

Predicción del caudal de avenidas

Por Carlos E. M. TUCCI*

Predicción de caudal

La predicción del caudal está relacionada con la evaluación del mismo en términos de plazo de anticipación. La predicción es la probabilidad de que se produzca el caudal, basada en los registros históricos del mismo. La predicción de caudal de un río es una de las medidas utilizadas en la gestión de recursos hídricos para hacer frente a la incertidumbre del clima. La gestión de los usos del agua, tales como la energía hidroeléctrica, el suministro de agua, el riego, la navegación, el control de las inundaciones y la conservación medioambiental dependen de la cantidad de agua que hay en los sistemas fluviales. Como el clima futuro es incierto, todos estos usos del agua se planifican basándose en los datos estadísticos de caudales históricos, que se suponen estacionarios. Sin embargo, se han detectado tendencias del clima en numerosas series de caudales de todo el mundo, y también se han notado los posibles efectos del cambio climático sobre los regímenes hidrológicos (IPCC, 2001).

La consecuencia principal de utilizar series no estacionarias en la ingeniería de recursos hídricos es que se produce una incertidumbre mayor en las inversiones. La predicción de flujo fluvial puede utilizarse para disminuir la incertidumbre y el riesgo en los usos y en la conservación de los recursos hídricos.

Las predicciones de estos caudales de ríos pueden realizarse a corto plazo en períodos de unas pocas horas o de unos pocos días de anticipación; y a largo plazo, hasta de nueve meses (Georgakakos y Krzysztofowicz, 2001). Generalmente, las predicciones a corto plazo se utilizan para la gestión de avenidas, pero hay muchos contextos en los que son útiles las predicciones a corto plazo, tales como la navegación en ríos de caudal no regular en los que la carga transportada depende de la profundidad del flujo, el riego y el suministro de agua y los usos integrados del mismo, tales como el control de inundaciones y la energía hidroeléctrica.

La predicción de caudales a largo plazo se ha utilizado para describir los métodos de predicción en sis-

temas estacionales (Villanueva y otros, 1987; Druce, 2001). Con el uso de modelos climáticos (Tucci y otros, 2002) o con las relaciones empíricas y probabilísticas entre las variables climatológicas y el caudal (Anderson y otros, 2001), dicha predicción ha mejorado. La predicción a largo plazo puede disminuir la incertidumbre de la evaluación económica de algunos artículos de consumo relacionados con los recursos hídricos, tales como: la planificación de precios de energía en sistemas en los que la energía hidroeléctrica constituye una parte importante de la producción; la producción agrícola para zonas de secano; y la gestión de conflictos por causa del agua.

Este artículo presenta una visión de conjunto de las predicciones a corto y largo plazo y de la gestión de la energía hidroeléctrica, utilizando algunos casos de estudio.

Predicción a corto plazo

La predicción a corto plazo (llamada también predicción en tiempo real) puede realizarse de forma continua o solo después de un aviso. Lo primero se hace generalmente cuando se necesita para fines operativos, tales como la energía hidroeléctrica y la navegación. En sistemas hidroeléctricos, la planificación se basa generalmente en los datos estadísticos de caudales y se ajusta mensual, semanal o diariamente.

La predicción de caudal se hace generalmente durante la época de avenidas después de que se alcance en la cuenca un estado de aviso, tal como un nivel fluvial específico, una precipitación o una condición climática. Puede clasificarse según el tiempo de anticipación requerido o el tiempo de respuesta de la cuenca a la precipitación. Estas avenidas pueden ser repentinas y de cuenca media y grande.

Las avenidas repentinas son principalmente una combinación de un episodio meteorológico, generalmente una tormenta convectiva, con una situación hidrológica particular tal como una cuenca pequeña, una pendiente empinada y baja capacidad de infiltración. La predicción depende mucho de la predicción cuantitativa de la precipitación (PCP), ya que el tiempo que pasa entre la precipitación y el flujo máximo es muy pequeño para avisar y tomar medidas durante la avenida (Krzysztofowicz, 1995). Georgakakos y

Este artículo es el resumen de una conferencia ofrecida por el autor en la 54.ª reunión del Consejo Ejecutivo de la OMM (junio de 2002)

* Instituto de Investigación Hidráulica, Universidad Federal de Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil
Correo electrónico: Carlos.Tucci@ufrgs.br

PREDICCIÓN DE CAUDAL PARA EL RÍO PARANÁ EN CORRIENTES

Hay dos tramos aguas arriba de Corrientes: en Paraguay el caudalímetro corriente arriba está en Pilcomaño (cerca de Asunción); en el río Paraná, el caudalímetro corriente arriba está en El Dorado (corriente abajo de la presa de Itaipú). El Paraguay se une con el río Paraná aguas arriba de Corrientes. El área de cuenca en Corrientes es de unos 2 millones de km². El modelo se ajustó a dos meses de registros desde 1982 y se simularon predicciones para seis meses del período de avenida de 1983 (el más largo del siglo). La Tabla I muestra los datos estadísticos de la predicción. Se utilizaron tres estadísticos en la evaluación (Tabla I). R_D es un estadístico más realista, ya que compara el resultado del modelo con la alternativa de utilizar el mismo valor de tiempo registrado t en la predicción.

