

# CONSTRUCCION DE UNA NUEVA GENERACION DE HIDROLOGIA SOBRE LAS FUERZAS DEL PASADO

Por John C. SCHAAKE, Jr. \*

El agua es a la vez un recurso indispensable para la supervivencia humana y una amenaza potencial para la salud y el bienestar. Este doble papel del agua sigue cobrando más importancia por la competencia entre la creciente población del mundo por el uso de los limitados recursos de tierra y agua. A esta tendencia se añade la perspectiva de un cambio climático mundial en los primeros decenios próximos, y que la tendencia de los cambios del clima sea amplificada por los procesos hidrológicos y por los cambios de los caudales.

La ciencia de la hidrología ha hecho notables progresos en los últimos decenios, especialmente en el área de los procesos analíticos y la formulación de modelos matemáticos para simular los diversos procesos que constituyen el ciclo hidrológico. Buena parte de este desarrollo ha ocurrido por la necesidad práctica de resolver problemas específicos de ingeniería.

Pensando en el futuro, será importante hacer un trabajo mejor en la administración de los recursos hídricos y la protección de la salud y el bienestar de una población mundial mayor. Esto hará necesario que la hidrología refuerce sus bases científicas y consiga mejoras sustanciales en el arte de su aplicación.

Un ejemplo de las mejoras necesarias es la necesidad de poder hacer evaluaciones más fiables de los procesos hidrológicos en las cuencas fluviales "incontroladas". Es necesario predecir con precisión el caudal medio, las inundaciones y los caudales mínimos en zonas en las que no se ha medido la escorrentía o donde se dispone de muy pocos datos. Para ésto se necesita una mejor comprensión fundamental de la relación entre el clima y la hidrología (incidentalmente, esta mejor comprensión es necesaria también para potenciar la representación en los modelos climáticos mundiales de los procesos

hidrológicos sobre los continentes, un objetivo del Programa Mundial de Investigación Climática).

Los cambios de la hidrología en los próximos decenios tendrán lugar principalmente debido a que han surgido nuevas ideas creativas para aprovechar las oportunidades que ofrecen los avances tecnológicos. En las argumentaciones que siguen se analizan algunos de los cambios que posiblemente se produzcan.

## *La tecnología – una oportunidad para el progreso*

Uno de los factores más importantes para el cambio de la hidrología en los últimos 30 años ha sido el ordenador. En un principio, su valor principal estriba en derribar la barrera del cálculo— efectuar un cálculo mecánico era una experiencia manual. Sin embargo, la mayor ventaja de esta solución fue un nuevo conocimiento a fondo. Al principio, ésto se puso de manifiesto por una "metodología sistemática" de la hidrología. Lo que sucedió fue que los hidrólogos se dirigieron a otras disciplinas cuantitativas en busca de ayuda, y comenzaron a desarrollar nuevos métodos cuantitativos, especialmente en las áreas de las probabilidades, las estadísticas y los procesos estocásticos.

Volviendo a los ordenadores como factor de cambio, otra ventaja consiste en el archivo de datos. Cuando, a finales de los sesenta, se pudo disponer de los primeros discos de acceso libre, se podía archivar y sacar la información de modo más rápido y eficaz. Era el principio de los sistemas de cálculo interactivos, abriendo el camino para que el ordenador se convirtiese en un sistema de información en vez de un sistema de proceso de datos. Hoy día, se están haciendo progresos

\* Científico principal. Oficina de Hidrología, National Weather Service, NOAA, EE.UU.

en el desarrollo y aplicación de las bases de datos digitales. Cientos de megabits de almacenamiento en discos duros están disponibles en los ordenadores portátiles de mesa. También se ha desarrollado la tecnología de los microordenadores de modo que se pueden instalar ordenadores con los equipos de campo. Los ordenadores, unidos entre sí en redes, están resultando esenciales para todos los aspectos de la gestión de datos. Pero el fruto total de los avances de la tecnología de los ordenadores no ha llegado a la hidrología por dos razones. Primera, el sistema de discos de acceso libre sigue siendo un cuello de botella en la mayoría de las aplicaciones –ésto es especialmente cierto para la exposición gráfica de la información espacial. Segunda, la información tiene que ser expuesta para que resulte útil– queda mucho por hacer antes de que se pueda conseguir una *interface* eficaz interactiva gráfica para el usuario, en hidrología y en casi todas las demás ciencias. El progreso de esta *interface* se ha visto limitado por la complejidad tecnológica del problema, el caos de la industria de los gráficos y la necesidad de grandes cantidades de memoria de acceso libre para eliminar los discos como cuello de botella del sistema de información. (Incidentalmente, los sistemas de información estables tienen siempre un cuello de botella; una clave para un buen diseño del sistema consiste en saber donde está realmente el cuello de botella y proyectar de acuerdo con ello).

