

El agua y el clima: temas, ejemplos y potencial en el contexto de la predicción hidrológica

por Ann Calver*

Introducción

La interacción entre la información y los análisis de naturaleza hidrológica y climatológica ofrece una capacidad de evaluar los regímenes terrestres esperados que aún se encuentra en proceso de desarrollo. Este artículo aborda los aspectos hidrológicos de este vínculo existente entre el agua y el clima. Toma en consideración las principales áreas de intercambio de información entre los dos dominios que mejoran las capacidades de cada uno de ellos. Posteriormente, analiza la capacidad de los análisis hidrológicos de cara a evaluar los impactos de las condiciones climáticas, describiendo algunos ejemplos concretos en contextos de crecidas y de recursos hidrológicos para ilustrar ambas posibilidades y las dificultades asociadas a estos análisis. El último apartado del artículo se refiere a los desafíos futuros que deberá afrontar este sector de la predicción dentro de la fase terrestre del ciclo hidrológico.

La utilización de modelizaciones y análisis hidrológicos para analizar los impactos climáticos no es en absoluto un campo de investigación nuevo, ni la necesidad de intercambio de datos entre las ciencias atmosféricas y de la Tierra supone un nuevo requisito. Sin embargo, sí que se da el caso de que actualmente existe un irresistible impulso en relación con estas actividades debido a la percepción de la mejora en el desarrollo técnico de las herramientas de predicción y, en muchas regiones



del mundo, de la mayor conciencia y preocupación acerca de posibles cambios provocados por el clima en los regímenes y en la disponibilidad de agua. Las consideraciones que se abordan en el artículo son importantes no solo a la luz de los cambios provocados por el hombre sobre el sistema climático, sino también de cara a la gestión del agua terrestre bajo las condiciones de ubicuidad de la variabilidad natural del sistema climático.

El tema del impacto climático sobre el dominio hidrológico constituye un sector de gran interés y es objeto de investigación y publicación, tanto por lo que se refiere a información de tipo general a escala mundial como en lo concerniente a multitud de artículos académicos que abordan puntos específicos de investigación. Como ejemplos de trabajos a gran escala, aunque de ningún modo los únicos, pueden citarse: Bates et al. (2008), *Dialogue on Water and Cli-*

mate (2003), European Commission (2005) y OMM (2009).

En este artículo, la referencia temporal empleada para definir el clima (al contrario que en la meteorología) se ha tomado mayor que el intervalo estacional, enfatizando sobre períodos de años y décadas: obviamente, este es el caso en el que los vínculos existentes entre los dominios atmosférico y de agua terrestre también mejoran las predicciones a más corto plazo, aunque se utilizan de una forma algo diferente. El término hidrología se utiliza en el sentido de abarcar la fase terrestre del ciclo hidrológico (natural y dirigido): la interacción del medio marino con el sistema climático se encuentra más allá del ámbito de alcance de este artículo, puesto que tal interacción está relacionada con la calidad, y no con la cantidad, de agua. El objetivo del artículo no es otro que el de estudiar la naturaleza y la dirección de algunos desarrollos técnicos, jun-

* Centro de ecología e hidrología, Wallingford, Oxon (Reino Unido)

to con sus posibilidades e inconvenientes, además de analizar algunas aplicaciones prácticas que abordan amplias facetas y acompañarlas con algunos comentarios acerca de los aspectos fundamentales de la investigación que son necesarios para afrontar el tema del suministro de una información adecuada.

Flujos de información entre los dominios del clima y del agua

Este apartado ofrece una visión general sucinta de los aspectos principales de la información que pueden beneficiar a profesionales e investigadores de la hidrología al recibirla de la comunidad climatológica, junto con la información que los hidrólogos pueden suministrar de forma provechosa para mejorar la ciencia climatológica. Es interesante mencionar que los intercambios de datos del campo de la hidrología hacia el de la climatología se utilizan, sobre todo, para mejorar la capacidad de modelización climática, mientras que el flujo de información del campo de la climatología hacia el de la hidrología, así como la mejora de la hidrología predictiva, también desempeñan un papel más directo en la política y en la gestión de la toma de decisiones, reflejando el alcance en la fase terrestre del ciclo hidrológico para llevar a cabo una acción de reducción del riesgo.

