

ANÁLISIS DE RIESGO CONJUNTO EN LA DETERMINACIÓN DE CRECIDAS DE PROYECTO DE REGÍMENES COMPLEJOS

Carlos U. Paoli, Pablo A. Cacik y José E. Bolzicco¹

RESUMEN: El riesgo hidrológico asociado a las crecidas de proyecto para el caso de cuencas pequeñas y medianas puede representarse a través de la probabilidad de excedencia del caudal pico, pero esto no ocurre en el caso de grandes cuencas con regímenes de crecidas complejos, dando lugar a que a una misma crecida real le corresponda un período de retorno diferente según se efectúe el análisis de frecuencia del caudal máxima, el volumen o la duración de la misma. Se estudian las relaciones que existen entre las variables mencionadas a partir de los caudales diarios disponibles en el tramo medio del Río Paraná en la Argentina y se efectúan los análisis de frecuencia de extremos. En la zona de estudios las medidas estructurales y no estructurales de control y protección de crecidas se han proyectado en forma aislada, utilizando la característica de la crecida más apropiada para cada caso. Con el fin de verificar cual es el comportamiento de dichas obras existentes con crecidas de un mismo nivel de riesgo y adoptar la misma como crecida de proyecto de medidas complementarias, a partir de las relaciones estudiadas se definió un índice de crecida como el cociente entre el caudal máxima y el media de la crecida. Con este índice que integra las distintas variables en juego se efectuó el análisis de frecuencia y se estableció un procedimiento para adoptar valores de caudal máximo, volumen y duración que permiten la determinación de hidrogramas de diseño correspondientes a un determinado período de retorno.

INTRODUCCIÓN

El riesgo asociado a las denominadas crecidas de proyecto o crecidas de diseño para el caso de cuencas pequeñas y medianas es representado por la probabilidad de excedencia del caudal pico, ya que éste guarda una relación directa con el volumen y duración, al tratarse de hidrogramas simples que conservan una forma característica. En estos casos lo que se hace generalmente es estimar los caudales picos de crecidas para el período de retorno requerido y adoptar un hidrograma de acuerdo a esa forma típica.

Esto no ocurre en el caso de grandes cuencas con regímenes de crecidas complejos, dando lugar a que a una misma crecida real le corresponda un período de retorno diferente según se efectúe el análisis de frecuencia del caudal máximo, el volumen o la duración de la misma.

La Cuenca del Plata abarca una gran parte de Argentina, Bolivia, Brasil, Paraguay y Uruguay y dentro de la misma, el río Paraná constituye el elemento más

importante con una longitud de 3.700 km y una cuenca de aportes de unos 2.600.000 km² de superficie que representa un 84 % del total.

Los estudios se realizaron para el tramo medio del río Paraná, en la República Argentina (ver *Figura 1*), donde se encuentra la estación hidrométrica Corrientes (lat: 27° 58' S, long: 58° 49' O, altitud: 60 m.s.m) con registros disponibles desde principios de siglo, situada luego de la confluencia del río Paraná Superior con el río Paraguay, aguas abajo de sistemas hídricos en permanente evolución tanto por acción de la naturaleza como por obra del hombre.

En la zona de estudios las medidas estructurales de control y protección de crecidas en ejecución y proyectadas consisten fundamentalmente en terraplenes marginales de defensa y obras de paso y conducción de excedentes, mientras que las medidas no estructurales se refieren a la limitación del uso de zonas de riesgo y planes de evacuación de asentamientos humanos y de ganadería de islas.

¹ Cátedra de Hidrometeorología e Hidrología 1. Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas. Universidad Nacional del Litoral C.C. 217 -Ciudad Universitaria - 3000 - Santa Fe. Argentina, e-mail: cpaoli@fih1.unl.edu.ar - pacacik@fich1.unl.edu.ar - jeabolzi@fich.unl.edu.ar

Artículo publicado en *Ingeniería del Agua*. Vol.5 Num.2 (junio 1998), páginas 11-20, recibido el 12 de enero de 1998 y aceptado para su publicación el 28 de abril de 1998. Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo. En el caso de ser aceptadas, las discusiones serán publicadas conjuntamente con la respuesta de los autores en el primer número de la revista que aparezca una vez transcurrido el plazo indicado.

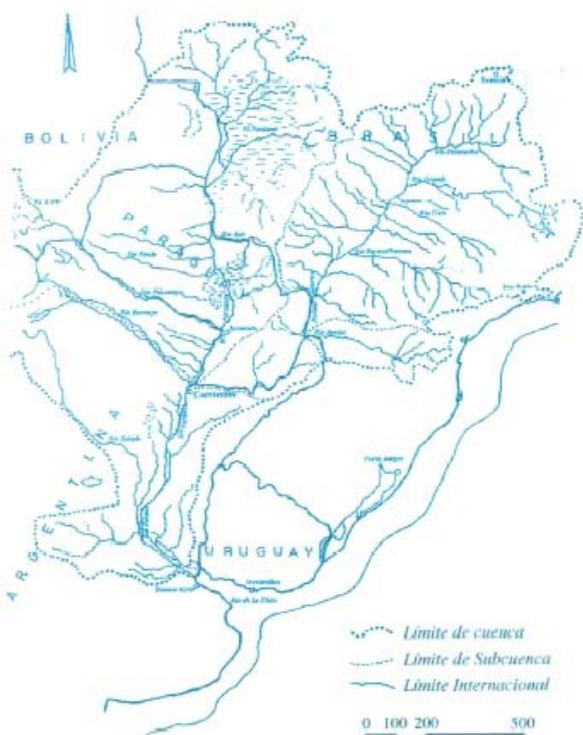


Figura 1. Cuenca de aportes del río Paraná

Los proyectos y obras realizados hasta el momento se han efectuado en forma aislada utilizando la asignación del nivel de riesgo que corresponde a la característica de la crecida que parecía más apropiada para cada caso en particular, pero cuando se integran en un sistema, el riesgo del conjunto está asociado a la recurrencia que se le asigne a la crecida en forma global (considerando caudal máximo, volumen y duración), aspecto éste que se desconoce.