Tabla I
Estadísticos de la predicción de niveles para distintos plazos de anticipación: Río Paraná en Corrientes, utilizando un modelo de cálculo de la propagación

Anticipación	R^2	R_D	Error estándar m
1	0,99	-0,187	0,056
2	0,97	0,135	0,086
3	0,95	0,284	0,112
4	0,94	0,461	0,124
5	0,94	0,638	0,122
6	0,92	0,620	0,145
7	0,81	0,328	0,216
8	0,57	-0,240	0,326

$$R^2 = 1 - \frac{(Q_{o_{t+1}} - Q_{c_{t+1}})^2}{(Q_{o_{t+1}} - Q_m)^2}; R_D = \frac{(Q_{o_{t+1}} - Q_{c_{t+1}})^2}{(Q_{o_{t+1}} - Q_{o_1})^2}$$

El modelo de ecuación (1) es un modelo agrupado de cálculo de la propagación. Para algunos tramos, en los que la velocidad es alta, este tipo de modelo puede dar resultados pobres. Tucci (1998) presentó una versión no lineal de un modelo conceptual distribuido para este tipo de condiciones y lo comparó con una versión lineal en un tramo fluvial del río Jacuí, en el sur de Brasil, donde el caudal intermedio es despreciable, la longitud es de 36 km, la pendiente de 1 m km⁻¹ y la cuenca de unos 14 000 km². Los resultados se comparan en la Tabla II.

Tabla II
Comparación entre la predicción de modelos distribuidos y concentrados para el río Jacuí (Tucci, 1998)

Modelos	Episodios											
	Ajuste			2			3			4		
	R^2	R_D	EE	R^2	R_D	EE	R^2	R_D	EE	R^2	R_D	EE
Concentrado lineal	0,75	0,84	40,6	-0,1	0,70	32,1	0,68	0,88	46,3	0,75	0,64	49,4
Distribuido no lineal	0,91	0,94	23,5	0,93	0,97	11,1	0,92	0,96	25,8	0,92	0,89	27,4

EE = Error estándar en m³ s⁻¹.

Hudlow (1984) mencionaron que el 25 por ciento de las comunidades de los EE.UU. tiene un intervalo inferior a cuatro horas entre la precipitación y el caudal de la cuenca.

Las avenidas repentinas afectan sobre todo a cuencas rurales pero, en ciudades grandes (p. ej., São Paulo, Buenos Aires, Barcelona) con zonas impermeables muy grandes, el tiempo de concentración de la cuenca decrece y aumenta el pico de caudal. La gestión del sistema urbano de conductos de drenaje y el control del tráfico durante los días de fuertes precipitaciones en la estación de lluvias requieren un sistema de aviso que se base en una evaluación y en una predicción rápidas. En Brasil, la ciudad de São Paulo utiliza el radar y una relación empírica entre la frecuencia del mismo y las condiciones de avenida del principal canal de desagüe de la ciudad para alertar y organizar el tráfico urbano.

La principal característica de este tipo de predicción de avenida es la necesidad de que se evalúe la precipitación para intervalos de tiempo presentes y futuros y de la PCP.

La predicción de avenidas para una cuenca media puede lograrse mediante una combinación de la observación del nivel del agua corriente arriba y de la evaluación de la precipitación en la parte intermedia de la cuenca, junto con el nivel corriente arriba o descarga. En un modelo de predicción de avenida hay dos módulos principales: la simulación de precipitación-escorrentía de subcuenca y el cálculo de propagación de la avenida.

Predicción cuantitativa de la precipitación (PCP)

La precipitación utilizada en combinación con el modelo hidrológico en la predicción de caudales es la precipitación registrada hasta el paso de tiempo t . Esta precipitación se registra con pluviómetros y hay que predecir la precipitación para el intervalo de tiempo transcurrido entre t y $t + \tau$ (plazo de anticipación). En términos de la anticipación de la predicción, se considera predicción inmediata de 0 a 3 horas; a corto plazo de 6 a 24 horas; y a largo plazo de 3 a 24 meses de anticipación (Collier y Krzysztofowicz, 2000).

Se ha desarrollado la predicción cuantitativa de la precipitación basada en herramientas estadísticas, medidas de radar, imágenes de satélite y modelización meteorológica.