Los aspectos fundamentales de la información relacionada con el agua que benefician a los científicos climáticos son la configuración topográfica de la región correspondiente, incluyendo la de las principales masas de agua, el carácter del suelo y los tipos de acuíferos y sus distribuciones, y los usos y la gestión de la tierra, tanto urbana como rural. Los aspectos con un mayor nivel de dinamismo son los niveles de los ríos y de las masas de agua, así como los contenidos de agua tanto del suelo como de los acuíferos, junto con las temperaturas de la superficie, y el estado del crecimiento de la vegetación. La escala de suministro de información tiene que ser compatible con la resolución operativa de los modelos de circulación global (MCG) o modelos de circulación atmosférica general, habitualmente en torno a los 150-300 km, y con los modelos climáticos regionales (MCR) en ran-

gos de unos 25 a 50 km. La recuperación y el relleno de datos son temas de importancia, así como las transformaciones de escala. Cada vez se cuenta con más datos obtenidos por teledetección a fin de ofrecer una buena cobertura espacial, aunque a veces esta se basa en variables elegidas conforme a criterios más prácticos que ideales.

La Figura 1 muestra la interfaz atmósfera/superficie terrestre del modelo unificado del Servicio Meteorológico del Reino Unido (MetUM) (véase, por ejemplo, Cullen, 1993; Essery et al., 2003), en el que los vínculos y las realimentaciones a través de la frontera entre la atmósfera y la superficie terrestre aparecen resaltados. El MetUM ha sido diseñado para permitir configuraciones que puedan utilizarse en la predicción meteorológica y climática: por ejemplo, el modelo DePreSys se encarga de las predicciones decenales, el PRECIS funciona como un modelo climático regional, y el HadGEM como un modelo climático global capaz de emitir predicciones con un siglo de antelación. Las formulaciones del MetUM se emplean en algunos otros países además del Reino Unido, como Aus-

tralia, la República de Corea, la India, Noruega, Nueva Zelanda y Sudáfrica. Es importante destacar el hecho de que, aunque parte de la modelización hidrológica se lleva a cabo en el seno de sistemas asociados con modelos atmosféricos, podría decirse que una cantidad mucho mayor se desarrolla en modo no acoplado con controladores atmosféricos.

Los resultados más importantes de los modelos climáticos que pueden beneficiar a los hidrólogos se encuadran en los campos relativos a las precipitaciones y a las temperaturas, en un rango de escalas temporales y espaciales. Con una frecuente transformación adicional a escalas más precisas, esta información, combinada con otros datos regionales y/o de cuencas, facilitan la elaboración de análisis basados en parámetros estadísticos y/o físicos del sistema hidrológico. La disponibilidad de registros hidrológicos del pasado permite verificar los métodos y comprobar su rendimiento antes de proceder a su utilización en modo predictivo con futuros elementos modificadores del clima. Aunque a veces preocupa el hecho de que las condiciones futuras puedan encontrarse fuera del