En el caso que el volumen y la duración (sobre un cierto umbral) estén íntimamente relacionados, el problema podría tratarse con un modelo de valores extremos bivariados del caudal pico y volumen de crecida (teniendo en cuenta el grado de correlación entre estas variables). En este caso, además de las dificultades que presenta el análisis de la superficie bivariada, se adiciona el problema de la dispersión de valores de la correlación entre duraciones y volúmenes según se muestra más adelante, por lo cual un análisis de extremos bivariado tampoco resuelve completamente el problema.

No se encuentra en la literatura un tratamiento teórico y analítico para el problema de asignación de recurrencia a crecidas considerando en conjunto las tres variables: *caudal máxima, volumen y duración*, sino el tratamiento conjunto de las dos primeras. Se encuentran sí, desarrollos semiempíricos basados en una buena disponibilidad de información y el tratamiento estadístico de la misma, logrando por este camino una respuesta acorde al requerimiento que se plantea.

Partiendo del coeficiente de reducción definido por el NERC (1975) como la relación Caudal medio/Caudal

pico para duraciones fijas de crecidas, cuyas propiedades funcionales fueron analizadas por Bacchi *et al* (1992), se define un índice de crecidas que es la inversa del coeficiente de reducción pero para duraciones variables.

Se utilizó este índice para el análisis de frecuencia y para determinar crecidas de diseño que permitieran verificar el comportamiento de un sistema de obras existentes con un mismo nivel de riesgo y adoptar las mismas como crecidas de proyecto de las medidas complementarias que resultaran necesarias.

CARACTERÍSTICAS DEL RÉGIMEN DE CRECIDAS.

La diversidad de características fisiográficas, hidrometeorológicas e hidrográficas existentes en la cuenca aguas arriba de la estación Corrientes a estudiar, hacen conveniente realizar una breve interpretación del funcionamiento de las principales subcuencas a los efectos de obtener una mejor comprensión de los fenómenos hidrológicos involucrados, sobretodo en los procesos de crecidas.

La subcuenca del Paraná Superior donde las áreas de aportes de los ríos Paranaíba, Grande y Paranápanema son las mayores, tiene hasta recibir los aportes del río Iguazú una superficie de unos 900.000 km² y tiene gran influencia en el volumen y duración de las crecidas. Las precipitaciones se concentran por lo general en el período estival y a principios de otoño originando las crecidas de los meses de febrero y marzo. La subcuenca del río Iguazú con una superficie de 64.000 km², tiene características propias muy importantes en el desarrollo de las crecidas ya que recibe precipitaciones significativas y con distribución prácticamente uniforme a lo largo del año sobre un relieve acentuado. Este hecho provoca crecidas menos voluminosas que las originadas en el Paraná Superior, pero muy importantes desde el punto de vista de los caudales pico, pudiendo superponerse con otros aportes importantes de la cuenca.

A las subcuencas mencionadas es necesario adicionar los aportes de la subcuenca del río Paraguay, que posee un gran tamaño (1.115.000 km²), pero con características de sus crecidas diferentes a las del río Paraná propiamente dicho. Esto se debe a que en su cuenca alta se encuentra una gran zona deprimida, denominada "El Pantanal", que actúa como amortiguador natural de los derrames. Las precipitaciones son algo inferiores a las del Paraná Superior, de concentración estival, pero debido a la acción amortiguadora enunciada las crecidas presentan retardos y se extienden en el tiempo; o sea tiene menores caudales pico en un hidrograma aplanado. Los máximos se producen generalmente en invierno.

A partir de los caudales diarios disponibles en Corrientes se efectuó un completo análisis referido a la época del año en que se presentan los picos y a las características de los hidrogramas de crecidas, del período 1904/05 - 1994/95, del cual se sintetizan los siguientes aspectos:

El 46% de los picos que superan los 25000 m³/seg se han presentado en los meses de febrero y marzo, porcentaje que alcanza al 50% si solo se consideran los primeros máximos como máximos anuales. Muy similar es también el porcentaje de crecidas que superan los 30.000 m³/seg para éste bimestre. En el trimestre mayo-junio-julio se presentan un 23% de los picos, la mitad de ellos específicamente en junio. En cuanto a la forma, se producen dos tipos de crecidas que podrían diferenciarse:

- Aquellas de subida relativamente rápida, empuntadas, generalmente con un pico importante y de corta o media duración, aún cuando se hayan presentado picos precedentes.
- Aquellas de mayor volumen y duración, con subidas más lentas, con uno o mas picos importantes que se presentan sucesivamente.

Además ambas pueden presentarse con el pico máximo en febrero-marzo o en el trimestre mayo-junio-julio, por lo que en muchos casos es imposible realizar una separación de las mismas.

En relación a las series de tiempo, la simple observación cronológica de los caudales máximos anuales muestra una tendencia a la aparición de montos relativamente mayores en los últimos 25 o 35 años (ver Figura 2), lo que indicaría un aumento de la frecuencia con que determinados valores son alcanzados o superados. Los análisis de homogeneidad de la muestra completa, no rechazan la hipótesis de que la serie es homogénea para niveles de significación del 90%, pero si rechazan la

hipótesis de homogeneidad para niveles de significación del 95 % y mayores.

RELACIONES ENTRE VARIABLES SELECCIONADAS

Con el fin de analizar las características y relaciones del volumen, duración y pico de los hidrogramas de crecidas se estableció un umbral de caudal que se adoptó como valor de referencia y para el cual se definieron las siguientes variables :

- * **QMAX:** Caudales máximos correspondientes a los picos de crecida
- * **VOL:** Volúmenes de las crecidas a partir que los caudales superaran el umbral de referencia establecido.
- * **DUR:** Duración de cada crecida con caudales por encima del valor de referencia

Para seleccionar el umbral de referencia se realizó un análisis de sensibilidad entre 17.500 m³/Vseg (caudal medio anual) y 25.000 m³/seg. Con el umbral por debajo de 17.500 m³/seg se seleccionarían muchas ondas de crecidas secundarias sin interés estadístico debido a su escasa magnitud, mientras que por encima de los 25.000 m³/seg. comienzan a dejarse de lado algunas ondas de crecidas independientes en años de caudales bajos. Se adoptó como umbral para el muestreo el caudal de referencia de 20.000 m³/seg que corresponde al desborde del cauce principal.