Durante muchos años, se suponía que la predicción de la precipitación era cero en predicción de caudales hidrológicos. Para cuencas con un tiempo de concentración grande esto no introduce mucho error para un tiempo de anticipación pequeño, pero para avenidas repentinas y tiempos de anticipación mayo-

res, es un requisito importante tener una estimación de la precipitación.

Se utilizaron modelos estocásticos para predecir la precipitación junto con modelos hidrológicos (Bertoni y otros, 1992; Mine, 1998) pero no mejoraron gran cosa las predicciones, ya que la precipitación no muestra generalmente una correlación importante en las series temporales.

Generalmente, el radar y la precipitación telemétrica permiten evaluar las condiciones meteorológicas y la distribución espacial y la dirección de la tormenta. El uso de modelos meteorológicos de mesoescala para predecir la precipitación en una rejilla comparable a un modelo hidrológico distribuido es una de las herramientas combinadas que pueden mejorar los cálculos (Ibbitt y otros, 2000).

Modelos hidrológicos

Los modelos utilizados en la predicción son empíricos, conceptuales o una combinación de ambos. Los modelos empíricos utilizan ecuaciones matemáticas que no tienen relación con la física del sistema. Los modelos conceptuales utilizan los conceptos hidrológicos para simular el comportamiento de la cuenca.

Los modelos conceptuales, generalmente, tienen dos componentes principales; un módulo de precipitación-escorrentía, que transforma la precipitación en escorrentía mediante el balance de agua en los componentes hidrológicos, tales como la interceptación, la zona superior del suelo, el agua subterránea y el flujo sobre el suelo; y un módulo de cálculo de propagación que simula el caudal en ríos y embalses.

Los modelos de precipitación-escorrentía pueden ser agrupados o distribuidos. Los modelos agrupados no suelen tomar en cuenta la variabilidad espacial de la precipitación, las variables de estado ni los parámetros del modelo. Para cuencas pequeñas este tipo de modelo es muy útil, ya que tiene una estructura sencilla y pueden actualizarse fácilmente los parámetros o las variables de estado. Los modelos distribuidos pueden serlo por subcuencas o por rejilla (Figura 1). La ventaja de los modelos distribuidos es que tienen en cuenta la variación espacial de las características físi-

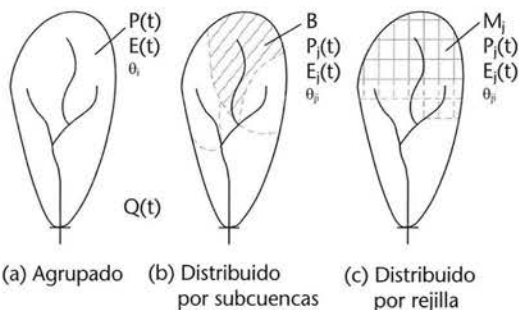


Figura 1 — Modelos por discretización

PREDICCIÓN DE FLUJO PARA EL EMBALSE DE ERNESTINA EN EL RÍO JACUÍ

(Brun y Tucci, 2001)

La cuenca del embalse de Ernestina (energía hidráulica) tiene una superficie de 1 046 km², un volumen de 258,6 10⁶ m³ y una superficie de inundación de 40 km². La simulación se hizo con un paso de tiempo de 6 horas. El flujo de entrada se calculó en dos pasos: ajuste de los parámetros del modelo de precipitación-escorrentía (IPH II) fuera de operación; y predicción con humedad del suelo actualizada y variable de estado del flujo sobre suelo.

Se hizo una predicción para los semestres húmedos con plazos de anticipación de 6, 12, 18, 24 y 30 horas (pasos de tiempo del 1 al 5). Se estudiaron tres escenarios: sin precipitación actualizada ni futura (P=0); con actualización; y con precipitación futura conocida.

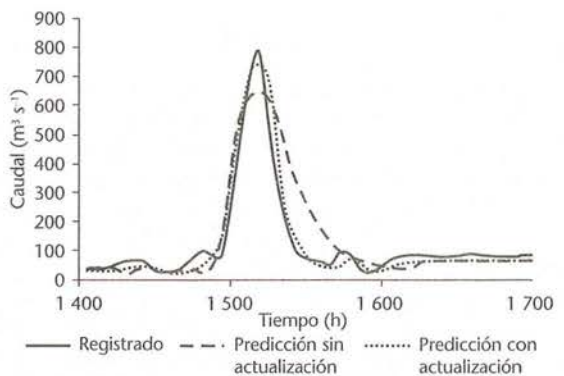


Figura 2 — Predicción con un plazo de anticipación de 12 horas (Brun y Tucci, 2001)

