

# ALGUNAS REFLEXIONES SOBRE CRECIDAS E INUNDACIONES

Raúl A. Lopardo y Rafael Seoane.\*

## Resumen:

El presente trabajo pretende brindar un panorama global sobre distintos temas asociados con la ocurrencia de desastres debidos a crecidas e inundaciones y analizar las implicancias desde los puntos de vista hidrológicos, hidráulicos, de ingeniería y de planificación, que deben ser considerados de forma integrada y transdisciplinaria a efectos de reducir las pérdidas en vidas humanas y los crecientes efectos negativos económicos. Se discute la importancia relativa de las consecuencias de desastres por crecidas en sociedades de diferentes niveles de desarrollo, comparándose además brevemente sus efectos con otros fenómenos naturales de escala relevante. Se hace especial mención al sistema de alerta de la cuenca del Plata, de 3.150.000 km<sup>2</sup>, en territorios de Bolivia, Paraguay, Brasil, Uruguay y Argentina, afectada por las crecidas de los ríos Paraná, Paraguay, Uruguay, Iguazú, Pilcomayo y Bermejo. En tal sentido, se comentan las crecidas del río Paraná y la evolución del sistema de alerta, describiendo los modelos utilizados para la predicción de caudales. Se concluye con una opinión técnica acerca de los temas de investigación y desarrollo que deberían ser considerados prioritariamente por parte de los investigadores, en virtud de su particular importancia para el control de crecidas.

**Palabras clave:** crecidas, inundaciones, planificación, América Latina, riesgo, sistema de alerta temprana, cuenca del Plata, zonificación.

## Introducción

Se atribuye al estadista inglés Winston Churchill la célebre frase "los pueblos se acuerdan del agua sólo cuando les falta". Ello es parcialmente cierto, pues dependiendo de épocas y regiones es posible constatar la validez del concepto inverso, es decir que "las autoridades se acuerdan del agua cuando los pueblos ya se inundaron".

Es particularmente importante señalar que cuando la inundación ya se ha producido, cuando nada es evitable, en el momento más crítico y doloroso del evento, la población casi exclusivamente requiere soluciones de carácter asistencialista. En esos momentos la ingeniería ayuda relativamente poco y la planificación o la realización de obras específicas normalmente llega tarde.

Es evidente que la planificación, a través del desarrollo de un plan maestro a nivel de cuenca para defensa de inundaciones, que vincule y asocie estructuras y obras de protección con solucio-

nes no estructurales para el control y mitigación de emergencias, es una tarea tan importante como imposterizable en gran parte de América Latina. Esa tarea debe desarrollarse en tiempos de calma, en momentos en los que aunque los pueblos "se olviden del agua" por ausencia de crecidas depredadoras, las autoridades tengan presente las necesidades básicas y aseguren los criterios de previsión indispensables, como política de estado.

Los desastres debidos a crecidas alcanzan aproximadamente a un tercio de entre todas las catástrofes naturales alrededor del mundo, al menos en cuanto a valores de pérdidas económicas y son responsables de más de la mitad del número de víctimas fatales. Los daños por crecidas han sido extremadamente severos en recientes décadas y es evidente que tanto la intensidad como la frecuencia de las inundaciones es creciente. En los diez últimos años, las pérdidas suman más de 250 billones de dólares.

\* Instituto Nacional del Agua y del Ambiente. República Argentina

Algunas sociedades, comunidades o regiones han aprendido a convivir con las crecidas, y en consecuencia se encuentran preparadas para hacerles frente. Otras a veces son tomadas por sorpresa cuando las aguas fluviales o marítimas ascienden a niveles jamás registrados durante el tiempo de vida de sus habitantes. En este contexto, tres aspectos resultan de particular importancia: a) el continuo crecimiento de la población mundial y de algunas regiones en particular, que hacen necesario asentarse en zonas peligrosas; b) la migración de trabajadores y refugiados a ambientes que no les son familiares; c) el crecimiento de la movilidad y el deseo de la población de vivir en áreas que presentan un ambiente de bellezas naturales y agradable clima. Pero aunque las poblaciones tengan experiencia sobre situaciones de desastre, bien es cierto que ellas tienden a olvidar las lecciones del pasado en períodos sensiblemente cortos, simplemente de pocos años.

Las crecidas han sido responsables de numerosas víctimas fatales. Un listado de víctimas por eventos naturales durante los últimos treinta años contiene sólo dos grandes desastres por crecidas, ambas producidas en Bangladesh (1970 y 1991) que están ubicadas en primero y tercer lugar en la negra lista de muertes. Como la mayor parte de los eventos hidrológicos excepcionales tienen desarrollo lento y se han implementado técnicas de pronóstico y alerta temprana en muchas áreas densamente pobladas, el número de víctimas fatales tiende a disminuir con el tiempo.

Para el caso de las pérdidas económicas, la situación se presenta aún agravada, pues no sólo los grandes desastres han aumentado su número, sino que también cuentan las pérdidas anuales producidas por eventos menores, que producen inundaciones localizadas. Un análisis de tendencia revela que los desastres debidos a crecidas y las pérdidas generadas por ellas se han incrementado drásticamente en los años recientes. Adicionalmente, deben computarse los costos de las medidas estructurales contra inundaciones y su mantenimiento.

El análisis precedente (Berz, 1999) es posible de ilustrar mediante la figura N° 1, que permite observar de modo comparativo la relevancia de

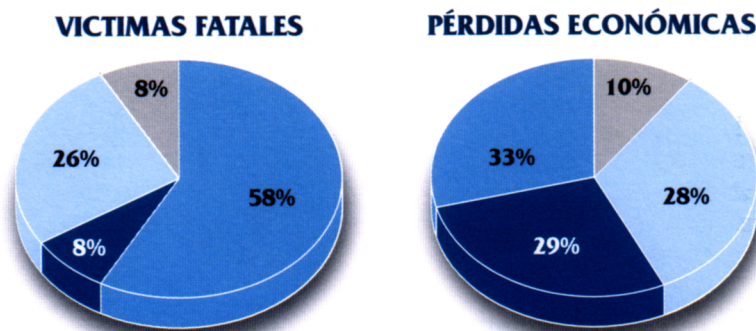


Figura N° 1: Víctimas fatales y pérdidas económicas por desastres naturales.

los desastres por inundaciones en relación con otros fenómenos naturales, como los terremotos y los huracanes.