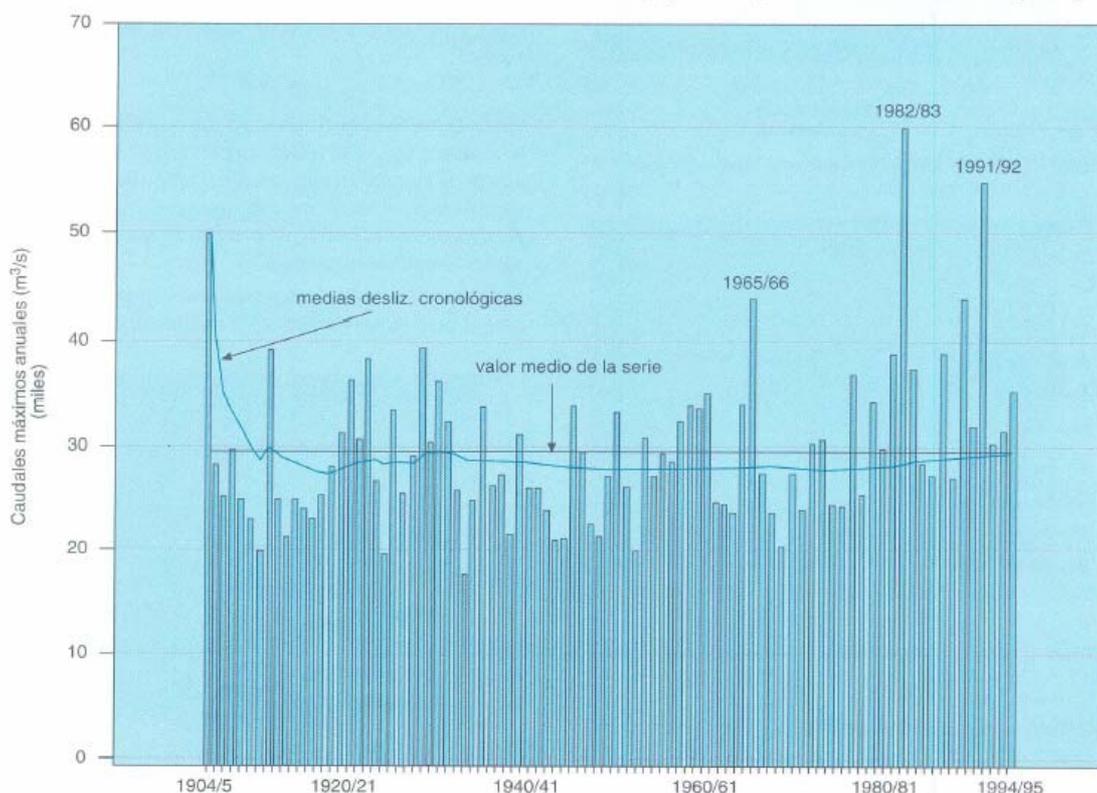


Figura 2. Caudales máximos anuales en Estación Corrientes. Medias deslizando cronológicas

En los casos en que se presentaran en el año hidrológico más de un máximo considerados independientes, se consignan también estos hidrogramas. La condición para considerar que los picos sean independientes es que el caudal descienda por debajo del caudal medio anual del río entre una y otra onda de crecida con lo que se asegura la presencia de un período de aguas bajas entre crecidas, indicativo de que la onda primera ha culminado.

Relaciones (Caudal máximo - Volumen) y (Caudal máximo - Duración)

Para estas relaciones se pueden establecer funciones de tipo cuadráticas con coeficientes de correlación $r=0,88$ y $0,75$ respectivamente, pero muestran una dispersión muy grande, sobre todo para los valores mayores, según se observa en las Figuras 3 y 4. Esto es producto de la complejidad de las ondas de crecidas involucradas que dan lugar a hidrogramas de formas muy variadas.

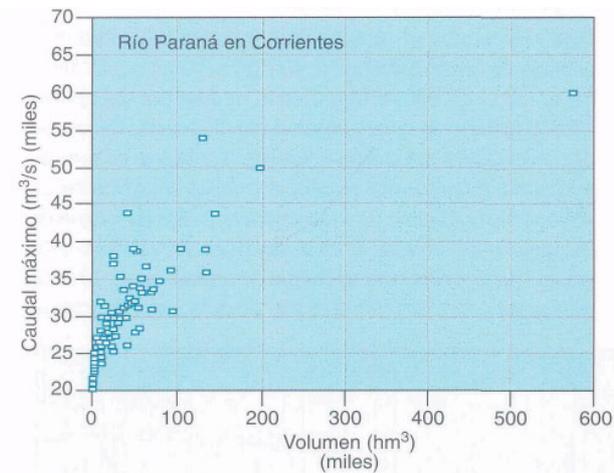


Figura 3. Relación Q_{max} - Volumen para caudales mayores a $20.000 \text{ m}^3/\text{s}$

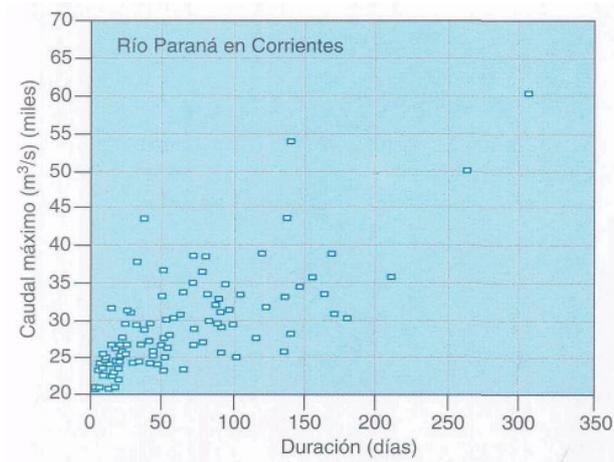


Figura 4. Relación Q_{max} - Duración para caudales mayores a $20.000 \text{ m}^3/\text{s}$

Relación (Volumen-Duración)

Esta relación da una dispersión menor como se observa en la Figura 5 pudiendo establecerse una ecuación de regresión de forma cuadrática con coeficiente de correlación $r = 0.94$.