Hacia fines de siglo, se podrá disponer de un acceso gráfico e interactivo sustancialmente más rápido y más acomodado al usuario, a grandes cantidades de información espacial y cronológica. Una forma mejorada de lo que hoy conocemos por “estación científica de trabajo” tendrá la capacidad de proceso numérico de los actuales superordenadores teniendo un acceso tan fácil como los procesadores de textos de hoy día.

### *Los datos – la sangre viva de la hidrología*

En muchos deportes, la clave del éxito consiste en mantener la vista en la pelota. En cierto modo, los datos son “la pelota” de la hidrología, pero nuestra atención se desvía con demasiada frecuencia debido al interés por los aspectos teóricos de la ciencia. Los sistemas de datos son costosos, muchas veces no están

disponibles y la comunidad científica hidrológica no les da el valor suficiente, particularmente en el hemisferio occidental. Basta con echar una ojeada a las principales revistas científicas para observar que nuestros ojos están puestos en nuestra “raqueta” hidrológica antes que en la pelota. Debido a los esfuerzos para contener los gastos de los gobiernos, algunos de nuestros más valiosos sistemas de datos están ahora en peligro.

Los vientos del cambio, sin embargo, pueden estar soplando en la dirección correcta. El coste de la telemetría de los datos está disminuyendo y las comunicaciones por radio VHF/UHF, satélite o *meteor-burst* ya están disponibles. Están apareciendo técnicas con las que se pueden usar datos medidos a distancia procedentes de radares y satélites. Estos nuevos sistemas están siendo reconocidos como potencialmente valiosos por un número creciente de miembros de la comunidad científica.

Un uso importante de la medida a distancia es la estimación cuantitativa de la precipitación. Aunque los datos de los pluviómetros seguirán siendo el mejor método para medir la precipitación en un punto, la medida a distancia ofrece una información adicional sobre la variabilidad espacial. También, los datos de los pluviómetros sirven de base de referencia para calibrar los datos medidos a distancia.

En la actualidad, las estimaciones de precipitación más precisas obtenidas por medida a distancia corresponden a los datos de reflectividad del radar. En los EE.UU. se está instalando una nueva serie de radares llamados *nexrad*. A partir de los distintos niveles de reflectividad (medidos en decibelios) y una red de 30 a 50 pluviómetros automáticos, se obtiene una estimación de la precipitación carente de desviaciones (*figura 1*). La zona total cubierta es de 512 km cuadrados, entre los ríos Arkansas y Rojo, en el estado de Oklahoma.

En el paso siguiente, las estimaciones de precipitación por radar se combinan con todos los datos disponibles de los pluviómetros y con las imágenes de infrarrojos de los satélites, para hacer una estimación “óptima” del punto de vista estadístico, a la vez carente de desviaciones y con un mínimo error de variancia. El tercer paso consiste en combinar la estimación del segundo paso con las de

varios radares para formar una estimación compuesta para una cuenca fluvial.

En muchas partes del mundo no se dispone ni de datos adecuados de pluviómetros ni de datos de radar, pero se dispone de imágenes de satélite que pueden usarse conjuntamente con el reducido número de datos de pluviómetro para estimar la precipitación. Hay varios métodos. La mayoría usan imágenes de la cima de las nubes, en el visible y/o el infrarrojo, procedentes de satélites geostacionarios, pero estas imágenes se relacionan sólo de modo indirecto con la precipitación. Hay que considerar la física de la atmósfera, y las últimas técnicas usan un modelo de nubes y sondeos atmosféricos para ayudar en el análisis de las imágenes. Uno de los principales problemas consiste en detectar las zonas de cirrus altos, en las que puede no estar lloviendo. Los futuros satélites en órbita polar incluirán en sus sensores los datos de microondas que guardan una relación más

directa con la humedad de la atmósfera. Será una nueva información muy importante, pero se podrá disponer de las medidas sólo algunas veces al día para un lugar dado.