### Evaluación de las crecidas

Una crecida es cualquier caudal relativamente alto que sobrepasa la margen natural o artificial en cualquier tramo de una corriente de agua. Cuando las márgenes son sobrepasadas, el agua se extiende sobre la planicie de inundación y, generalmente, entra en conflicto con el hombre (Ven Te Chow, 1964). Las crecidas tienen dos características esenciales: la inundación es transitoria y la zona inundada es adyacente al cuerpo de agua que la inunda. Para caracterizar una crecida es necesario conocer en una dada sección del río los siguientes parámetros: caudal máximo instantáneo, volumen total escurrido y duración de la crecida. El primero y el tercero dan una idea rápida de la magnitud de la misma. Las relaciones entre estos parámetros y su probabilidad de ocurrencia son necesarias para estimar la severidad de los daños asociados con inundaciones.

Kundzewicz y Takeuchi (1999) presentan características hidrológicas y socioeconómicas que son utilizadas para describir las crecidas. Las primeras describen los aspectos hidrológicos del fenómeno y las segundas hacen referencia a los impactos económicos de la ocurrencia de las inundaciones. Las características hidrológicas utilizadas tienen como objetivo describir el fenómeno de forma directa (caudal máximo, altura máxima, volumen de la onda de crecida o área inundada). Las características hidrológicas indirectas incluyen al período de retorno o la probabilidad de excedencia. Las características socioeconómicas incluyen: número de víctimas y de evacuados, áreas inunda-

das, puentes destruidos, áreas de cultivo afectadas y pérdidas económicas.

La definición de las características hidrológicas indirectas, como el período de retorno o la probabilidad de excedencia, implica la aplicación de un enfoque estadístico con modelos de valores extremos y la teoría de estimación de parámetros.

La necesidad de definir estas medidas se fundamenta en el requerimiento de identificar objetivamente para qué crecida se toma la decisión de enfrentar la lucha contra inundaciones, pues los costos de protección aumentarán considerablemente a medida que se adopta el criterio de minimizar los riesgos.

Bedient y Huber (1992) señalan que la medida más común utilizada en hidrología para indicar la probabilidad de un evento consiste en asignarle un período de retorno o intervalo de recurrencia. Se indica que un evento anual máximo tiene un período de retorno de  $T$  años si esa magnitud es igualada o excedida, en promedio, una vez cada  $T$  años. El recíproco de  $T$  es la probabilidad de excedencia de un evento y es la probabilidad de que un evento sea igualado o excedido en un año cualquiera.

El intervalo de recurrencia, que naturalmente tiene unidades temporales, es ampliamente conocido por todos los profesionales de las ciencias del agua. Sin embargo, es importante que el ingeniero sepa transmitir claramente a la población que cuando se menciona que una obra ha sido diseñada, por ejemplo, para una crecida de diez años de recurrencia ello no implica necesariamente que se aseguren diez años de protección.

Con este ejemplo tal vez exageradamente simplista, se pretende destacar la necesidad de que quien elabore o participe en la planificación y proyecto de las obras necesarias debe asegurar una correcta difusión de las propuestas con conceptos muy claros a nivel de la comprensión popular. La sociedad tiene siempre cierta dificultad para interpretar el enfoque estadístico. La información debe pues presentarse de modo de superar esa incertidumbre acerca de la estadística, pues es fundamental que cualquier planificación de actividades cuente con el apoyo de la población involucrada.

### **Lucha contra las inundaciones**

Ante una necesidad de definición de metodología de acción contra las inundaciones, debe aclararse que no existe una respuesta única válida

para todas las circunstancias y todas las regiones ni que asegure una protección completa. Como ejemplo de los conceptos anteriores se puede señalar la ocurrencia de dos crecidas muy importantes que produjeron severos daños en sociedades que han desarrollado tecnologías avanzadas. Los ejemplos seleccionados son la crecida del río Mississippi ocurrida en los Estados Unidos en el año 1993 y la del río Oder en Alemania en 1997 que muestran que los daños son severos y de difícil reducción para este tipo de fenómenos aún en países avanzados y que el manejo de las crecidas es un problema actual y de discusión de la comunidad científica y tecnológica.

En realidad pueden sumarse las obras de protección (medidas estructurales) con medidas no estructurales tendientes a disminuir los costos y riesgos de las inundaciones. Tal como lo expresa White (1999) la mitigación de los desastres por inundación no dependen sólo de acciones que pueden desarrollarse durante las crecidas sino que deben ser producto de una combinación de acciones previas de prevención, manejo operacional de crecidas y reconstrucciones y revisiones posteriores al pasaje de las aguas.

Las actividades de prevención incluyen: a) manejo de riesgos de crecidas, b) planificación de contingencias de desastres, para establecer rutas de evacuación, umbrales críticos de decisión, requerimiento de servicios públicos e infraestructura para operaciones de emergencia, etc. c) construcción de la infraestructura de defensa contra inundaciones, tanto estructurales como no estructurales (obras físicas y sistema de alerta), d) mantenimiento de la infraestructura de defensa contra inundaciones, e) planificación y manejo del territorio en toda la cuenca de aporte, f) acciones para desalentar el desarrollo inapropiado en las planicies de inundación, y g) comunicación y educación a los pobladores del riesgo de crecidas y de las acciones que tendrán lugar durante la emergencia.

Las actividades de manejo operacional de crecidas puede considerarse como una secuencia de cuatro actividades: a) detección hidrometeorológica de la probabilidad de formación de crecidas, b) pronóstico de las condiciones de escurrimiento, c) alerta de la severidad y tiempo en que llegará la crecida, d) respuesta a la emergencia por parte de autoridades y pobladores.