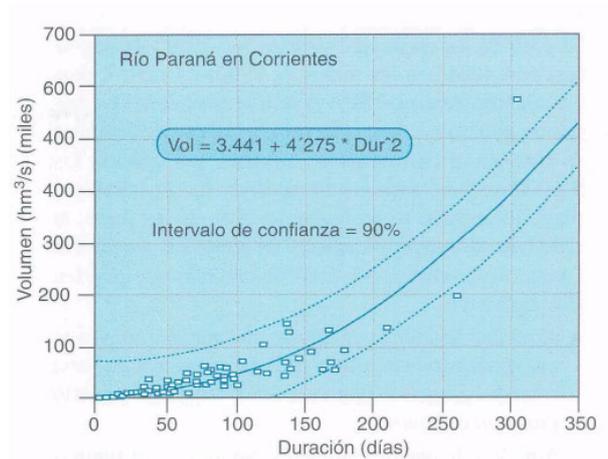


Figura 5. Relación Volumen- Duración para caudales mayores a $20.000 \text{ m}^3/\text{s}$

Relación (Caudal máximo-Caudal medio)

A partir de las variables analizadas se definió para cada evento seleccionado un valor de caudal medio de crecida haciendo $Q_{MED} = VOI/DUR + Q_{umbral}$. La relación entre Q_{MAX} y Q_{MED} que se observa en la Figura 6 muestra una correlación con $r = 0.90$.

Definición de un índice de crecida

Entre los estudios que se disponen sobre estimación de crecidas de diseño considerando el caudal máximo y el volumen del hidrograma, NERC (1975) adopta el llamado coeficiente o razón de reducción que se define como :

$$e_{D,T} = Q_{D,T} / Q_T$$

donde Q_T representa el caudal pico con período de retorno T años y $Q_{D,T}$ es el caudal medio para un intervalo de tiempo D con período de retorno T años. Se hace notar que en esta relación no necesariamente Q_T y $Q_{D,T}$ corresponden al mismo evento de crecida, ya que se determinan en forma independiente.

Bacchi *et al* (1992) desarrollan una expresión teórica para el coeficiente de reducción utilizando series estan-

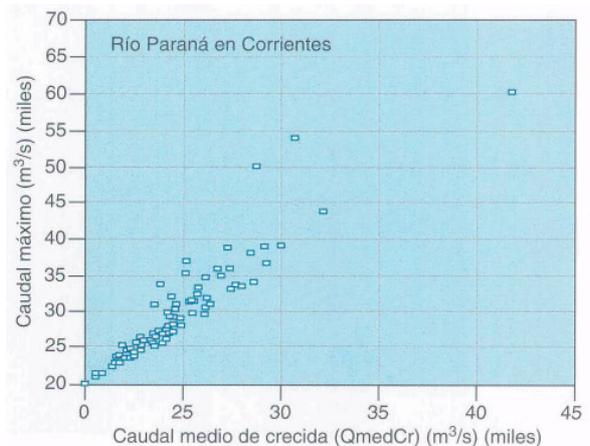


Figura 6. Relación Q_{max} - Caudal medio de crecida para caudales mayores a $20.000 \text{ m}^3/\text{s}$

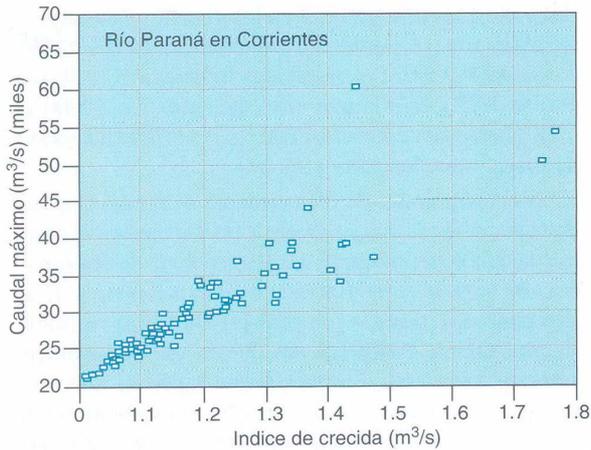


Figura 7. Relación Q_{max} - índice de crecida para caudales mayores a $20.000 \text{ m}^3/\text{s}$

danzadas para eliminar la estacionalidad intrínseca de las series y asumiendo procesos gaussianos. Determinan así curvas de tipo exponencial decrecientes de $\varepsilon_{D,T}$ en función de D , llegando a la conclusión de que son prácticamente independientes del período de retorno T . También encontraron que son poco sensibles a la distribución de los procesos componentes, con lo cual es posible asumir distribuciones no-gaussianas como las que corresponden a las series de caudales.

En el presente trabajo y a efectos de hacer un análisis de frecuencia de una característica global se definió un índice de crecida como el cociente entre el caudal máximo y el medio de cada crecida: $INDQ = Q_{MAX}/Q_{MED}$. El índice de crecida es conceptualmente similar a la inversa del coeficiente de reducción.

La diferencia principal está en que para el $\varepsilon_{D,T}$ el caudal medio de cada crecida se calcula para diferentes duraciones fijadas efectuando el análisis para cada una de ellas, mientras que en el $INDQ$ las duraciones son variables en función del tiempo en que se supera el umbral fijado y para cada crecida se determina un valor. En la Figura 7 se observa la relación $Q_{MAX} - INDQ$.