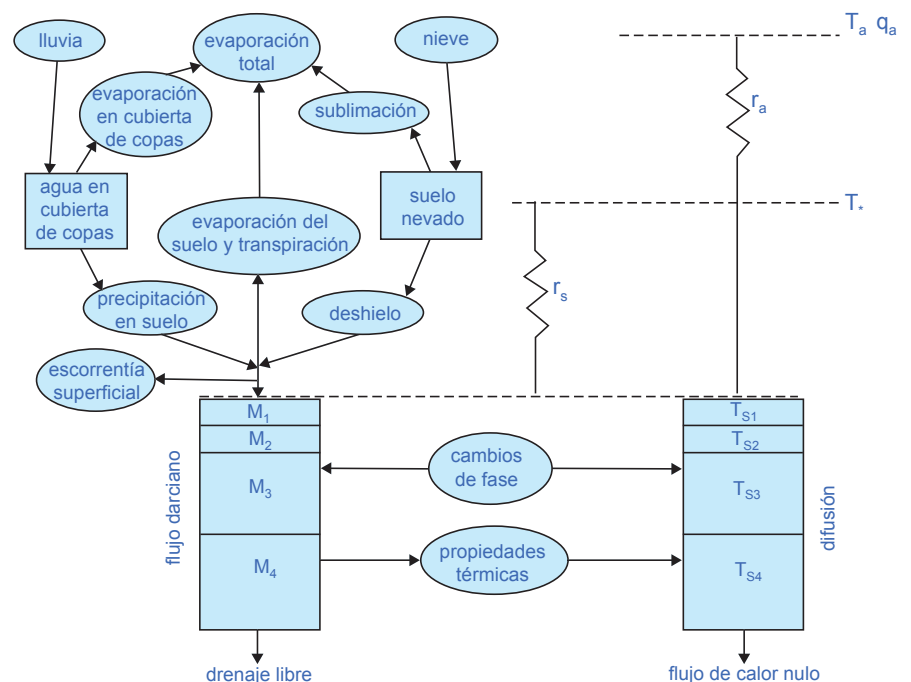


Figura 1 — Diagrama esquemático de la estructura de la interfaz atmósfera/superficie terrestre del modelo unificado del Servicio Meteorológico del Reino Unido. M_1, \dots, M_4 humedad del suelo en cada una de las cuatro capas del mismo; T_{s1}, \dots, T_{s4} temperatura del suelo en estas capas; r_s resistencia relativa a los estomas o superficial; r_a resistencia atmosférica; T_s temperatura de la superficie; T_a temperatura atmosférica, y q_a humedad específica de la atmósfera (diagrama reproducido con la autorización del Servicio Meteorológico del Reino Unido).

ámbito de las estudiadas en el pasado, someter a prueba a estas últimas supone un proceso que requiere cierta cautela, siempre y cuando sea viable.

Es evidente que contar con unas buenas predicciones de precipitación con arreglo a escalas temporales y espaciales es un requisito fundamental, al igual que en el caso de los campos de temperatura y viento, para determinar las condiciones de nieve y hielo, así como de evaporación. En lo que respecta a algunos riesgos, y en especial a las inundaciones, existe una apremiante necesidad de contar con extremos de pluviosidad fiables, incluyendo los correspondientes a episodios de corta duración: este es el caso en el que la cuantificación de frecuencias a largo plazo, así como en tiempo (casi) real de esas intensidades a corto plazo, puede ser de una importancia hidrológica vital. La magnitud y la dirección de cualquier tendencia climática representan indicadores muy valiosos, incluso cuando no sea posible realizar predicciones numéricas específicas: son especialmente valiosos si la causa de la tendencia es identificable de manera fiable. La incertidumbre científica existente en torno a las perspectivas climáticas está en proceso de cuantificación: su valor para el profesional constituye una expresión de la fiabilidad de estas perspectivas. Para llevar a cabo buenas perspectivas hidrológicas, es obvio que se requieren más datos que los relacionados exclusivamente con el clima, y en especial, más información medioambiental y datos procedentes del mundo de las ciencias sociales y económicas, incluyendo las posibilidades de adaptación. De este modo, a su vez, se allana el camino hacia la explotación no solo de la cantidad de agua que se comenta aquí, sino también de la calidad de la misma, de la calidad medioambiental y de los aspectos relacionados con la alimentación y la salud.

Análisis hidrológico de los efectos climáticos

El análisis hidrológico abarca muchos tipos de enfoques, que se derivan de un dominio plagado de procesos y de variabilidad espacial y temporal, de la gama de niveles

de datos disponibles, y de la variedad de requisitos que sirven como impulso para el análisis. El dominio hidrológico es un sistema altamente multivariante, en el que resulta complicado desentrañar los efectos independientes del clima y otros factores que afectan al régimen hidrológico terrestre. Aunque los procesos que tienen lugar en la atmósfera y en la superficie terrestre, si bien en diferentes grados, aparecen asociados en la modelización climática a escala global y regional, los detalles relativos a los regímenes hidrológicos, con frecuencia, son facilitados a través de modelos esencialmente hidrológicos, y en muchos casos de mejor manera, gobernados por series temporales de datos climáticos, sobre todo de precipitación y temperatura. Estos últimos modelos, en numerosas ocasiones, han desarrollado una madurez que puede aprovecharse en términos, por ejemplo, de formulaciones destinadas a detalles estructurales subregionales de captaciones, transferencias laterales de agua y respuesta rápida a la generación de inundaciones, acompañados de una representación de niveles de crecida. Resumiendo: para analizar los aspectos de la respuesta hidrológica ante los elementos que dan origen al comportamiento del clima existen multitud de metodologías que no tienen por qué estar estrechamente asociadas con sistemas de modelos climáticos. Hay un amplio abanico de modelos genéricos disponibles, algunos de