Las actividades posteriores al paso de la crecida, dependiendo de la severidad de la misma,

pueden incluir: a) ayuda para necesidades inmediatas a los afectados por el desastre, b) reconstrucción de los edificios, obras de infraestructura y de defensa afectados, c) recuperación y regeneración del ambiente y de las actividades económicas en el área inundada, d) revisión de las actividades de manejo y planificación, a tener en cuenta para futuros eventos.

Además de lo expuesto, es obvio que todas las acciones señaladas requieren un adecuado enfoque institucional, acorde con la legislación vigente en cada país o región.

Las estrategias de protección de crecidas se pueden clasificar de acuerdo con el objetivo a defender en: para valles de grandes ríos, para principales ciudades, para pequeñas cuencas y estrategias ambientales.

Las protecciones para grandes ríos pueden incluir obras y medidas de gran envergadura: construcción de presas, mejora de la conducción de canales y medidas no estructurales (pronósticos de crecidas y avisos anticipados). También se deben desarrollar protecciones para ciudades importantes que incluyen la reubicación de población, construcción de protecciones y la utilización de áreas inundables a propósitos recreativos.

En pequeñas cuencas y dado que los tiempos de respuesta son menores es necesario contar con sistemas telemétricos de observación de variables hidrometeorológicas y modelos matemáticos que permitan el pronóstico en tiempo real para las tareas de defensa civil.

En realidad los problemas generalmente aparecen combinados. Por ejemplo, grandes ciudades ubicadas en una planicie de inundación y con la posibilidad clara de que ocurran precipitaciones intensas con muy escaso tiempo de pronóstico.

A modo de ejemplo práctico, cuando los costos de proteger un asentamiento urbano para un evento supera el valor intrínseco del mismo, podría ser la solución mudarlo y trasladar a los habitantes y sus bienes a regiones más seguras. Sin embargo, cuando se trata de una ciudad importante ubicada dentro de un valle de inundación (como el caso de Resistencia, capital de la provincia del Chaco, dentro del valle de inundación del río Paraná) es obvio que no se puede efectuar el traslado. En otros casos menos críticos, no cabe duda que una adecuada zonificación puede impedir las

construcciones permanentes en ciertos barrios muy seriamente expuestos a las inundaciones. En algunos barrios o asentamientos menores la reubicación puede ser una solución aceptable.

Los costos de protección de las ciudades debieran ser muy bien estudiados en relación con adecuados análisis de riesgos. No es posible pretender que una ciudad a orillas de un curso fluvial esté absolutamente exenta de inundaciones. El costo de tal protección (para eventos que pueden ocurrir cada más de mil años) sería exagerado para cualquier sociedad. Es necesario fijar una determinada condición de riesgo.

Ciertos barrios de la ciudad de Buenos Aires se pueden inundar con cierta frecuencia. Otro tanto inexorablemente ocurre y ocurrirá para otras ciudades de la cuenca del Plata. Pero no resulta admisible que el riesgo sea tan elevado que las pérdidas superen a las inversiones necesarias para una protección razonable.

### **Medidas para mitigar los riesgos naturales**

Las medidas estructurales y no estructurales de defensa contra las inundaciones componen en cierta medida concepciones básicas diferentes, pero que resultan de uso complementario para mitigar los efectos de las crecidas. En el pasado, casi con exclusividad se asociaba la lucha contra las inundaciones con obras de infraestructura (diques de protección, canales de desagüe o embalses de retención) que "aseguraban" mantener sin agua las planicies de inundación. Sin embargo, en la actualidad, una visión ambiental del problema plantea posibles soluciones no estructurales, como el ordenamiento territorial de la planicie inundable, un adecuado control del desarrollo y las actividades en zonas afectables, los sistemas de alerta temprana y la planificación de defensa civil.

### **Medidas estructurales contra las inundaciones**

Se denominan medidas estructurales a las obras físicas de protección de las zonas inundables (Maza Alvarez y Franco, 1997). Cada valle fluvial y cada emplazamiento dentro de ese valle requiere de una solución particular, muchas veces diferente de las otras vecinas. Pueden tratarse de obras lineales, como diques laterales de protección de márgenes, que pueden ser materializadas con materiales muy diversos: enfajinados, enroca-

dos, tierra, losetas de hormigón, gaviones, tabletas metálicas, bolsas rellenas de arena o tierra.

En ciertas oportunidades, cuando las corrientes pueden ser importantes y las alturas de agua no exageradas, debe sumarse a las obras longitudinales la presencia de espigones frontales para aliviar los procesos erosivos de las márgenes. Esos espigones también pueden ser construidos en diversos materiales, siendo los más comunes de enrocado o gaviones.

Otras importantes obras físicas contra las inundaciones son las centrales de bombeo. Este sistema es indispensable para extraer las aguas de lluvia que se acumulan dentro de los recintos cerrados (polders) de protección de las ciudades y drenarlas hacia el curso fluvial donde el nivel de agua es superior al nivel del interior del recinto.

Dentro de ese tipo de protección se tiene el caso de la mencionada ciudad de Resistencia, donde se han levantado estructuras fijas de protección del casco urbano (diques de contención) para evitar la inundación por las crecidas del río Paraná. Esas estructuras rodean la ciudad y permiten el paso del río Negro (que atraviesa la ciudad recogiendo sus aguas pluviales) mediante obras de compuertas que, ante la eventual presencia de aguas altas en el Paraná deben cerrarse. En ese medio el sistema de bombeo debe evacuar esas aguas más las de las lluvias locales.

La decisión de importantes medidas estructurales en algunas ciudades del valle de inundación también aparecieron a partir de catástrofes. En realidad, hay que reiterar que la población sólo toma conciencia de la importancia de la inundación cuando ésta la afecta directamente. En la Cuenca del Plata, luego de la crecida de 1982-1983, que tuvo efectos muy notables y sirvió fundamentalmente para tomar conciencia del problema, se programaron algunas obras y medidas no estructurales.