Se han desarrollado o se están desarrollando métodos para usar las imágenes de satélites para otros aspectos de los análisis hidrológicos. Se ha hecho un progreso importante en la clasificación del uso de las tierras. En la década de los noventa, productos derivados de los satélites, como el índice digital de vegetación normalizado (NDVI), serán estudiados para proporcionar claves para la evapotranspiración y el papel de la vegetación en el ciclo hidrológico.

*La información geográfica – un fundamento nuevo*

Uno de los pasos que más tiempo requiere en todos los proyectos hidrológicos es procurarse mapas para (a) hallar donde están las

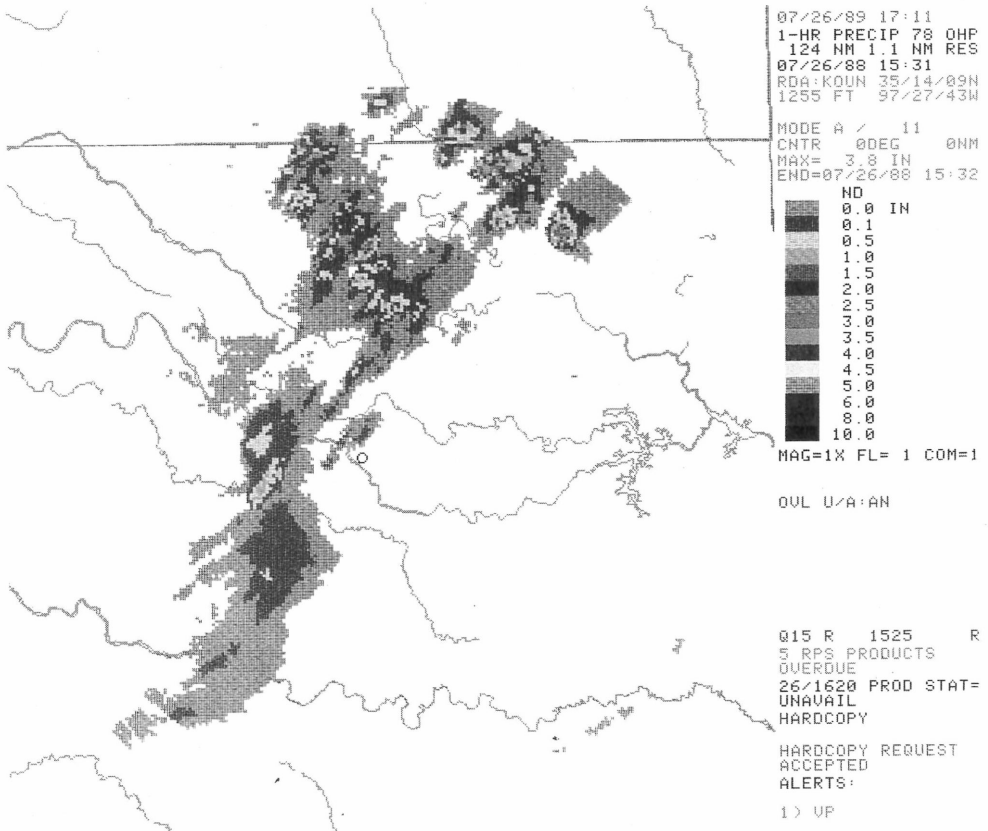


Figura 1 – Lluvia horaria estimada de la reflectividad del radar



Figura 2 – Estructura de drenaje obtenida por ordenador, para una cuenca (véase el texto)

corrientes, (b) localizar las estaciones pluviométricas, (c) dibujar los límites de las cuencas, trazando las divisorias de las vertientes, y (d) examinar los suelos, el uso de las tierras, etc. Pero, mientras prosiguen los estudios, sólo se dispone de medios rudimentarios para exponer los resultados. Este método es esencialmente manual; será pronto sustituido por un nuevo tipo de sistema de información con lo que se puede definir como una *interface* de usuario hidrogeográfico. Se emplearía una nueva generación de ordenadores personales en los que podrían emplazarse muchas de las fuentes de bases de datos.

