la Tormenta de Proyecto se adoptó el correspondiente a las crecientes de 1997-98. En ese proyecto la lluvia de las tormentas analizadas fue colocada a partir del 25 de diciembre de 1997, después que la creciente de octubre-noviembre de 1997 ha terminado de pasar. Eso implica utilizar un periodo de calentamiento de casi 6 meses, que incluye una creciente muy grande inmediatamente antes de la lluvia de proyecto. Esa creciente hace que la lluvia de proyecto caiga sobre una cuenca con un estado de humedad próximo a la saturación, o sea, condiciones iniciales críticas.

4.2 Caudales máximos, volúmenes y duraciones

El análisis del desarrollo de la CMP toma como base la combinación de tormentas críticas que generó el hidrograma con máximo caudal pico. Sin embargo, como se puede ver en la figura xx varias combinaciones generaron hidrogramas con caudales pico muy poco menores que el máximo. Los 5 cinco mayores caudales pico están dentro de un margen de 3 %, y los volúmenes y duraciones de esas 5 CMPs son también muy semejantes. En función de eso, el análisis es presentado con un enfoque más genérico, para intentar abarcar las diferentes variantes que generarían resultados básicamente equivalentes.

La CMP puede ser considerada como siendo formada a partir de 3 “componentes”, que en el sentido de escurrimiento son: 1) la lluvia en la cuenca alta o media-alta, o sea aproximadamente la zona comprendida desde Machadinho hasta aguas arriba de la cuenca del río Icamaqua; 2) la cuenca del río Ibicuí, y 3) la cuenca denominada “inmediata”, considerada desde el río Cuareim hasta Salto Grande.

Para la cuenca aguas arriba de La Cruz las precipitaciones generadas por los corrimientos 2 y 3 de la tormenta maximizada de 1983 son las que provocan los mayores caudales, con poca diferencia entre los resultados de una y otra tormenta.

Para la cuenca inmediata el corrimiento 1 de la tormenta maximizada de 1959 es el que provoca la situación más crítica. En la cuenca del río Ibicuí, la combinación más crítica se obtiene con la precipitación de la tormenta de cuenca inmediata.

El máximo valor de caudal de pico es de 74,061 m³/s y corresponde a la CMP-1. Los valores de caudal pico de las otras combinaciones están dentro de un intervalo de 5 %.

El análisis de los hidrogramas también muestra que las cinco combinaciones simuladas generan resultados bastante semejantes. En todos los casos el efecto de la tormenta comienza a sentirse 5 días después del inicio de la tormenta en la cuenca alta (día 0), y el pico ocurre 15 días después de ese día.

Como se puede observar, las CMP son de largo aliento, durante 6 días el caudal sería superior a 65,000 m³/s. Para 55,000 m³/s el tiempo de permanencia sería de 10 días.

La figura xx muestra la CMP en comparación con las crecientes históricas, lo que sirve para colocar en contexto la magnitud de la CMP. La figura xx muestra los hidrogramas a lo largo del río Uruguay, eso permite tener noción del desarrollo de la crecida, y de los tiempos en los que la misma sería detectada.