52

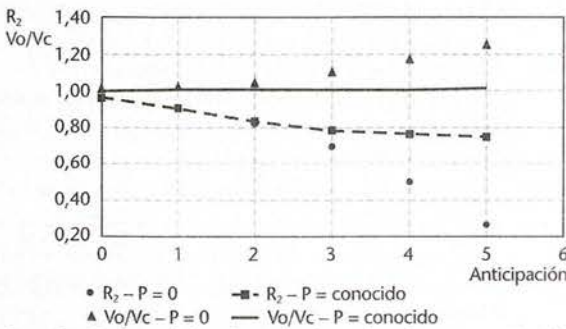


Figura 3 — Estadísticas de la predicción para algunos plazos de anticipación (1 = 6 h) en 1983, con actualización (Brun y Tucci, 2001)

cas de la cuenca y las condiciones de la precipitación. Es mucho más difícil actualizar los parámetros o las variables de estado en este tipo de modelo.

La simulación de predicción de avenidas tiene dos etapas: el ajuste y la verificación de los parámetros del modelo; y la predicción, que puede hacerse con actualización de parámetros o variables de estado.

Modelos de cálculo de propagación

En ríos grandes en los que la velocidad de flujo es lenta y el volumen intermedio es pequeño comparado con el volumen principal del río, un modelo de cálculo de propagación da generalmente errores pequeños en la predicción de la avenida. Tucci y otros (1987) compararon distintos modelos empíricos y concluyeron que el modelo de diferencias de caudal presentaba los mejores resultados utilizando parámetros actualizados. El tipo de ecuación es el siguiente:

$$\Delta Q_{t+\tau} = Q_{t+\tau} - Q_t; \Delta I_t^i = I_t^i - I_{t-\tau}^i; \Delta Q_t = Q_t - Q_{t-\tau} \quad (1)$$

El ajuste de la hidrógrafa se hizo con unos pocos años de datos hidrológicos. La Figura 2 muestra la simulación para el período de anticipación de 12 horas. Estos resultados muestran la mejora de la predicción con el procedimiento de actualización. La Figura 3 muestra los estadísticos de R² y el balance de volumen para distintos plazos de anticipación y distintos escenarios de precipitación prevista. Muestra que, sin conocer la precipitación, la solución empeoraba con el tiempo.

donde:

$\Delta Q_{t+\tau} = a_1 \Delta I_t^1 + a_2 \Delta I_t^2 + k + a_n \Delta I_t^n + b \Delta Q_t$; a_1, a_2, k, a_n y b son parámetros ajustados de acuerdo con los datos registrados mediante el método de mínimos cuadrados; Q es la descarga (o nivel) en el indicador de predicción y los I son los valores en los indicadores corriente arriba utilizados en la predicción. Durante la predicción, se actualizan los parámetros.

Modelos de precipitación-escorrentía

Las predicciones basadas en modelos de precipitación-escorrentía dependen mucho de la evaluación y de la predicción de la distribución de precipitación en el espacio y el tiempo. El tiempo de anticipación está relacionado con el tiempo de concentración de la cuenca si no hay predicción de la precipitación. Cuando se usa el modelo para predicción de avenida, la actualización de los parámetros o variables de estado es un procedimiento utilizado para corregir el modelo de