La pieza más importante de la información geográfica para la hidrología es la situación de los límites de las cuencas. Este problema se está tratando actualmente por varios grupos en distintos países, con la idea de definir los límites de las cuencas de un modo automático a partir de datos geográficos digitales, tales como modelos digitales del terreno y localizaciones digitalizadas de corrientes. Se está desarrollando una tecnología para dividir cualquier cuenca fluvial grande en partes más pequeñas, geo-registradas y conectadas

hidrológicamente. Se puede deducir una importante información física, como las áreas de drenaje, la longitud de las corrientes, la pendiente y las líneas de flujo en la superficie del terreno.

La *figura 2* ofrece un ejemplo de esto para una cuenca de una superficie de 2435 km<sup>2</sup>, la Raystown Branch del río Juniata en Pennsylvania (EE.UU.). Se empleó un modelo digital del terreno relativamente basto (deducido de mapas a escala 1:500 000); el parámetro de la malla fue de 30 segundos de arco (aproximadamente un kilómetro) y el intervalo de resolución vertical fue de 10 metros. Los datos digitalizados del tramo de río (es decir, las coordenadas de los puntos a lo largo de las corrientes principales) se emplearon para definir la trayectoria del drenaje hacia la salida de la cuenca. El límite exterior de la cuenca se definió a partir de un archivo existente. Los datos del terreno se emplearon para estimar la estructura del drenaje en lugares conocidos del río. Esto puede entonces emplearse para subdividir el área principal en subáreas o definir el drenaje de los límites de la cuenca para cualquier punto a lo largo de la estructura de drenaje de la cuenca principal.

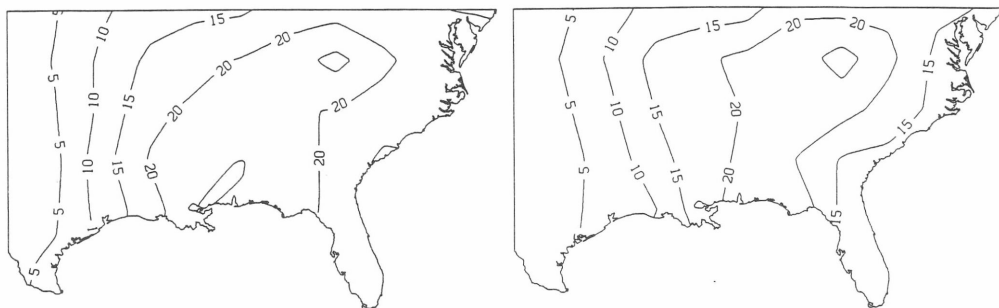


Figura 3 – Escorrentía media anual (en pulgadas) en el sudeste de los EE.UU.; estimada (izquierda) y observada (derecha)

### Los modelos con base física – avances de la ciencia

Los modelos digitales del terreno, de muy alta resolución, junto con los datos del suelo, la información geológica y los datos medidos a distancia, permitirán nuevos y excitantes estudios de los balances básicos hidrológicos del agua. Esto conducirá a una nueva generación de modelos de distribución con base física. Ya existen los primeros de esta clase, en forma de modelos de puntos de rejilla, en los que los procesos hidrológicos se modelan en una red con rejillas interconectadas o en un sistema de segmentos de área geo-registrados e hidrológicamente conectados. En los años noventa, nuevas investigaciones científicas conducirán a una mejor comprensión física de cómo se producen localmente la infiltración, la escorrentía de filtración y los procesos de evapotranspiración y se describen mejor matemáticamente a diferentes escalas de agregación. Todo esto llevará a una nueva generación de modelos hidrológicos a meso y macroescala para su uso en el control, la predicción y la simulación en hidrología operativa. Proporcionarán mejores estimaciones de las características de la escorrentía en regiones sin aforar. A su vez, serán usados para una nueva generación de modelos de predicción atmosférica mundial y regional y de simulación del clima.

Un riesgo que hay que evitar al desarrollar estos modelos de distribución con base física es la excesiva complejidad. Los modelos de los procesos hidrológicos heterogéneos pueden tener poco parecido en su forma matemática con los modelos detallados de los procesos físicos locales. Hay una tendencia natural en la

ciencia a responder a esta situación intentando tomar en consideración la heterogeneidad con más detalle que el que puede proporcionar la observación. El grado de complejidad necesario es un problema importante para el futuro.