Es interesante comentar que los políticos y los periodistas suelen preguntar acerca de la posibilidad de que con los actuales avances de la tecnología los daños y riesgos de inundación sean totalmente erradicados. En realidad, es una difícil pero necesaria tarea convencerlos de que salvo excepciones, no es posible eliminar los daños de inundaciones en un cien por ciento. Por una parte, en cuencas del tamaño de la del Plata no es admisible pensar en trasvasar flujos de elevado caudal hacia otras tierras como medio de paliar las grandes inundaciones, pues aunque se contara con los

excepcionales fondos necesarios para tales obras, no se tendría respuesta favorable respecto de una elemental evaluación de impacto ambiental.

Otro tipo de medios estructurales de lucha contra las inundaciones son las presas de retención, que se llenan cuando se producen las crecidas en la alta cuenca y regulan apropiadamente la descarga hacia aguas abajo, de modo de evitar caudales que produzcan la inundación de los terrenos adyacentes al cauce. Este medio es muy utilizado en control de crecidas aluvionales en la región andina, pero cada vez más objetado por su elevado costo y razones ambientales. El efecto de laminación de crecidas producido por presas de retención puede ser importante en ríos menores o en grandes embalses de montaña, pero en extendidas cuencas de llanura es francamente irrelevante. Resulta difícil pensar en retener las crecidas de los grandes ríos de baja pendiente operando presas de regulación escasa para volúmenes incommensurables. Crecidas de 30.000 m<sup>3</sup>/s durante más de quince días, que en el río Paraná no son demasiado extraordinarias, resultan de muy difícil manejo en los embalses aún más grandes, dificultando cualquier regulación.

Como la mayor parte de la población no interpreta el análisis anterior, en general hay una gran confusión popular por causa de errores en cálculos muy sencillos. Uno de los principales esfuerzos de los especialistas en las ciencias del agua debe centrarse en la adecuada difusión de conceptos hidrológicos e hidráulicos indiscutibles. Para ello, aunque no resulte grato a los científicos, deben participar activamente en la mayor parte de las informaciones a la población a través de los medios masivos de comunicación, pero mediante adecuado lenguaje y razonamientos sencillos.

### **Las inundaciones y las rutas**

El caso de las rutas y caminos que corren paralelamente a los cursos de agua dentro del valle aluvional plantea en general problemas de muy difícil solución. Debe tenerse presente la habitual minimización de las tareas hidráulicas por parte de los responsables de la ingeniería vial, al menos en nuestra región. En general, las autoridades viales nacionales y provinciales siempre han menospreciado los aspectos hidráulicos, por lo que puede ser interesante hacer notar la importancia de los problemas que causa el agua sobre las estructuras viales. Por ejemplo, más del 50% de los puentes que se han caído en los Estados Unidos de Norteamérica han fallado por problemas hidráulicos; es decir que la suma de caí-

das de puentes por errores estructurales, falla de fundaciones, choque de embarcaciones, terremotos y hasta actos de terrorismo no alcanza a equilibrar la cantidad de puentes que se han destruido por su mal diseño hidráulico (Murillo, 1987).

Cuando las rutas se desarrollan en zonas de muy baja pendiente, como la provincia de Buenos Aires, en la Pampa Húmeda de la Argentina, los terraplenes pueden alterar el flujo del agua, cambiando su dirección y provocando verdaderos trasvases de cuenca. Esos trasvases son responsables de inundar terrenos que, con anterioridad a la construcción del camino, no experimentaban esos fenómenos, salvando a otros campos de inundaciones que sufrían periódicamente. En esos casos, se plantea un verdadero problema a los contribuyentes, pues se deben pagar cifras a veces millonarias a los damnificados por la construcción de caminos o canales que por mal diseño hidráulico, no tuvieron en cuenta estos impactos, mientras que obviamente los supuestos beneficiados no deben efectuar ningún aporte adicional.

Así como existen rutas paralelas a los grandes cursos fluviales que se han transformado en verdaderos diques laterales otras intersectan el valle, componiendo a su vez una suerte de diques frontales. Estas últimas tienen en cuenta las posibles crecidas con la presencia de puentes "aliviadores", que muchas veces resultan insuficientes, por lo que se producen erosiones intensas en el lecho que provocan la destrucción de las estructuras, debiendo ser reconstruidas luego de las inundaciones.

### **Medidas no estructurales**

Si bien las medidas no estructurales cubren un amplio campo de especialidades, pues van desde la educación ambiental de la población hasta el mejoramiento de las comunicaciones, es importante citar como ejemplo fundamental a los sistemas de alerta temprana, que se basan en un pronóstico a mediano plazo de las posibilidades de inundación.

En cuencas de respuesta rápida, si se tiene el aviso certero con suficiente anticipación los sistemas de alerta pueden evitar muertes, ya que nadie estaría sorprendido por el evento. Desde que hace veinte años se instaló el sistema de alerta con red telemétrica en la cuenca del río San Antonio, en las sierras cordobesas de la región semiárida argentina, no se han producido más muertes por las crecidas aluvionales que afectan la región turística de Villa Carlos Paz, en época de vacaciones de verano.

En cuencas de llanura, donde es posible establecer el alerta con mucho mayor anticipación, además hay tiempo de retirar de los inmuebles que van a ser afectados casi todas las cosas de valor. Los sistemas de alerta en este tipo de cuencas deben informar no sólo la fecha del evento y la altura esperable con cierta precisión sino también el período de permanencia de los niveles de inundación. En casos de carácter puntual, como las inundaciones urbanas, un aviso temprano permite retirar a lugares adecuados todos los bienes que pueden ser deteriorados por el agua y evitar que los pobladores transiten por zonas afectadas. Es interesante notar que los costos de una inundación son distintos si la misma no alcanza o supera una cierta altura denominada "cota de mesa", de alrededor de los noventa centímetros. A esa altura se pueden subir los bienes que se desean preservar sin necesidad de transporte, por lo que los vecinos disponen de todo en sus propios hogares, suben las cosas de valor sobre mesas, mesadas y repisas, cierran con llave, pueden evacuar la casa y regresan cuando la inundación ha cesado. Si el agua supera el citado "nivel de mesa" los costos de inundación se incrementan sustancialmente.