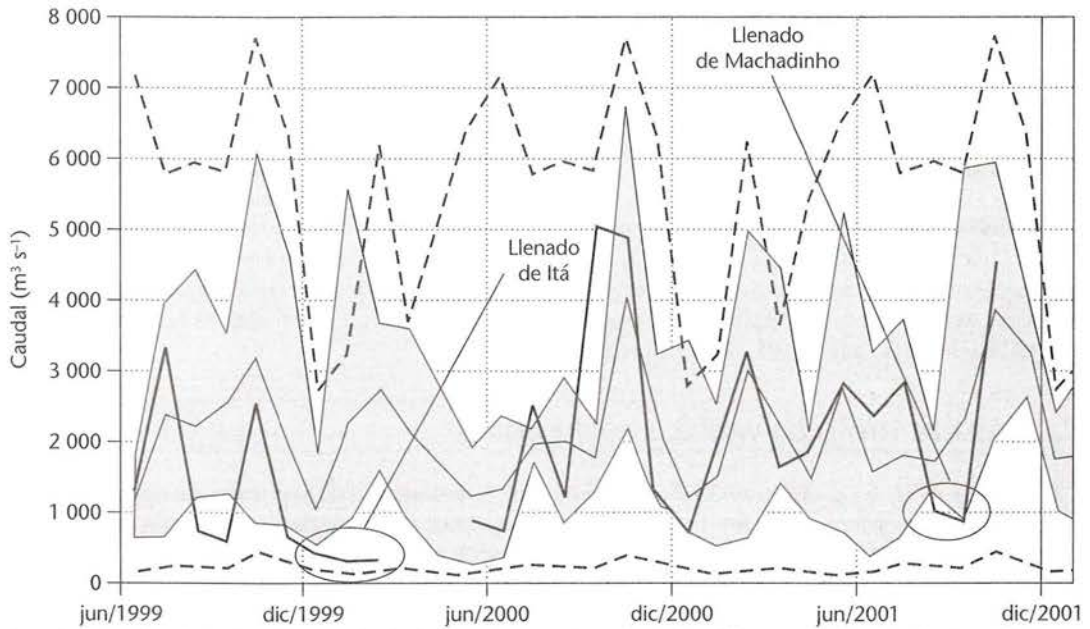


Figura 4 — Rango de predicción de caudales mensuales (banda oscurificada) comparado con el rango de caudales mensuales observados (el máximo y el mínimo se muestran como líneas quebradas). La línea gruesa en negrita muestra el caudal observado (Tucci y otros, 2002)

las incertidumbres relacionadas con la información y la capacidad del modelo. Hay tres procedimientos principales: la actualización de variables de estado; la optimización de parámetros durante la actualización en tiempo real (Tucci y Clarke, 1980; Bertoni y otros, 1992); y la optimización de una función objetiva explícita que requiere simplificar algo el modelo.

El modelo de precipitación-escorrentía IPH II (Tucci y Clarke (1980)) y sus otras versiones con rutinas de cálculo de la propagación (Muskingum-Cunge o Hidrodinámico)) se ha utilizado en aplicaciones hidrológicas presentadas más adelante. Se puede encontrar la descripción del modelo en Tucci, 1998.

Predicción a largo plazo

La predicción del caudal a largo plazo puede hacerse mediante herramientas estadísticas sobre el comportamiento hidrológico estacional o por correlación entre variables tales como la temperatura del océano y la precipitación o el caudal. En una cuenca donde estén bien explicadas las condiciones estacionales, se puede predecir el flujo después del período de lluvias por la curva de decrecida de la hidrógrafa en los meses secos (Villanueva y otros, 1987). En sistemas de gran memoria, en los que el almacenamiento es grande y la velocidad de flujo pequeña, se puede hacer predicción con unos pocos meses de anticipación. Sin embargo, en una cuenca con poca memoria (almacenamiento de agua subterránea), la capacidad de la predicción del caudal a largo plazo depende de la predicción de variables climatológicas o de otras varia-

bles que tengan correlación con el clima, tales como el índice ENOA y otros.

La predicción de caudales a largo plazo puede hacerse mediante lo siguiente:

- La predicción de estadísticos locales estacionales (se predicen los mismos valores todos los años si no se usa el término aleatorio).
- Modelos estocásticos que tienen en cuenta la correlación temporal y estacional.
- Modelos empíricos que relacionan variables oceánicas o climatológicas con el caudal y con cierto plazo de anticipación.
- Modelos climatológicos e hidrológicos deterministas (estos dependen mucho de la capacidad del modelo climatológico para predecir la precipitación).

Tucci y otros (2002) utilizaron dos de los modelos anteriores para predecir el caudal mensual en la cuenca del río Uruguay con 3-6 meses de anticipación. Esta cuenca tiene poca memoria porque su profundidad de suelo y el almacenamiento de agua subterránea son pequeños. No hay comportamiento estacional y el caudal medio no muestra gran variación a lo largo de los años, pero la desviación estándar entre los años es grande. Los modelos que se usaron fueron: un modelo estocástico basado en los aportes de caudal y de precipitación; una predicción determinista desarrollada con un GCM (Modelo Climatológico Global) del CPTEC (Centro Climatológico de Brasil), que predice la precipitación; y un modelo hidrológico

distribuido (10×10 km) para cuencas grandes (Collischonn y Tucci, 2001) que utiliza la precipitación y pronostica el caudal. Se ajustó el modelo hidrológico por medio de cinco caudalímetros mediante una optimización objetiva múltiple. Se verificó para otros doce caudalímetros a lo largo de un período de 10 años.

El modelo del CPTEC presentaba un sesgo en la predicción de la precipitación y se corrigió mediante una distribución estadística para cada punto de rejilla del modelo y cada mes. Esto se hizo durante un período de cuatro años (1995-1998) y se verificó

para un período de dos años (2000-2001), tiempo durante el cual se llenaron los Embalses de Itá y Machadinho.

Las predicciones de los modelos deterministas se basaron en cinco conjuntos (de los 25 del modelo climatológico). El error estándar de la predicción mensual del caudal en el modelo estocástico es de $1\,839\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$. El modelo climatológico-hidrológico redujo el error estándar a $1\,245\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$. El error estándar de la predicción cuando se conoce la precipitación es de $558\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$. La Figura 4 presenta los resultados de la simulación.