ellos introducidos en paquetes de software, y con una gran variedad de niveles de acceso a códigos. Los métodos varían desde las formulaciones simples basadas en parámetros dispersos hasta los sistemas completamente asociados, relativos a la superficie y a las aguas subterráneas, basados en ecuaciones en derivadas parciales resueltas mediante esquemas numéricos, que ofrecen variabilidad espacial en tres dimensiones. Aunque resulta evidente que las formulaciones más detalladas ofrecen más variables hidrológicas y una mayor definición espacial, debe hacerse hincapié en el hecho de que las representaciones complejas no son siempre las más adecuadas, especialmente cuando los datos se encuentran dispersos. Los análisis estadísticos de los datos hidrológicos complementan estos enfoques de modelización. Los futuros hidrológicos suelen evaluarse teniendo en cuenta las distribuciones de frecuencia previstas, relacionadas con períodos concretos, así como series temporales transitorias.

Después de haber llevado a cabo muchos trabajos encaminados a analizar los efectos de la variabilidad del clima y el cambio climático en relación con aspectos del entorno hidrológico, el hecho de elegir algunos ejemplos específicos para estudiarlos no resulta una tarea sencilla. Aunque se admite que las opiniones pueden ser completamente enfrentadas, en las siguientes líneas se comenta una se-

Figura 2 — Escenarios de futuros socioeconómicos, con los sistemas de gobierno representados en el eje vertical y los valores sociales señalados en el eje horizontal (figura reproducida con la autorización del informe del UK Floods Foresight (Evans et al., 2004)).



lección de algunos trabajos que abordan cuestiones relacionadas con el déficit de agua y el exceso de la misma, y que sirven para poner de manifiesto puntos de interés y relevancia más allá de la aplicación individual en términos de capacidades y deficiencias genéricas.

Riesgo de crecidas a gran escala

Entre 2002 y 2004, un conjunto de científicos pertenecientes al equipo de "Previsiones" del (entonces) Departamento de comercio e industria del Gobierno llevaron a cabo un trabajo de investigación acerca del riesgo de crecidas en el Reino Unido. Se centraron en particular en las condiciones probables que podrían tener lugar de acuerdo con las predicciones climáticas para el período de 2030 a 2100 con el fin de informar a los responsables de la elaboración de políticas. Los "escenarios futuros" socioeconómicos transversales en términos de gobierno (Department of Trade and Industry, 2002) que se muestran en la Figura 2 se tomaron de forma que representaran un resumen de la gama de posibilidades de desarrollo. Estas cuentan con un nivel adecuado de compatibilidad en las regiones más amplias (aunque podría decirse que el "desarrollo convencional" es menos transferible), abarcando el nivel de gobierno y el ámbito de los valores y aspiraciones sociales.

Cada uno de estos escenarios socioeconómicos estaba vinculado con un escenario climático probable (Hulme et al., 2002) en términos de escenarios de emisión de gases de efecto invernadero, a escala global, considerados compatibles con las características de desarrollo. Varios grupos de expertos han evaluado la escala estimada de los efectos de los agentes que condicionan el comportamiento del clima, junto con las demás influencias relativas al riesgo de crecidas que se encuentran implícitas en los escenarios de desarrollo (como, por ejemplo, la regulación medioambiental, los cambios en el nivel del mar, la urbanización, el desarrollo de infraestructuras, etc.). Los resultados se han tenido en cuenta, posteriormente, en una versión modificada (Hall et al., 2003) de un sistema informático ya existente, para determinar, a través de procedimientos hidráulicos e hidrológicos cuantitativos y de amplio alcance, las estimaciones