En ambientes urbanos, suburbanos y rurales, un adecuado sistema de alerta hidrológico permite evitar riesgos a los pobladores, salvar hacienda y transportar bienes, pero no puede impedir la inundación de las tierras y los elementos adheridos a ella. Por ello, es inadmisibles la inundación de un hospital, de una central de energía o de una escuela, que jamás se debieran haber construido en zonas afectadas por inundaciones periódicas, donde no es posible evacuar los bienes fundamentales. Este aspecto tiene que ser particularmente tenido en cuenta en la zonificación de los terrenos.

Además de los sistema de alerta, otras medidas no estructurales que pueden señalarse son: establecimiento de una política de planificación de actividades económicas en la planicie de inundación, normas de construcción en la cuenca para evitar un aumento en la vulnerabilidad ante crecidas, establecimiento de seguros contra pérdidas por inundaciones y educación de la población que puede ser afectada.

El uso de la tierra debe ser racionalmente establecido teniendo en cuenta los riesgos de inundación. No es comparable la inundación de un parque deportivo que la de un barrio de viviendas o la de una industria con residuos tóxicos. Se recuerda que durante la crecida del río Paraná en el verano de 1992, la inundación afectó seriamente una escuela

técnica que perdió parte de su equipamiento, compuesto por maquinaria adherida al piso y se encontró con alturas de agua que superaban el metro. También quedó bajo agua todo un barrio de viviendas que había sido construido a través de créditos oficiales. De llevarse a la práctica los conceptos fundamentales de ordenamiento del territorio lo expuesto difícilmente podría ocurrir.

Luego, a partir del relevamiento de los terrenos afectados o afectables por inundaciones es posible proponer "zonificaciones", para definir el grado de ocupación de la tierra en función del riesgo y fijar así restricciones al dominio en las áreas periódicamente inundables. En tal sentido, la definición de una "línea de ribera" es un tema fundamental, sobre el que se han hecho importantes aportes técnicos.

El límite del valle aluvional debe estar legalmente establecido con criterios técnicos apropiados. De ese modo, se podría impedir la construcción de edificios permanentes en terrenos que claramente pertenecen al cauce mayor de un curso de agua, aunque permitiendo en ciertas zonas que se instalen estructuras menores, galpones o construcciones transitorias.



Figura N° 2: Áreas de aporte de la cuenca del río de la Plata

### Sistema de Alerta Hidrológico de la Cuenca del Plata

La cuenca del Plata posee una extensión de 3.150.000 kilómetros cuadrados, abarcando territorios de Bolivia, Paraguay, Brasil, Uruguay y Argentina. Está conformada fundamentalmente por los cursos de los ríos Paraná, Paraguay, Uruguay, Iguazú, Pilcomayo y Bermejo (figura N° 2).

La población que se distribuye a lo largo de su recorrido supera los 80.000.000 de habitantes, que con su actividad económica contribuyen con el 70% del producto bruto global de esos cinco países. Sobre los ríos que la integran se han construido más de cuarenta centrales hidroeléctricas (entre ellas la imponente obra de Itaipú), que satisfacen el 60% de la energía eléctrica de la región. Varios de sus cursos son navegables, estando en proyecto una "hidrovía" Paraguay-Paraná. A su vez, la cuenca del río Paraná está ubicada entre las latitudes 16° y 34° de latitud sur y abarca gran parte de Brasil y la Argentina, la totalidad del Paraguay y una parte de Bolivia. El área de la cuenca, tomada hasta su desembocadura en el delta es de 2.600.000 kilómetros cuadrados.

Dentro del sistema, es posible diferenciar cuatro zonas con diferentes características hidrográficas: el río Paraguay, el río Iguazú, el Alto Paraná y el tramo Medio e Inferior, simplemente denominado como río Paraná. Este último es el que efectivamente interesa al presente análisis. La confluencia de los ríos Alto Paraná y Paraguay tiene lugar frente a la localidad correntina de Paso de la Patria, 687 Km aguas abajo del punto donde recibe por margen izquierda al caudaloso río Iguazú. La sección del río Paraná en esa confluencia presenta un cauce de 3.500 m de ancho, sembrado de islas y bancos de arena de diversas dimensiones. Esa sección se encuentra a 1.240 Km del puerto de Buenos Aires, desde donde arranca el kilometraje convencional del río (Soldano, 1947).

Desde la sección antes mencionada, donde recibe las aguas del Paraguay, el río tiende hacia aguas abajo a identificarse completamente con un curso de agua típico, denominado en hidráulica fluvial como "río de llanu-

ra con lecho de fondo móvil", lo que implica un cauce menor con grandes caudales y bajas pendientes, con dunas que se trasladan en el lecho de arena fina y un cauce mayor que se cubre durante los procesos de inundaciones, pudiendo excluirse algunas islas de mayor cota. Desde Corrientes la pendiente del río desciende paulatinamente hacia aguas abajo, hasta llegar a 0,01 m/Km en el tramo final.

### Las crecidas del río Paraná

Para períodos anteriores a fines del siglo XIX existen referencias de viejas marcas y transmisión oral de pobladores que permiten "inferir" crecidas históricas. Los niveles del río Paraná se comenzaron a medir en el año 1901. Los diarios La Nación, La Prensa y La Tribuna publicaron elementos que permiten analizar la crecida extraordinaria de 1878, estimándose que alcanzó la cota 8,65 m en la escala de Corrientes. Del mismo modo, se tiene referencia de una crecida de 1858, que superó en un orden de 30 cm a la anteriormente descrita. Por otra parte, en 1812 hubo otra crecida que alcanzó niveles extraordinarios, superando incluso a la registrada en 1905, con un nivel máximo fijado en 9,53 m en la escala de Corrientes. Se pueden mencionar también dos crecidas que se suponen superiores a todas las registradas, producidas en 1612 y 1748, que habrían superado el nivel de 10,50 m en la escala de Corrientes.