Se puede ilustrar este punto al considerar cómo los procesos de escorrentía funcionan en promedio en la macroescala. En la figura 3 se comparan estimaciones de la escorrentía media anual en el cuadrante sudeste de los EE.UU. con los valores observados. Se empleó para hacer las estimaciones un sencillo modelo de balance hídrico mensual. Los cinco parámetros de este modelo se fijaron con valores constantes sobre toda la zona. Sorprende que las configuraciones de las isopletas sean tan concordantes, sugiriendo que las variaciones en los suelos y la vegetación de esta extensa región ocupan el segundo lugar en importancia de las variables climáticas para determinar la escorrentía.

Un análisis cuidadoso de la figura 3 muestra que hay también diferencias importantes para determinadas localidades entre los valores estimados y las observaciones. Su origen está en haber despreciado la consideración del suelo y la vegetación al hacer constantes los parámetros del modelo. Aunque se ha conseguido mucho en hidrología, no se sabe aún cómo los parámetros de los modelos hidrológicos más sencillos a meso o macroescala del balance hídrico en un área dependen del clima, del suelo y de la vegetación.

A principios de los noventa, será posible usar los actuales modelos sencillos del balance hídrico junto con la tecnología de los sistemas de información geográfica existentes para

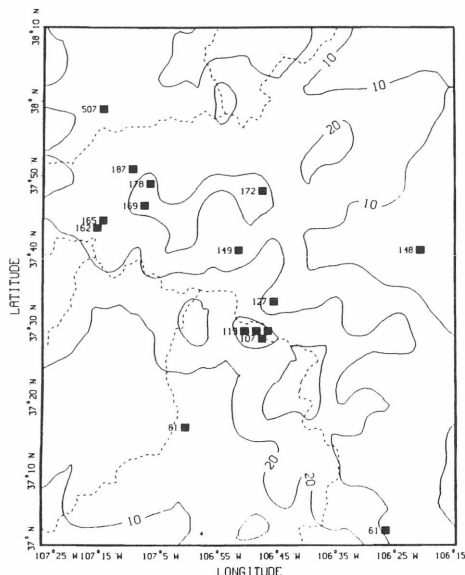
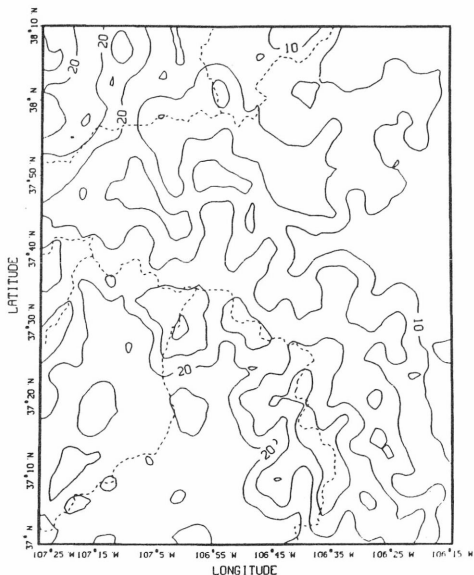


Figura 4 – Distribución de la precipitación para la estación invernal estimada: (izquierda) y calculada por datos de observación (derecha).

ayudar a desarrollar una climatología de la precipitación a escala mundial, usando datos históricos del caudal de la corriente. La mayor y única fuente de incertidumbre en el balance del calor latente de la atmósfera se refiere a la precipitación. Localmente, la precipitación es una fuente de calor latente, y la evaporación es un sumidero. Se necesita una mejor comprensión de los procesos de evapotranspiración, pero la incertidumbre en la precipitación también contribuye a la incertidumbre en la evaporación sobre los continentes, pues la fuente primaria de la evaporación es la precipitación. Los sistemas de asimilación de datos que se están desarrollando ahora para estimar la climatología de la precipitación mundial a partir de los datos disponibles de precipitación y los datos de infrarrojo de los satélites deben ampliarse para incluir los datos de caudales.