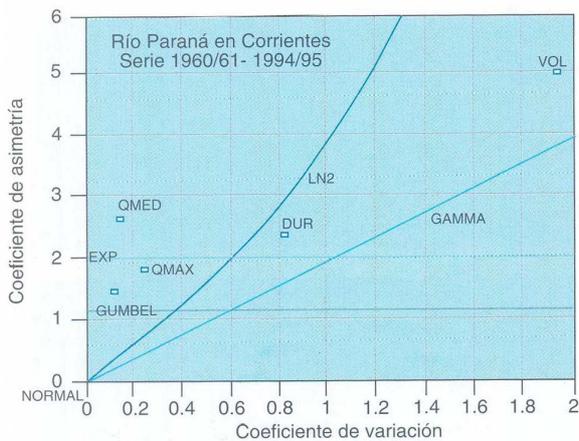


Figura 8 .Diagrama de relación de momentos. Coeficiente de variación- Coeficiente de asimetría

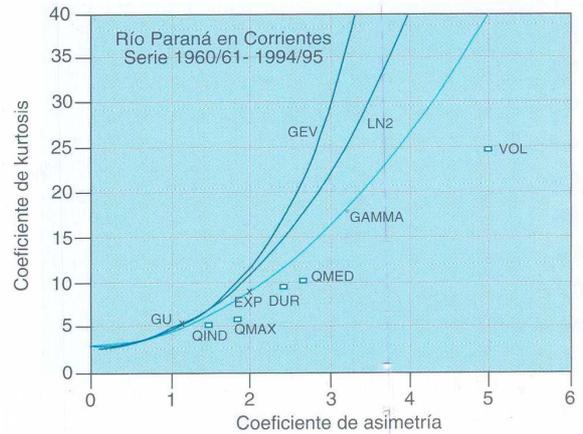


Figura 9. Diagrama de relación de momentos. Coeficiente de asimetría- Coeficiente de kurtosis

DIAGRAMAS DE ESTADÍSTICOS MUÉSTRALES ADIMENSIONALES DE LAS VARIABLES ANALIZADAS

Para el análisis de frecuencia de variables hidrológicas involucradas en los procesos de crecidas del Río Paraná y teniendo en cuenta los últimos avance en la materia sobre series de tiempo hidrológicas estudiadas en este río, Cacik y otros (1993), Sir Halcrow & Partners Ltd. (1994), se optó por la utilización de las series denominadas modernas, que serían aquellas que mejor reflejan el comportamiento actual de las crecidas en el río. Por lo tanto se adoptó como serie de trabajo, a la que se inicia para el año hidrológico 1960/61 y finaliza en año 1994/95. El año hidrológico se toma comprendido entre setiembre y agosto.

Los estadísticos muestrales adimensionales se han representado en los diagramas de relaciones de momentos convencionales que se observan en las Figuras 8 y 9, a efectos que permitieran obtener alguna inferencia acerca de cual distribución podría ser más adecuada, para cada caso. En estas figuras se incorporaron los estadísticos muestrales correspondientes a las series de caudales máximos, duraciones y volúmenes de crecidas, caudales medios de crecida y del índice $INDQ$

Teniendo en cuenta los conocidos problemas de sesgo que existen en las estimaciones de los parámetros muestrales a través del método tradicional de momentos, Hos-king (1989) y Cunanne (1989) indican que los diagrama de momentos L son una herramienta de diagnóstico superior, basados en relaciones lineales de los momentos ponderados por probabilidades. En la Figura 10 se aprecia el diagrama de momentos L .

Las series analizadas están más cercanas a una distribución de tipo gamma en el diagrama de momentos convencionales ($CS-CK$), mientras que se acercan más a una distribución de tipo GEV en el diagrama de momentos L ($L-CS, L-CK$).

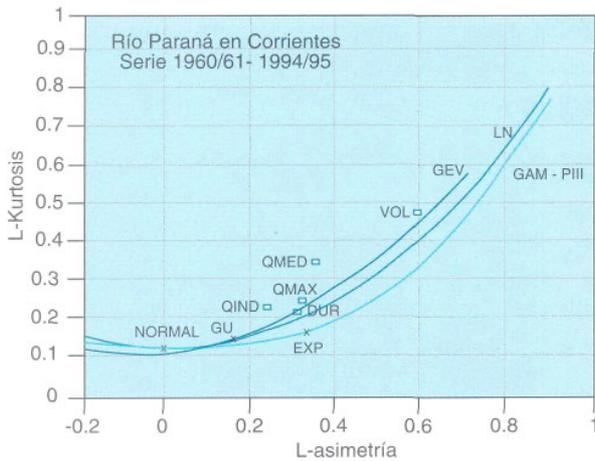


Figura 10. Diagrama de relación de momentos -L- -L Asimetría -L Kurtosis

ANÁLISIS DE FRECUENCIA DE PICOS DE CRECIDAS

A similitud de lo que sucede en casi todo el mundo (Vogel *et al*, 1996), la mayor cantidad de estudios antecedentes han sido realizados sobre los caudales máximos anuales, por lo que se dispone de una amplia experiencia nacional e internacional. Se utilizó el programa de análisis de frecuencia AFMULTI (FICH, 1991), que permite el ajuste de series muestrales a distintos tipos de distribuciones, utilizando para cada distribución el procedimiento de estimación de parámetros más eficiente entre: momentos convencionales (MoM), máxima verosimilitud (MV), momentos ponderados por probabilidades (MPP) y momentos mixtos (MxM). Las distribuciones candidatas fueron: log-normal de 2 parámetros (LN-MV), gumbel (GU-MPP), general de valores extremos (GEV-MPP), pearson III (PIII-MV), log-pearson III (LPIII-MXM), exponencial (2 parámetros) (EXP-MoM), wakeby (WA-MPP).

La incertidumbre existente en la muestra a partir de la cual se requiere inferir caudales para recurrencias de diseño, limita el uso de los tradicionales métodos de bondad de ajuste como los test de hipótesis y errores de ajuste en el campo muestral, por lo cual Paoli y otros (1992) utilizaron metodologías robustas para selección de distribución.

El procedimiento general de aplicación consistió en definir escenarios alternativos de población de crecidas, a través de diferentes modelos probabilísticos y parámetros representativos, y generar a partir de éstos, datos sintéticos, que son ajustados por las diferentes distribuciones candidatas. Para cada escenario y conjunto de distribuciones candidatas se calculan estimadores de eficiencia y sesgo, para las inferencias correspondientes a valores de recurrencia T establecidos, hechas con el conjunto de submuestras generadas.