Según Aisiks (1984) una crecida del río Paraná en Corrientes que alcanza una cota de 5,5 m en la escala local (del orden de 25.000 m<sup>3</sup>/s) no produce daños por inundación aguas arriba ni aguas abajo de esa sección. Si se analizan los datos históricos del Paraná, se observa que en promedio dos de cada tres años se producen crecidas. Esas crecidas pueden ocurrir en cualquier época del año, pero prevalece la tendencia en los meses de febrero y marzo, con un repunte en junio. De las crecidas medidas más importantes hasta la fecha se deben considerar la de 1905, la de 1966, la del período 1982-1983 y la de 1992. El caudal máximo en Corrientes durante el mes de junio de 1905 fue de 43.000 m<sup>3</sup>/s, mientras que en marzo de 1966 se alcanzó en esa misma sección un caudal de 41.000 m<sup>3</sup>/s. La crecida de 1983 tuvo características muy especiales, que comenzaron a tener vigencia durante el año anterior, con precipitaciones muy importantes, que prácticamente saturaron los suelos de la cuenca. Tomando la sección de Corrientes, el 30 de mayo de 1983 se midieron 51.300 m<sup>3</sup>/s, con un segundo pico el 12 de julio de 45.000 m<sup>3</sup>/s y el máximo registrado el 18

de julio con 61.000 m<sup>3</sup>/s. En el año 1992 se produjo otra crecida catastrófica del río Paraná que culminó en la ciudad de Santa Fe, con un caudal máximo de 54.000 m<sup>3</sup>/s y un nivel de agua aún superior al máximo registrado en la crecida de 1982-1983, ante un mayor grado de ocupación del valle de inundación (Paoli, 1997).

El incremento notable de los valores medios de alturas y caudales a partir de 1970 indican un aumento del volumen de agua escurrido en estos últimos treinta años respecto de iguales lapsos en tiempos anteriores. Si bien este aumento puede ser transitorio, se estima prudente considerar que puede tener cierta permanencia, en virtud de aspectos probablemente asociados con un cambio climático, lo que es motivo de estudios en la actualidad.

Si se representa la estadística de niveles mensuales medios mínimos (mes de setiembre) y la que usualmente contiene los medios máximos (mes de abril), dentro del período moderno de registros 1970-1992, se observa que la amplitud de la variación estacional del nivel es significativamente menor en la actualidad, lo que indudablemente está asociado a la regulación impuesta por la operación de las numerosas presas brasileñas de la alta cuenca. Es de destacar que la citada reducción de amplitud es principalmente importante para las bajantes, teniendo mucho menos significación en las crecidas. En las crecidas máximas la capacidad de regulación es prácticamente despreciable.

Es interesante destacar que si se considera las estadísticas de varios importantes ríos de la región nororiental de la República Argentina, es posible constatar que el caudal promedio calculado con registros que van desde fines del siglo pasado hasta 1970 resulta bastante menor que si se toman los últimos treinta años del siglo. Es tarea de los especialistas explicar a las autoridades políticas y a la población que esas "recurrencias" de inundaciones deben ser permanentemente revisadas. En la cuenca del Plata, se ha pasado progresivamente a lo largo del presente siglo a una época más húmeda, lo que modifica la probabilidad de ocurrencia de inundaciones respecto de una estadística convencional que no tenga en cuenta este fenómeno.

Para los grandes ríos que escurren por cauces de llanura en bajas pendientes, las crecidas importantes pueden ser consideradas previsibles e incluso pueden ser muy razonablemente anticipadas, en virtud de datos pluviométricos de las partes alta y media de la cuenca. Es importante destacar



que además de las condiciones específicas de la tormenta o grupo de tormentas que generan el exceso de agua, la magnitud del fenómeno de inundaciones estará fuertemente ligado a las condiciones previas de humedad en la cuenca. El problema se agrava considerablemente cuando un fenómeno de elevada pluviosidad se produce sobre una cuenca que se encuentra totalmente saturada, con los embalses que controlan sus ríos totalmente colmados y los suelos húmedos.

### El sistema de alerta temprana

Un sistema hidrológico de alerta temprana transmite a los medios de defensa civil y control de desastres la información anticipada de eventos hidrológicos extraordinarios. El pronóstico debe ser preciso, pues un error por defecto en las alturas de crecidas pronosticadas puede llevar a inundaciones imprevistas y un error por exceso puede llevar a gastos innecesarios y a la pérdida de credibilidad en el sistema ante futuros eventos. La precisión y la regularidad de la información aseguran la preservación de vidas y minimizan las posibles pérdidas de bienes materiales de quienes habitan la zona afectada o de quienes desarrollan actividades económicas en ella.

A raíz de las inundaciones producidas durante el período 1982-83 la Secretaría de Recursos Hídricos de la República Argentina puso en funcionamiento un Centro Operativo de Alerta Hidrológico (COAH) cuya operación fue confiada al INCYTH, hoy Instituto Nacional del Agua y del Ambiente (INA), Goniadzki (1997). La crecida de 1992 provocó otra de las mayores inundaciones y como consecuencia de ello, se produjeron graves daños en varias provincias del litoral argentino. Ante esa situación, el Banco Interamericano de Reconstrucción y Fomento (BIRF) otorgó un préstamo para el "programa de rehabilitación para las inundaciones" dentro del ámbito de la Subsecretaría de Asistencia a las Provincias del Ministerio del Interior. Ese organismo y el Instituto Nacional del Agua y del Ambiente suscribieron un convenio para mejorar la capacidad tecnológica de este último para formular pronósticos y emitir los avisos de inundación.

Es importante señalar que el sistema de alerta debe funcionar en forma continua dado que se pronostican tanto crecidas como bajantes que afectan la navegación. Para las ciudades de Rosario y de Santa Fe se estiman las altura hidrométricas diarias con más de veinte días de anticipación, dando luego correcciones a partir de la influencia de lluvias locales. En cada ciudad como las nombradas, Formosa, Corrientes, Goya, etc. se pronostican con diferente anticipación esas alturas, señalando oportunamente cuando se alcanzan los niveles de alerta y los de evacuación en cada caso.