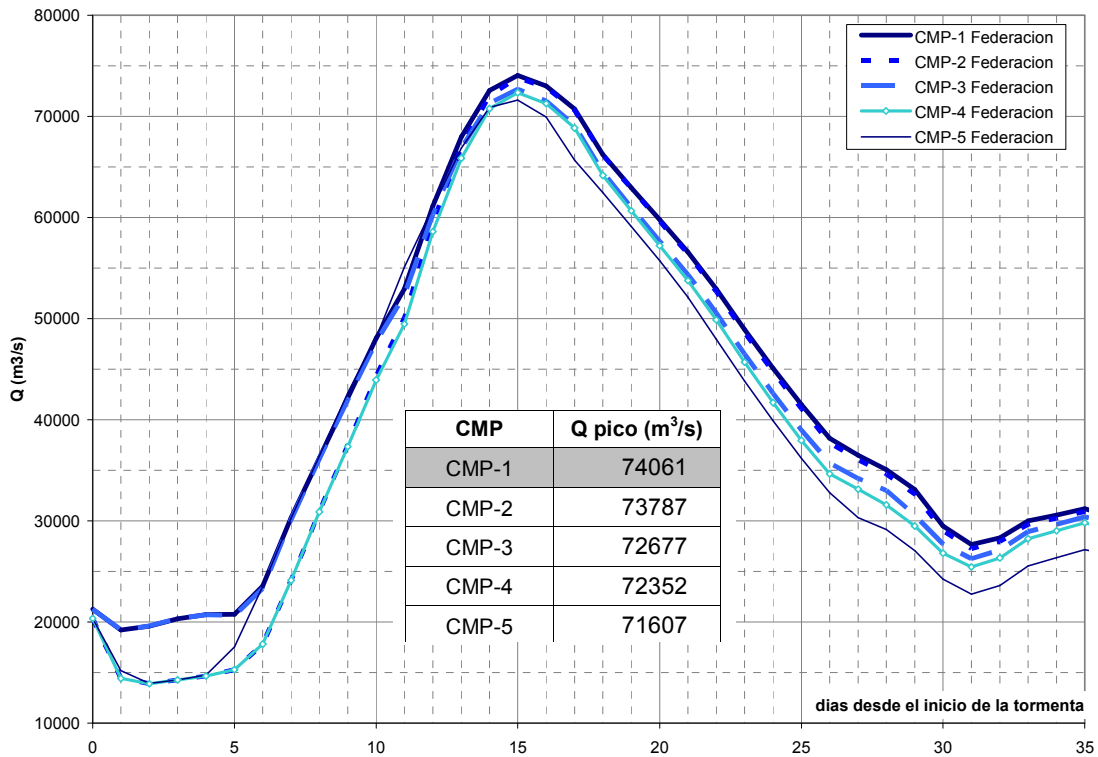


Figura xx - Hidrogramas correspondientes a las CMP simuladas

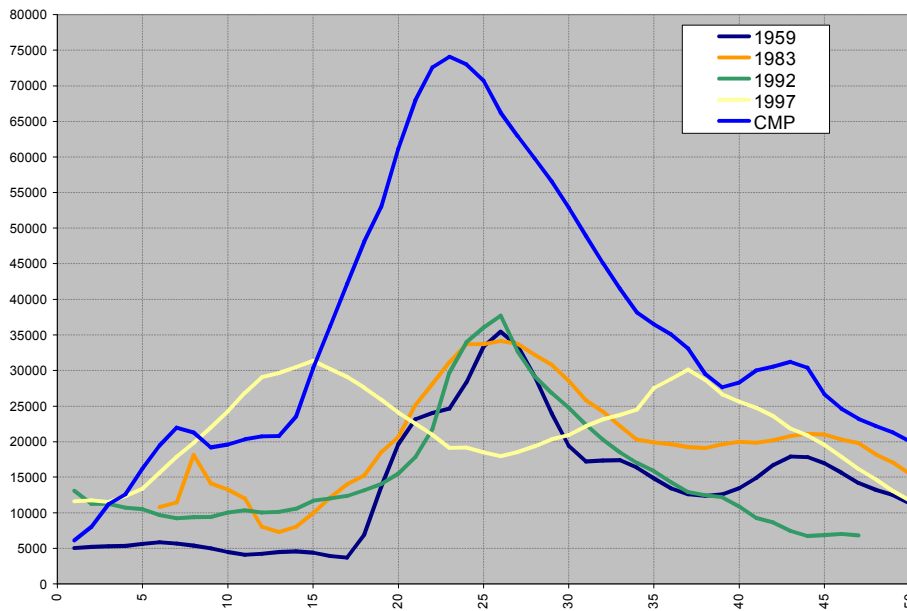


Figura xx: Comparación entre la CMP y las crecientes históricas.

5. CONCLUSIONES

Diferentes combinaciones de tormentas críticas en la cuenca alta, media e inmediata pueden generar hidrogramas básicamente equivalentes en términos de "criticidad";

En los hidrogramas obtenidos por simulación de las lluvias críticas, el caudal pico no parece ser el único factor crítico. Tanto el volumen como la duración de esos hidrogramas están muy por arriba

de los eventos máximos registrados;

En relación al desarrollo de la CMP, dos aspectos parecen ser destacables:

- recién entre Garruchos y Paso de los Libres es posible identificar la real magnitud del evento
- la crecida de la cuenca inmediata se genera por lluvias que ocurren durante el transito de la crecida de Paso de los Libres a Salto Grande

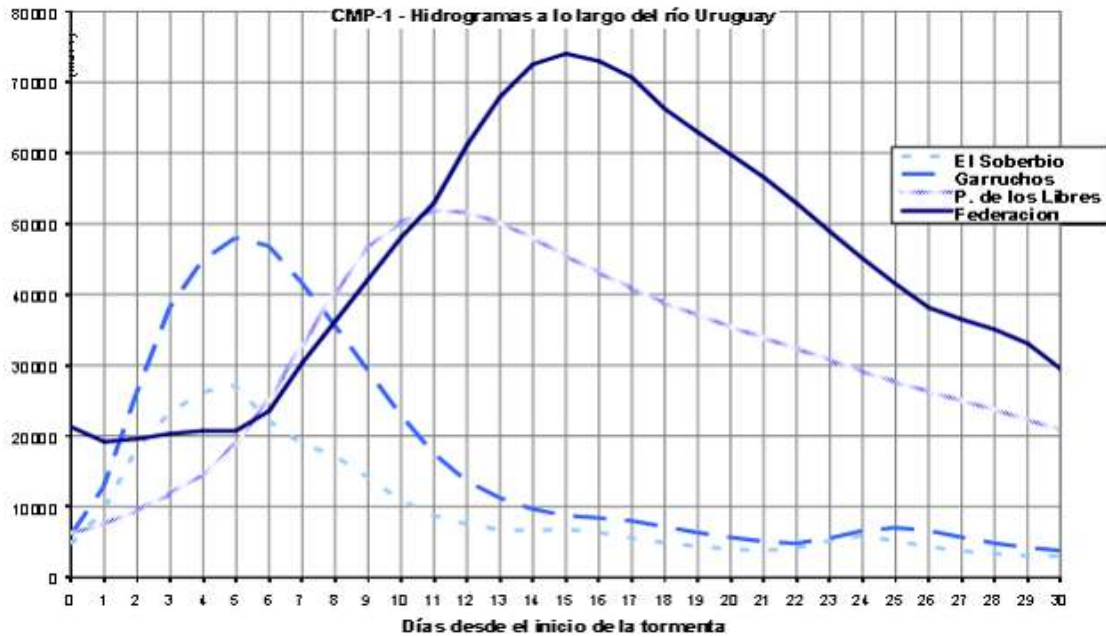


Figura xx - Hidrogramas a lo largo del río Uruguay para la CMP-1

6 BIBLIOGRAFIA