AVENIDA DE UNIÃO DA VITÓRIA Y PORTO UNIÃO

En 1983 y 1992, las ciudades de União da Vitória y de Porto União (UVPU), a orillas del río Iguazú, en Brasil, sufrieron violentas avenidas, después de un período largo (50 años) de avenidas entre normales y bajas. Las pérdidas económicas en las industrias, los negocios y los hogares dieron lugar a una depresión económica y tuvieron efectos psicológicos sobre la mayor parte de la población, que creía que la culpa de las inundaciones la tenía el Embalse de Foz do Areia, construido en la década de 1980 unos 100 km corriente abajo. (La curva de remanso para la avenida de proyecto del embalse puede alcanzar las ciudades, dependiendo de su nivel hídrico operativo). Surgió un conflicto importante entre la población y la compañía eléctrica, el cual duró más de 10 años.

La predicción de avenidas es una medida importante pero debe tener en cuenta el funcionamiento del embalse. Se han recomendado tres estados de predicción:

- Estado de vigilancia: a partir de ese nivel, se debe seguir cuidadosamente el comportamiento del río; con este estado empieza la predicción en tiempo real.
- Estado de alerta: cuando se espera alcanzar el nivel de 744,0 m en 12 horas.
- Estado de emergencia: cuando se espera alcanzar el nivel de 745,5 m en 12 horas.

Mine (1998) desarrolló un modelo para predecir el flujo y operar el embalse teniendo en cuenta las restricciones corriente arriba y corriente abajo. La predicción de caudal para União da Vitória ($25\,000\text{ km}^2$) se realizó con un modelo empírico; el caudal a partir de la cuenca entre União da Vitória y Foz do Areia ($5\,000\text{ km}^2$) se simuló con un modelo de precipitación y escorrentía IPH II (Tucci y Clarke, 1980) y el caudal en el tramo del río se simuló con un modelo hidrodinámico (Tucci, 1978). Para la predicción de la avenida en tiempo real, había las siguientes opciones: precipitación cero para el plazo de anticipación; predicción de la precipitación con un modelo empírico; y precipitación conocida.

El modelo operativo se basa en las restricciones de la avenida corriente arriba y corriente abajo y en la predicción de caudal. Las predicciones se hicieron con una anticipación de 24 horas, actualizadas cada cuatro horas. La Figura 5 muestra los resultados para la avenida de 1983. Puede verse que la operación real utilizada durante este episodio estaba por encima del límite para unas pocas horas, ya que la cantidad de agua de los tributarios y la operación disminuyeron el nivel muy rápidamente. Utilizando el sistema operativo con precipitación bien conocida, la operación es más eficaz porque permanece por debajo de la restricción y aumenta el nivel del embalse después del riesgo, mejorando la producción de energía.

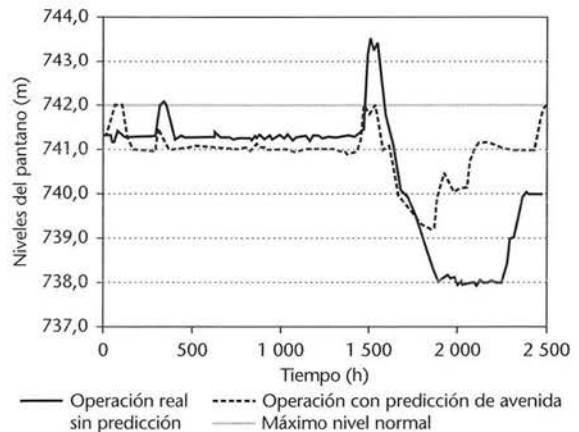


Figura 5 — Niveles en Foz do Areia: operación real y con predicción de avenida y modelo de gestión de la operación (Mine, 1998)

El modelo operativo se basa en las restricciones de la avenida corriente arriba y corriente abajo y en la predicción de caudal. Las predicciones se hicieron con una anticipación de 24 horas, actualizadas cada cuatro horas. La Figura 5 muestra los resultados para la avenida de 1983. Puede verse que la operación real utilizada durante este episodio estaba por encima del límite para unas pocas horas, ya que la cantidad de agua de los tributarios y la operación disminuyeron el nivel muy rápidamente. Utilizando el sistema operativo con precipitación bien conocida, la operación es más eficaz porque permanece por debajo de la restricción y aumenta el nivel del embalse después del riesgo, mejorando la producción de energía.