El sistema de alerta hidrológico de la cuenca del Plata está configurado por un conjunto de modelos para simulación y pronóstico de distintas variables hidrológicas en tiempo real, calibrados y operativos. Entre los que presentan un enfoque probabilístico se dispone de modelos de regresión lineal múltiple con un algoritmo de estimación recursiva de los parámetros con el filtro de Kalman. Entre los modelos determinísticos se aplica el modelo de Sacramento del National Weather Service, calibrado para el tercio inferior de la cuenca baja del río Iguazú (24000 km<sup>2</sup>). En la figura N° 3a se presentan los resultados de una asociación entre un modelo determinístico y uno estocástico para la predicción de caudales diarios. En la figura N° 3b se observa la simulación del caudal a la salida de la cuenca usando el modelo determinístico (Chavasse y Seoane, 1997).

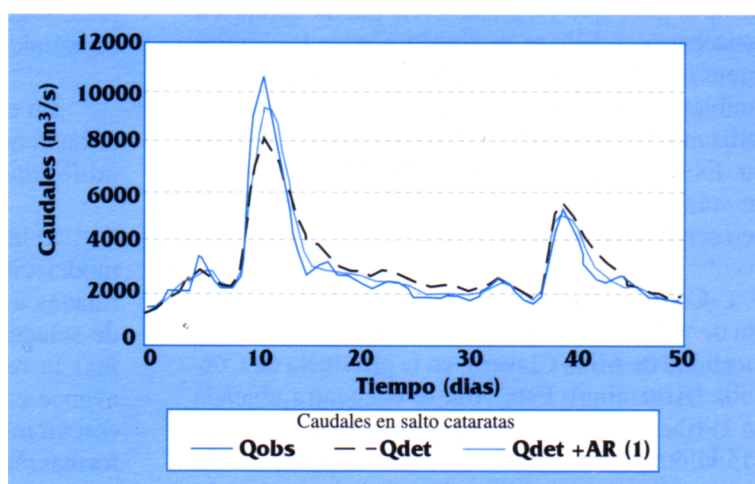


Figura N° 3a Hidrogramas simulados y observado

También se aplican el modelo de transformación precipitación-caudal HEC-1, del U.S. Corps of Engineers calibrado para la cuenca baja del Iguazú.

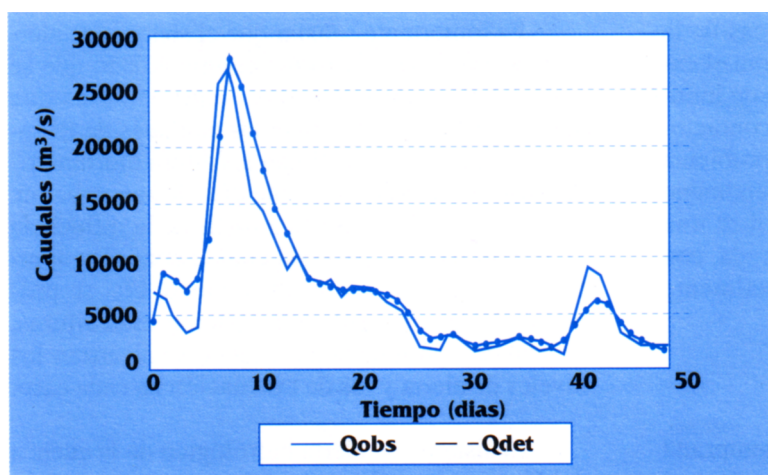


Figura N° 3b Hidrogramas simulado y observado

zú y para la cuenca media del Uruguay y un modelo hidrodinámico (Ezeiza V) de traslado de ondas a lo largo del río Paraná, desde la presa de Yacyretá (aguas arriba del encuentro con el río Paraguay) hasta su desembocadura (Menéndez, 1998).

### Fenómenos de crecidas en ríos serranos

Los casos anteriormente descriptos son bien diferentes de las crecidas repentinas que se producen en las regiones serranas. En Villa Carlos Paz, el INA posee un sistema de alerta telemétrico para el río San Antonio, que funciona sólo entre los meses de diciembre y marzo, pero que debe dar las señales de alerta y evacuación con sólo horas de tiempo, para que Defensa Civil pueda actuar en consecuencia. Ello es motivado porque las lluvias intensas sólo se producen en esa época del año y también porque es en épocas de turismo cuando se utilizan los "campings" ubicados en zonas de riesgo. Es responsabilidad de Defensa Civil evacuar en escaso tiempo a todos los pobladores que pueden ser afectados en esos sitios.

Como ejemplo de la aplicación de la estrategia de "zonificación" se puede señalar el caso de la localidad de Mina Clavero, en la provincia de Córdoba (Argentina). Esta villa se encuentra ubicada en la ribera del río Panaholma, cuya cuenca tiene 415 kilómetros cuadrados. La villa está emplazada a cierta distancia de las nacientes de la cuenca, lo que favorece el desarrollo de medidas de alerta y delimitación de zonas de riesgo Barbeito y Ambrosino (1999).

Para el fin propuesto la zonificación considera tres zonas fundamentales: a) de baja amenaza,

b) de uso restringido y c) de alta amenaza. La primera incluye áreas inundables por avance y crecimiento lateral de las aguas de crecida y anegamiento. Como medidas de protección se consideran apropiadas obras de defensa y construcción de estructuras adecuadas para las viviendas (aisladas o sobreelevadas). Las zonas restringidas se conforman por áreas inundables debidas al avance frontal de las aguas de crecidas. La lucha contra las inundaciones en este sector se centra en el análisis del emplazamiento de infraestructura y la aplicación de sistemas de alerta. La última zona

considerada, de alta amenaza, incluye áreas del lecho ordinario, el canal de estiaje y áreas que se inundan anualmente. En esta zona no se considera recomendable el emplazamiento de edificios o de residencia permanente ni la construcción de puentes que puedan interferir con sus pilares o terraplenes el libre paso de las aguas. La zona está incluida en el plan de alerta de crecidas.