*La hidrometeorología – reforzando los lazos entre la hidrología y la meteorología*

Una de las consecuencias de disponer de una potencia barata de cálculo de alto rendimiento en las estaciones científicas de trabajo es que la incertidumbre de los episodios meteorológicos futuros puede ser tenida en cuenta de modo explícito. Por ejemplo, al

comienzo de una inundación frecuentemente no suele estar claro si una corriente quedará por debajo o rebasará el nivel de inundación. Luego, no suele estar claro hasta qué altura llegará la inundación. Hay distintos motivos para esta incertidumbre, siendo el principal la incertidumbre sobre las futuras precipitaciones. Idealmente, sería deseable para los predictores poder analizar la distribución de las posibilidades futuras, condicionados por lo que ya se conoce o se ha previsto. Típicamente, un análisis previsto se basa en lo que sucedería, si una cantidad de lluvia cayese uniformemente sobre la zona, pero esta supuesta distribución de la lluvia no tiene una relación física correcta cantidad-área-duración. Así pues, los resultados del análisis tienen un nivel de riesgo desigual que depende de la extensión y la configuración de la zona.

Un método mejor sería que el predictor pudiese controlar los parámetros de un generador de predicción estocástico que podría crear cualquier número de configuraciones de precipitación igualmente probables. Dicho de otro modo, el predictor podría predecir los parámetros de este generador de precipitación. La respuesta a cada configuración dentro de la cuenca se simularía individualmente, a partir de la actual situación hidrológica. Cada configuración produciría un efecto máximo en

diferentes partes de una cuenca de drenaje. El resultado sería una estimación mucho más precisa del riesgo de inundación en toda la cuenca. Este tipo de análisis tiene en cuenta implícitamente sucesos potenciales, como elevados niveles de inundación y elevados volúmenes de agua transferidos a los embalses. Se necesitarán muchos años de trabajo de desarrollo para este tipo de predicciones. Sin embargo, con un uso generalizado de las estimaciones de precipitación de los radares digitales, que pronto estarán disponibles, las predicciones podrán emplear análisis basados en configuraciones alternativas de las precipitaciones futuras.

Parece probable que dentro del próximo decenio los modelos hidrológicos operativos estarán relacionados con los modelos de predicción del tiempo locales y mundiales, ayudando a inicializar las condiciones de humedad del suelo de estos últimos. Esto requerirá una mejor asimilación de los datos de las observaciones de la precipitación en el suelo, las medidas de la escorrentía, las estimaciones de precipitación del radar y los datos medidos a distancia, como los del NDVI.

En las regiones montañosas serán posibles mejores análisis de la distribución espacial de la precipitación, mediante el uso de los campos de flujo de humedad y dirección del viento producidos por los modelos de predicción del tiempo, como entrada de los modelos de precipitación orográfica detallados, que tienen en cuenta la conservación de masas y la termodinámica en sistemas de rejilla de malla de 1 a 5 km. Un problema importante es, de nuevo, el grado de complejidad que hay que incluir en estos modelos. ¿Cuáles son los factores más importantes que rigen la precipitación orográfica?

Para ilustrar este punto, en la figura 4 se comparan las estimadas de la precipitación promedia anual de la estación invernal sobre 7700 km<sup>2</sup> del sudoeste de Colorado (EE.UU.), con estimaciones basadas en análisis de las precipitaciones observadas. Se muestra la localización de las estaciones de observación de más alta calidad (¡no hay muchas!). Las líneas a trazos señalan los límites de la cuenca. El modelo de precipitación orográfica era uno muy sencillo que consideraba sólo la humedad integrada verticalmente. Tenía en cuenta la

condensación, la evaporación y el movimiento vertical del agua condensada (o sea, la precipitación). Harían falta más detalles físicos en el modelo para explicar las notables diferencias entre las medidas locales y lo que se había previsto. Pero la figura muestra que gran parte de la variabilidad espacial de la lluvia orográfica puede estimarse a partir de modelos muy sencillos.

Una complicación importante del trabajo hecho para obtener la figura 4 consiste en que el balance hídrico de las áreas sujetas a lluvia orográfica sólo se puede evaluar si se ha estimado la variabilidad espacial de la precipitación. Se debe hacer el análisis con base diaria, mensual o anual, dependiendo de la escala cronológica del modelo de balance hídrico. Aparte de áreas limitadas para estudios especiales, este tipo de análisis nunca se ha hecho en ninguna parte del mundo. Así pues, se sabe muy poco sobre el balance hídrico de las regiones montañosas.