Para el análisis de robusticidad, se definieron escenarios donde el valor de la media (Q) fue prácticamente el mismo que el de la muestra de referencia, el (S) variaba entre 6.800 y 7.250 (en el mismo orden del S observado)

y el (CS) entre 0.91 a 2 en los distintos escenarios. Se utilizaron para generar las distribuciones WA, GEV, LPIII, EXPy GU. Los resultados indicaron a la distribución EXP como la más eficiente, para T = 10000 y 1000 años, en los escenarios WA, GEV, LPIIIyEXP (donde los CS variaban entre 1.41 a 2).

En las conclusiones de dicho estudio se resalta que las distribuciones de dos parámetros actúan bien en el caso que la cola superior asumida para la población sea similar a la cola de la distribución de dos parámetros. Los denominados métodos robustos privilegian la elección de este tipo de distribuciones puesto que se sustituye información muestral imprecisa por hipótesis más eficientes (asimetrías fijas), y entre ellas serán mejores las que se acerquen más al rango de valores (particularmente de CS) que estén siendo asignados a la población.

En la Figura 77 se observa la representación gráfica de las distribuciones consideradas para la serie 1960/61 - 1994/95, adoptando una serie parcial de duración anual para selección de la muestra. A partir de la distribución EXP se determinan valores de caudales máximos anuales para diversas recurrencias y se asigna recurrencia los caudales máximos observados de las crecidas más importantes de la serie considerada.

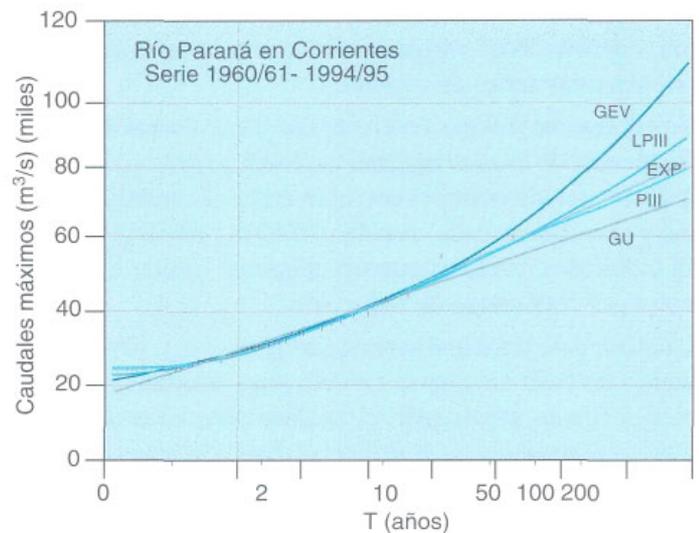


Figura 11. Análisis de frecuencia de caudales máximos

T (años)	Q _{máx} (m3/s)
200	67.400
100	61.800
50	56.200
10	43.200
2	30.250

año	Q _{máx} (m3/s)	año
1982/83	60.215	82
1991/92	55.000	43
1965/66	43.830	11
1989/90	43.800	11
1986/87	38.861	6

ANÁLISIS DE FRECUENCIA DE VOLÚMENES y DURACIONES DE CRECIDAS

A efectos de seleccionar las series muestrales de volúmenes y duraciones de crecidas para caudales superiores al umbral adoptado de 20.000 m³/s se tomaron los valores que correspondían a los picos de crecidas máximos seleccionados anteriormente para el análisis de frecuencia de QMAX. De esta forma se dispone de las mismas crecidas seleccionadas para cada una de las variables a analizar.

Las distribuciones de mejor ajuste tanto para volúmenes como para duraciones resultaron *GEV*, con las cuales se calcularon los valores para distintas probabilidades y se asignaron recurrencias para los valores de crecidas registradas.

T (años)	Volumen (hm ³ /s)
200	626.147
100	409.180
50	265.965
10	93.151
2	24.232

año	Volumen (hm ³ /s)	T (años)
1982/83	570.748	172
1965/66	142.806	19
1991/91	77.169	8
1976/77	62.238	6

T (años)	Duración (días)
200	345
100	284
50	132
2	55

año	Duración (días)	T (años)
1982/83	305	128
1965/66	137	11
1991/92	139	11
1960/61	146	13
1976/77	78	3.3

No quedan dudas que la crecida de 1983 es la de mayor magnitud de todas las registradas pero su importancia varía según la característica analizada ya que según el caudal pico le correspondería una recurrencia del orden de los 82 años que se aumentaría al doble si se considera el volumen y daría un período de retorno intermedio si se analizara la duración.

análisis de riesgo en crecidas

El orden para el resto de las crecidas se modifica notoriamente según la característica analizada, resultando que la crecida de 1992, segunda por su caudal máximo de recurrencia 43 años, solo le corresponde una recurrencia de 16 y 11 años por su volumen y duración respectivamente.

ANÁLISIS CONJUNTO

Los requerimientos planteados por planificadores y proyectistas para el diseño y dimensionamiento de medidas estructurales y no estructurales de control y protección de crecidas llevaron a adoptar fundamentalmente como crecida de proyecto aquella que se obtenía con el caudal pico estimado para el período de retorno deseado $Q_{MAX}(T)$ y adoptando una forma de hidrograma "tipo 1983" o "tipo 1992" (o sea multiplicando los caudales de estas crecidas por el factor de relación entre $Q_{MAX}(T)$ y el caudal pico registrado).

Correlación de valores estimados en forma independiente

La correlación de los valores estimados a partir del análisis como variables independientes de $Q_{MAX}(T)$ y $Q_{MED}(T)$ para igual período de retorno, corresponde a una recta según se observa en la *Figura 12*, sin embargo la dispersión de las crecidas reales alrededor de la recta obtenida es tan grande que no hace más que confirmar que la adopción de valores estimados en forma independiente no representa bien la globalidad de las crecidas reales. Esto invalida su uso como herramientas de diseño.