Predicción de avenidas y embalses de energía hidroeléctrica

La predicción de avenidas y el funcionamiento de los pantanos tiene tres módulos principales: la predicción de la precipitación; la predicción de caudal a partir de la precipitación; y la optimización del funcionamiento del pantano. Las predicciones de precipitación se han desarrollado en meteorología y son importantes para dar más plazo de anticipación al funcionamiento de los pantanos. La predicción de caudales se desarrolla en la modelización hidrológica. El funcionamiento de los pantanos debe tener en cuenta las restricciones corriente arriba y corriente abajo que surgen de los potenciales impactos de la avenida, del balance de agua en el embalse y de la capacidad del aliviadero y de las turbinas. El objetivo de la optimización es minimizar el volumen de espera y no romper las restricciones del pantano.

Silveira (1996) utilizó un modelo de predicción de cálculo de propagación del caudal (ecuación 1) junto con un procedimiento de optimización para calcular el volumen de espera para Sobradinho en el río São Francisco de Brasil. Mine (1998) utilizó una combinación de predicción de la precipitación, de cálculo de propagación y un modelo de precipitación-escorrentía, junto con el método de optimización de Silveira para predecir y manejar el Pantano de Foz de Areia, en el río Iguaçu.

Conclusión

Este artículo presenta algunas experiencias de las componentes hidrológicas de la predicción de avenidas y la gestión de recursos hídricos. La predicción de caudales es cada vez más importante económicamente en una sociedad en la que esta información puede utilizarse para reducir los daños de las avenidas, disminuir los costes de la navegación, predecir la producción agrícola y, en particular, para determinar los precios de la energía. La predicción de caudales es una mercancía importante para los encargados de la toma de decisiones en los desarrollos de los recursos hídricos.

Los principales beneficios de las predicciones son que:

- Disminuyen la incertidumbre de las series de registros hidrológicos en la gestión de recursos hídricos.
- Mejoran la capacidad operativa de los pantanos, lo que incrementa los beneficios económicos y la seguridad.
- Disminuyen los daños por avenidas como una de las principales medidas no estructurales para el control de las avenidas.

- Permiten una planificación y una gestión estacionales del uso del agua y de su conservación basadas en la predicción a largo plazo.

El desarrollo de la ciencia para uso práctico en este campo requiere que entre los distintos científicos y profesionales se integre una gran cantidad de conocimiento. El gran potencial de algunas herramientas se usa sólo para integrar la solución a un problema. Por ejemplo, el mercado energético de Brasil depende mucho de la energía hidroeléctrica pero está algo diversificado con las plantas térmicas, entre otras, aunque éstas son generalmente más caras. Esta situación requiere modelos que integren el clima, la optimización de sistemas hidrológicos para la energía y los modelos de formación de precios. Requiere distintos tipos de profesionales que tengan diferentes formaciones y especializaciones. El desafío es que todos estos científicos y profesionales que trabajan juntos necesitan coordinación y conocimiento técnico y científico de los muchos desarrollos científicos de cada campo específico. La predicción de caudales o de avenidas es un aporte al desarrollo y a la conservación de los recursos hídricos.

55

Referencias

- ANDERSON, M.L., M.L. KARVAS y M.D. MIERZWA, 2001: Probabilistic/ensemble forecasting: a case study using hydrologic response distribution associated with El Niño/Southern Oscillation (ENSO). *Journal of Hydrology*, V249, 134-146.
- BERTONI, J.C., C.E.M. TUCCI y R.T. CLARKE, 1992: Rainfall-based real-time flood forecasting. *Journal of Hydrology*, 131 (1992), 313-339.
- BRUN, G.W. y C.E.M. TUCCI, 2001: Previsão em Tempo Real do Volume Afluente ao reservatório de Ernestina. RBRH. V6 n.2 Abr/Jun., 73-80.
- COLLIER, C.G. y R. KRZYSZTOFOWICZ, 2000: Quantitative precipitation forecasting. *Journal of Hydrology*, 239 (2000) 1-2.
- COLLISCHONN, W. y C.E.M. TUCCI, 2001: Hydrologic simulation of large basins (en portugués). *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. Vol. 6. N.º 1.
- DRUCE, D.J., 2001: Insights from a history of seasonal inflow forecasting with a conceptual hydrologic model. *Journal of Hydrology*. Volumen 249, 102-112.
- DUNNE, T., 1986: Urban Hydrology in the Tropics: problems solutions, data collection and analysis. En: *Urban Climatology and its application with special regards to tropical areas*. Actas de la Conferencia Técnica de México, noviembre de 1984, Programa Mundial del Clima, OMM.
- GEORGAKAKOS, P.K. y M.D. HUDLOW, 1984: Quantitative precipitation forecast techniques for use in hydrological forecasting. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 65, 1186-1200.
- IBITT, R.P., R.D. HENDERSON, J. COPELAND y D.S. WRATT, 2000: Simulating mountain runoff with mesoscale weather model rainfall estimates: a New Zealand experience. *Journal of Hydrology*, 239 (2000) 19-32.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2001: *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. A Report of the IPCC Working Group II.