Otra complicación es que los modelos atmosféricos mundiales (incluyendo los modelos regionales anidados) necesitarán parametrizaciones especiales en cada uno de los puntos de rejilla para representar la lluvia orográfica en la proximidad de ese punto. El problema es que la precipitación orográfica tiene su origen en las variaciones del terreno en un radio de unos 30 km. No es la elevación absoluta de una zona lo que origina la precipitación, y las diferencias de elevación a distancias de 50 km o más tienen menos importancia que a distancias menores.

#### *Los recursos hídricos – mejorando en el caos*

En muchas partes del mundo, los mejores lugares para embalses ya se han usado. Muchos de ellos se proyectaron antes de que se tuviera en cuenta los valores importantes del medio ambiente. Ahora tenemos la nueva preocupación de que el clima pueda cambiar. Todos estos factores sugieren que el próximo decenio sea una época en que se preste mucha más atención a mejorar el funcionamiento de los proyectos de recursos hídricos existentes. Probablemente se prestará renovada atención, a las posibilidades de realizar nuevos proyectos.

En cierto sentido, los embalses del mundo



son sus mayores casinos, y el trabajo de los hidrólogos y los meteorólogos trabajando juntos consiste en conseguir que el dueño del casino (la población del mundo) siga estando del lado del ganador. Las diferencias entre ganadores y perdedores no son grandes. Una explotación mejor de los proyectos de recursos hídricos requerirá una estimación objetiva de la incertidumbre en los caudales de aporte al embalse, a largo plazo, y de los caudales tributarios río abajo. Una mejor estrategia de gestión tendrá en cuenta no sólo el espacio físico de los embalses, sino también el espacio asociado con déficits de humedad del suelo y aguas subterráneas, corriente arriba y corriente abajo. La gestión tenderá a fundarse en un análisis más sistemático del riesgo, incluyendo una estimación de la incertidumbre en las predicciones meteorológicas o climáticas a largo plazo. Esto no es nuevo para los meteorólogos, que hace ya mucho que han entendido la incertidumbre de sus predicciones. La información sobre la incertidumbre llevará, esperamos, a unas decisiones más prudentes sobre los recursos hídricos.

#### *Conclusiones y la importancia de la cooperación internacional – nuevas perspectivas para el planeta Tierra*

Quizás la conclusión más destacada sea la importancia de una nueva colaboración entre meteorólogos e hidrólogos en todo el mundo, con objeto de conseguir una mejor comprensión de los procesos hidrológicos

sobre los continentes. Se han citado ejemplos de cómo los ordenadores, los sistemas de datos, la información geográfica y los modelos de distribución con base física pueden proporcionar avances a la hidrología. Se ha tratado de unas nuevas directrices para la predicción de la precipitación y el análisis de la lluvia orográfica, y ésto hará necesaria una labor de equipo entre meteorólogos e hidrólogos. Cada cual puede dar mucho y ganar todavía más.

Un catalizador potencial para esta colaboración es el Experimento Mundial de la Energía y del Ciclo del Agua (GEWEX) (*Boletín de la OMM* 37 (3) pp. 176 a 181). Esta es una oportunidad para que los meteorólogos y los hidrólogos reconsideren importantes cuestiones científicas relativas al transporte de humedad y energía en la atmósfera. Se motiva a los hidrólogos para hallar soluciones prácticas para mejorar los modelos climáticos y pueden aportar una valiosa fuente nueva de información –los datos de escorrentía– que se pueden usar juntamente con los modelos hidrológicos para reducir la mayor fuente de incertidumbre en el flujo de calor latente continental, a saber, la precipitación y su efecto limitador en la evaporación sobre los continentes. Además, los modelos hidrológicos a meso y macroescala pueden ser útiles para el modelado de la humedad del suelo y la estimación de la evapotranspiración.

## HACIA UNA HIDROLOGIA OPERATIVA DEL MEDIO AMBIENTE

Por Ö. STAROSOLSZKY\*

Hace algunos decenios, la hidrología operativa trataba principalmente de los parámetros característicos de la cantidad de agua (por ejemplo el nivel y el caudal), pero los progresos de los dos decenios últimos han ampliado su actividad a la calidad del agua y a sus

sedimentos en suspensión, como se deduce de las muestras de calidad del agua.

El reconocimiento de los problemas del medio ambiente ha producido respuestas adecuadas en ciertos Servicios Hidrológicos nacionales, principalmente en lo relativo al agua

\* Presidente de la Comisión de Hidrología