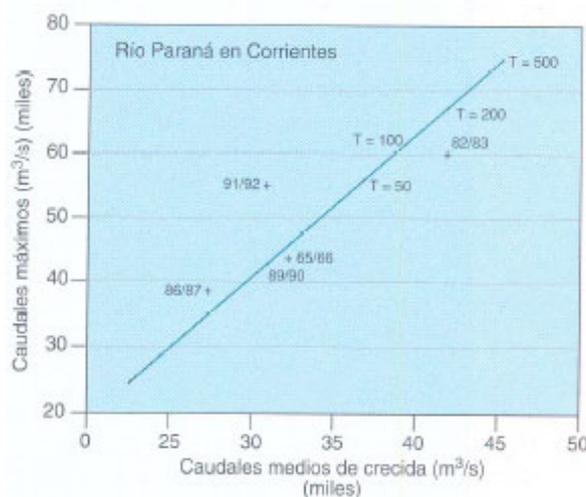


Figura 12, Relación caudal máximo- Caudal medio de crecida para distintas T

Análisis de frecuencia del índice de crecida

Se realizó el análisis de frecuencias para la serie de valores máximos de *INDQ*, presentándose los ajustes gráficos en la *Figura 13*, donde la distribución exponencial se considera de mejor ajuste y para la cual los valores de interés son:

T(años)	INDQ
200	1.88
100	1.78
50	1.68
10	1.43
2	1.19

RESULTADOS

Ante el requerimiento de recomendar una crecida de diseño de periodo de retorno T=100 años para verificación del sistema que debía cumplir con la condición de que su caudal máximo correspondiera al período de retorno establecido, con lo cual se fijó uno de los grados de libertad, se determinó del análisis de frecuencia de los caudales máximos el valor $QMAX_{(100)} = 61.800 \text{ m}^3/\text{seg}$.

Por otra parte se utilizó el índice de crecida estimado para el mismo recurrencia de T = 100 años que arrojaba un valor de $INDQ_{(100)} = 1.78$. Se obtuvo por relación el caudal medio que arroja un valor de $QMED = [QMAX_{(100)}/INDQ_{(100)}] = 34.719 \text{ m}^3/\text{seg}$, al cual si se resta el valor de umbral de $20.000 \text{ m}^3/\text{seg}$ le corresponde una relación VOL/DUR de $14719 \text{ m}^3/\text{seg}$.

Los análisis de frecuencia de volúmenes y duraciones realizadas en forma independiente proporcionaron para el período de retorno de 100 años valores de $VOL_{(100)} = 409180 \text{ hm}^3$ y $DUR_{(100)} = 284 \text{ días}$ lo que indica una relación $VOL_{(100)}/DUR_{(100)}$ de $16676 \text{ m}^3/\text{seg}$. Si se adoptara el valor de VOL o el de DUR alternativamente se acota inmediatamente el restante, definiéndose un campo en el cual es posible adoptar valores intermedios que preserven el valor de QMED calculado.

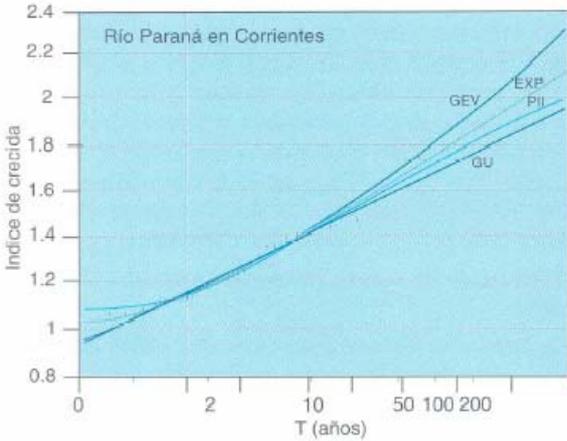


Figura 13. Análisis de frecuencia del índice de crecida

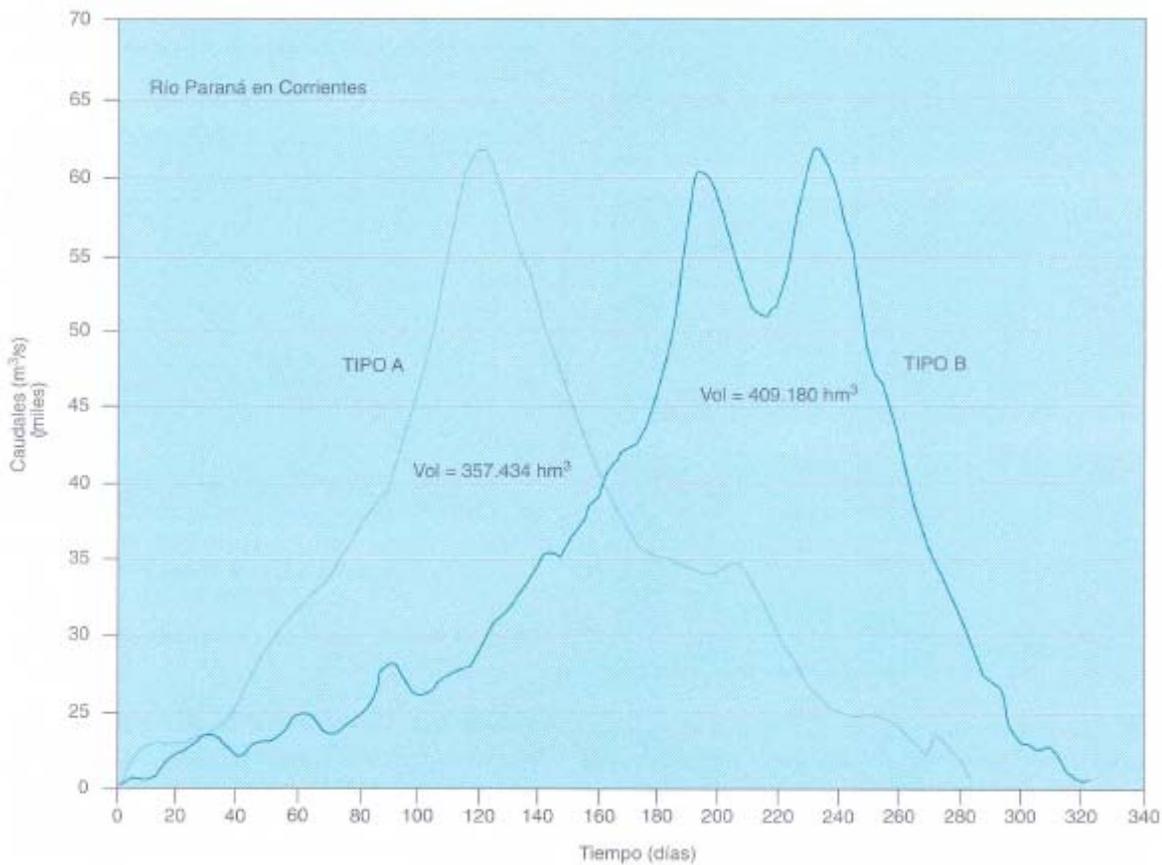


Figura 14. Hidrogramas de crecidas Tipo A y B, para recurrencia T = 100 años

De esta forma se definió un entorno para la crecida de diseño que tiene los siguientes valores:

$$Q_{MAX(100)} = 61.800 \text{ m}^3/\text{seg}$$

$$VOL_{(100)} = 409.180 \text{ hm}^3$$

$$DUR = 325 \text{ días (150 años)}$$

$$Q_{MAX(100)} = 61.800 \text{ m}^3/\text{seg}$$

$$DUR_{(100)} = 284 \text{ días}$$

$$VOL = 357.434 \text{ hm}^3 (75 \text{ años})$$

Estos valores trasladados a la gráfica VOL-DUR caen en una región factible alrededor de la curva de ajuste dentro de los intervalos de confianza al 90%. A partir de ellos se confeccionaron dos hidrogramas de crecidas de diseño, que se observan en la *Figura 14*. Para la crecida de menor volumen y duración se adoptó la forma tipo A y para la crecida de mayor volumen y duración la tipo B, de acuerdo a la experiencia empírica observada indicada anteriormente. Estos hidrogramas presentan el caudal máximo para recurrencia de 100 años y preservan el índice de crecida para la misma recurrencia.

Ambos hidrogramas pueden considerarse como correspondientes a un mismo nivel de riesgo desde el punto de vista del caudal máximo alcanzado y de su relación volumen/duración.

CONCLUSIONES

En regímenes hidrológicos complejos las crecidas reales presentan un grado de riesgo, probabilidad de sobrepaso, diferente según se considere el caudal máximo, el volumen o la duración. Como consecuencia de ello las obras y medidas no estructurales que se disponen estarán sometidas a un nivel de riesgo diferente según la variable utilizada para determinar valores de diseño correspondientes a un determinado período de retorno.

Cuando se procura adoptar una crecida de diseño ya sea para proyectar obras u operar sistemas ya construidos tratando de considerar el riesgo conjunto, se propone analizar las relaciones entre las variables caudal máximo, volumen y duración y determinar un índice de crecida como relación entre las tres variables. A partir del análisis de frecuencia de cada variable en forma independiente y del índice de crecida, es posible ir adoptando valores que preserven similar nivel de riesgo en al menos dos variables.

Para el caso del río Paraná se han determinado de esta forma dos hidrogramas de crecidas de diseño tipo, recomendándose el uso de ambos para diseño y verificación.

De esta forma se dio solución al requerimiento planteado por ingenieros y economistas que necesitaban disponer de diferentes parámetros hidrológicos coherentes para el dimensionamiento de obras, regulación del uso del espacio y estimación de daños con una aproximación suficiente.

LISTA DE SÍMBOLOS

QMAX:	Caudales máximos correspondientes a los picos de crecida, seleccionados con el criterio de serie parcial de duración anual.
VOL:	Volúmenes de las crecidas a partir que los caudales superaran un determinado valor
DUR:	Duración de cada crecida con caudales por encima del valor de referencia
r:	coeficiente de correlación
Qumbral:	caudal límite a partir del cual se determinan los volúmenes y duraciones de crecidas.
QMED:	caudal medio de crecida
CV:	coeficiente de variación
CS:	coeficiente de asimetría
CK:	coeficiente de kurtosis
L-CS:	relación de asimetría obtenida a partir de momentos-L
L-CK:	relación de kurtosis obtenida a partir de momentos-L
MoM:	método de momentos
MV:	método de máxima verosimilitud
MPP:	método de momentos ponderados por probabilidades
MxM:	método momentos mixtos

REFERENCIAS

- Bacchi, B., Brath, A., Kottegoda, N. (1992) *Analysis of the Relationships between flood peaks and flood volumes based on crossing properties of river flow processes*. Water Resources Research, vol. 28, n. 10, págs. 2773-2782.
- Cacik, P; Paoli, C.; Bolzicco, J. (1993) *Impacto de las últimas crecidas del río Paraná en la determinación de caudales de diseño*. En: I Simposio de Recursos Hídricos do Cone Sul. Gramado, Brasil, págs. 371 - 380.
- Cunnane, C. (1989) *Statistical Distributions for Flood Frequency Analysis*. World Meteorological Organization. Operational Hydrology Report No 33.
- FICH- Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas UNL. (1991) *Modelo de análisis de frecuencia de crecidas AFMULTI. Manual de usuario*. Proy. Análisis de Frec. de Crecidas. 17 págs.
- Hosking J. (1989) *The Theory of Probability Weighted Moments*. Research Report. IBM Research División. NY. USA.
- NERC. (1975) *Flood Studies Report. Hydrological Studies*. Natural Environment Research Council. Vol I.

- Paoli, C., Cacik, P., Bolzicco, J. (1992) *Aplicación de métodos robustos para la determinación de máximas crecidas del río Paraná*. En: Memorias del XV Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Cartagena.. Colombia, págs. 411 - 421.
- Paoli, C.; Cacik, P.; Bolzicco, J. (1994) *La incertidumbre en el análisis de frecuencia de picas de crecida*. XVI Congreso Nacional del Agua. La Plata. Argentina.
- Sir Halcrow & Partners Ltd. (1994) Estudio de regulación del valle aluvial de los ríos Paraná, Paraguay y Uruguay para el control de las inundaciones. Informe Final. Anexo B: Hidrología.
- Vogel, R., Wilson, I. (1996) *Probability Distribution of Annual Maximun, Mean and Minimum Streamflows in the United States*. Journal of Hydrologic Engineering. Vol 1, Nro.2, pags. 69-76.