- KRZYSZTOFOWICZ, R.; 1995. Recent advances associated with flood forecast and warning systems. *Ver. Geophys.* Vol. 33, Supl.
- JICA, 1995. The master study on utilization of water resources in Parana State in the Federative Republic of Brazil. Informe Sectorial Volumen H—*Flood Control*.
- MINE, M., 1998: Método determinístico para minimizar o conflito entre gerar energia e controlar cheias. Tesis doctoral. Instituto de Investigaciones Hidráulicas. UFRGS.
- SILVEIRA, C.A.C., 1996: Previsão de Volumes de Espera em Tempo Real. Disertación para un título de máster. Instituto de Investigaciones Hidráulicas. UFRGS.
- TUCCI, C.E.M., 1998: Modelos Hidrológicos. Editora de la UFRGS. ABRH. 652 pp.
- TUCCI, C.E.M. y R.T. CLARKE, 1980: Adaptive forecasting with a conceptual rainfall-runoff model. *Hydrological Forecasting*. Actas del Simposio de Oxford, AICH N.º 129, 425-454.
- TUCCI, C.E.M., W. COLLISCHONN, P.S. DIAS y R.T. CLARKE, 2002: Previsão de médio prazo de vazões afluentes a reservatórios no rio Uruguai. IPH/IAG/ANEEL, 150 pp.
- VILLANUEVA, A.O.N., 1997: Dynamic floodplains simulations: compound channels and wetlands. Tesis doctoral IPH-FRGS (en portugués).
- VILLANUEVA, A.O.N., E.D. ZAMANILLO y C.E.M. TUCCI, 1987: Previsão de vazão para irrigação. Anales del VII Simposio Brasileño sobre Recursos Hídricos, Vol. 1, 536-549.

Cambio climático en la India evidenciado a partir de registros instrumentales

56

por K.C. SINHA RAY* y U.S. DE**

Introducción

El cambio climático y el calentamiento mundial son asuntos importantes para el próximo milenio. El aumento de los gases de efecto invernadero (GEI), incluido el ozono, representa una gran preocupación para la humanidad. Los fenómenos extremos afectan no sólo a la salud humana, sino también a los recursos hídricos y a la producción agrícola. El aumento de población ha vuelto los efectos del cambio climático más desastrosos. El Tercer Informe de Evaluación del IPCC ha puesto de manifiesto que la mayor parte del calentamiento mundial observado durante los últimos cincuenta años puede atribuirse a actividades humanas.

En los últimos años, los fenómenos climáticos adversos han trastornado frecuentemente las sociedades y economías humanas. En 1999 y 2000, las regiones de Saurashtra y Kutch y Gujarat de la India sufrieron graves sequías y escasez de agua. En 2000, Afganistán, Bulgaria, Irak, la República Islámica del Irán y partes de China se vieron afectadas por graves sequías. Algunas zonas del noroeste de la India experimentaron un segundo año consecutivo de precipitaciones monzónicas deficientes. Muchas regiones del mundo, tales como

Mozambique y China, sufrieron también fuertes inundaciones en los últimos años.

Es un asunto importante el impacto del cambio climático sobre la agricultura, el agua y otros recursos naturales. La población mundial ha alcanzado ya los seismil millones, y la previsión de población para mediados del próximo siglo se eleva a once mil millones. La población actual de la India es de mil millones. El aumento de la población frente al cambio climático es quizás el área crucial de nuestras preocupaciones para el próximo milenio, ya que afecta seriamente al desarrollo sostenible.

El aumento de las concentraciones de los denominados gases de efecto invernadero "bien mezclados" (CO_2 , CH_4 , N_2O y halocarbonos) desde los tiempos preindustriales ha originado un forzamiento radiativo positivo que es equivalente al calentamiento del sistema troposférico superficial.

Los efectos del cambio climático como resultado del aumento de los gases de efecto invernadero se han estudiado ya extensamente y no se discuten más aquí. El efecto más importante es el aumento de la temperatura en superficie. Calentamiento máximo en las altas latitudes boreales a finales de otoño e invierno asociado a una reducida área de hielo marino y de cubierta de nieve y pequeña variación estacional en el calentamiento a bajas latitudes.

Este artículo resume la información existente sobre cambio climático y tendencias en la aparición de

* Miembro de la Facultad, Departamento de Física Atmosférica y Ciencia Espacial, Universidad de Pune.

** Director General Adjunto de Meteorología (Investigación), Departamento Meteorológico de la India.