### Conclusiones

Ante el estado de situación que se plantea en el presente texto, es posible preguntarse sobre cuáles serían las líneas de investigación y desarrollo que deberían proponerse para un futuro cercano, siempre con el objetivo de disminuir riesgos y pérdidas económicas ante eventos de particular envergadura.

En ese sentido, las cuatro vertientes que podrían concentrar los esfuerzos de investigadores y profesionales de la especialidad son:

a) las investigaciones tendientes a mejorar la modelación hidrológica, en especial aquellas destinadas a un mejor conocimiento de los criterios de selección de funciones estadísticas para estimar la relación caudal-período de retorno. El avance en esta línea también se debe completar con un incremento en el conocimiento de la transformación lluvia-caudal, a efectos de predecir con menor riesgo los posibles caudales de diseño de obras de protección.

b) las investigaciones destinadas a mejorar la modelación hidrodinámica, que si bien pueden tener por objeto una mejor representación física del fenómeno, en realidad hoy están más limitadas por

la carencia de información de base. En particular, debe profundizarse el conocimiento preciso de la topografía del valle de inundación en zonas de baja pendiente, para lo que sería conveniente estudiar metodologías económicas que permitieran obtener la información indispensable para dar adecuadas condiciones de borde a los modelos hidrodinámicos de traslación de crecidas.

c) las investigaciones tendientes a lograr la transferencia al aspecto local y de detalle (a escala de cuenca) del uso de los modelos de predicción climática (del tipo de los utilizados para el fenómeno El Niño-Oscilación del Sur, por ejemplo). Este aspecto es infinitamente más relevante respecto de los resultados prácticos posibles de obtener con relación a los dos anteriores, especialmente porque estos dos dependen inexorablemente de la bondad de la metodología predictiva de los efectos climáticos en la cuenca. Es, por otra parte, el tema de mayor dificultad en el presente, pero si se pretende un gran salto cualitativo, él debe concentrar los mayores esfuerzos científicos.

d) las actividades tendientes a conformar equipos sólidos de manejo de crecidas y control de inundaciones en todas las cuencas de importancia, para lo que en principio es fundamental educar a los "especialistas" en una visión del tema con enfoque sistémico y análisis transdisciplinario.

Sobre el particular, es importante destacar que el estudio de riesgos de inundación y la elaboración de planes para enfrentar la emergencia es una tarea que involucra varias disciplinas, en la que los profesionales de las ciencias del agua deben participar en sus distintos campos de especialidad, pero manteniendo una visión holística del problema.

Cada cuenca tiene un comportamiento físico y social diferente y requiere casi seguramente una solución diferente. En virtud de lo expuesto, no se recomienda elaborar recetas (modelos rígidos) aplicables a casos tipificados, que difícilmente sean clasificables.

Los problemas ambientales y sociales de algunas soluciones estructurales, como la polderización de ciudades y la experiencia de los sistemas de alerta hidrológico en casos tan disímiles como pequeñas cuencas de montaña con pocas horas de tiempo de respuesta y de la inmensa cuenca del Plata, con toda su importancia geopolítica y económica, y varios días de aviso previo, permite intuir que, dentro del marco casi inexcusable del desarrollo

sustentable que ya nos exige la ingeniería del agua, el futuro de la lucha contra las inundaciones estará mucho más fuertemente ligado a originales y sistemáticas medidas no estructurales.

## Reconocimiento

Los autores agradecen la colaboración material prestada por la Coordinación de Sistemas de Información y Alerta Hidrológico y el Centro de la Región Semiárida del Instituto Nacional del Agua y del Ambiente.

## Referencias

- Aisiks, E.G. (1984): "La gran crecida del río Paraná de 1983", Organización Techint, Boletín Informativo, 232, Buenos Aires.
- Barbeito, O. y Ambrosino, S. (1999): "Diagnóstico geológico y geomorfológico ambiental del riesgo de inundación", Revista INA, Año II, pág. 27-31.
- Bedient, P.B. y Huber, W. C. (1992): "Hydrology and Floodplain Analysis". Addison-Wesley.
- Berz, G. (1999): "Flood disasters: lessons from the past - worries for the future", Geoscience Research Group, Munich Reinsurance Company, Alemania.
- Chavasse, D y Seoane R.: (1997) "Asociación determinístico-estocástica para la predicción de caudales". Ingeniería del Agua. Vol 4 N° 2 55-64, España.
- Goniadzki, Dora (1997): "Sistemas de información y alerta hidrológico. La prestación de un servicio esencial", Revista INA, Año 1, N° 1, pág. 21-23
- Heras, R. (1976): "Hidrología y recursos hidráulicos", Centro de Estudios Hidrográficos de España, Madrid, Tomo I.
- Kundzewicz, Z.W. y Takeuchi, K. (1999): "Flood protection and management: quo vadimus". Hydrological Science Journal 44 (3), 417-432.
- Maza Alvarez, J.A. y Franco, V. (1997): "Obras de protección para control de inundaciones", Series del Instituto de Ingeniería, UNAM, N° 591, México D.F.
- Menéndez, A. : "La comprensión de la fenomenología de las inundaciones como requisito para su control", Revista INA, Año II, diciembre, pág. 25-28.
- Murillo, J.A.: (1987) "The scourge of scour", Civil Engineering, New York, pág. 66-68.
- Paoli, C.: (1997) "Inundaciones en ríos con creciente ocupación", Revista INA, N°1, pág. 78-81.
- Soldano, F.A. (1947): "Régimen y aprovechamiento de la red fluvial argentina", Editorial Cimera, Buenos Aires.
- Ven Te Chow (1964): Handbook of Applied hydrology, McGraw-Hill.
- Ven Te Chow, Maidment, D y Mays, L. (1994): Hidrología aplicada. McGraw-Hill.
- White, R. (1999): "Water in rivers: flooding", A contribution to the World Water Vision, IAHR.