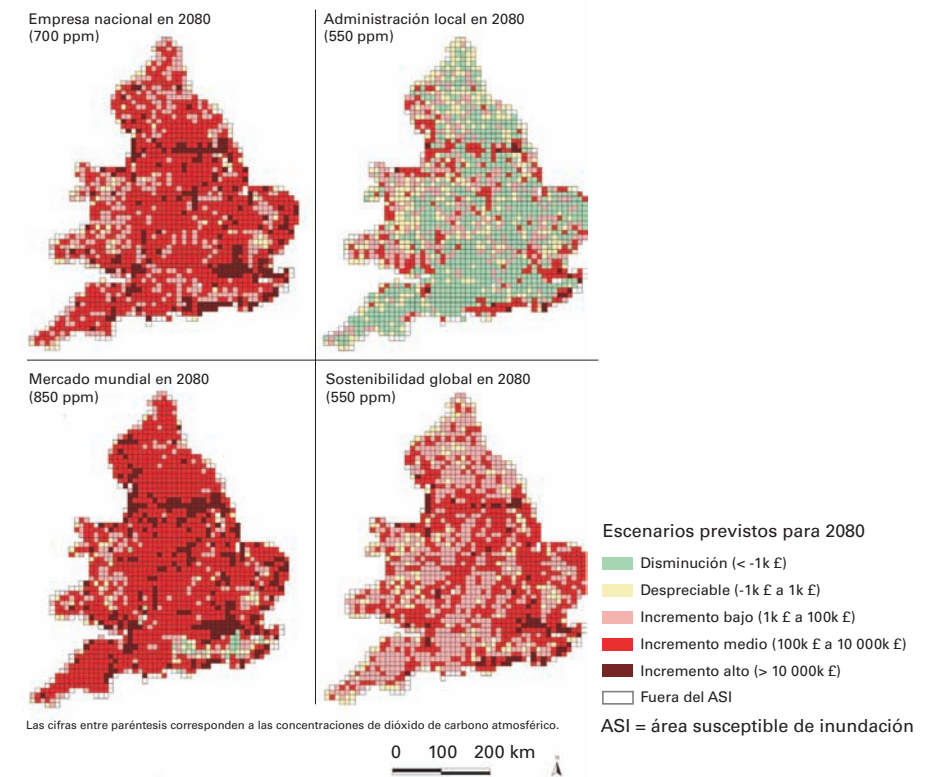


Figura 3— Variación de los costes medios anuales asociados a los daños por crecidas (en libras esterlinas por cuadrícula de $10 \times 10 \text{ km}^2$) en Inglaterra y Gales previstos para la década de 2080 según el proyecto UK Floods Foresight con arreglo a los cuatro escenarios de la Figura 2 (imagen reproducida con la autorización del informe del UK Floods Foresight (Evans et al., 2004)).

espaciales esperadas de inundaciones fluviales (una vez cada 100 años) y costeras (una vez cada 200 años), junto con las implicaciones de costes asociadas en términos sociales y de infraestructuras. En Evans et al. (2004) se pueden encontrar más detalles acerca de los métodos. La Figura 3 muestra algunos de los resultados obtenidos por este procedimiento en términos de daños anuales provocados por crecidas para la década de 2080 bajo los cuatro escenarios climáticos y socioeconómicos combinados. Algunos estudios numéricos adicionales condujeron a la introducción de medidas de mitigación para calibrar el efecto de las acciones encaminadas a reducir el riesgo de crecidas.

Este proyecto de previsión de crecidas fue influyente en el Reino Unido sin lugar a dudas de cara a establecer el perfil de la posible escala de los impactos climáticos, y ha generado interés, por ejemplo, en países como China, Estados Unidos, la India, Japón y los Países Bajos. Se trata, obviamente, de un enfoque a amplia escala, con ventajas e inconvenientes inherentes al mismo procedimiento. Las desventajas en cuestión giran en torno a la inevita-

ble necesidad de aproximación, que debería ser admitida por los científicos, aunque el grado con el que se manifiesta en los resúmenes de resultados es discutible. Algunos de estos puntos incluyen la creación de clasificaciones y multiplicadores por parte de grupos de expertos (los cuales, pese a ser probablemente el mejor enfoque que se puede adoptar, quizás no den resultados repetibles), la utilización de perspectivas climáticas a nivel global con escenarios de desarrollo local, y la estimación de la principal causa de inundación en vez de todas ellas. Las ventajas residen en el desarrollo de buenas estimaciones relativas a un amplio abanico de disciplinas, entre las que se incluyen la climatología y la hidrología, para así analizar futuros riesgos de crecida y sus posibilidades de gestionarlos.

Modelización de incertidumbres en las probabilidades de crecida

En contraste con el caso anterior de enfoque a gran escala de los riesgos de crecida en el contexto de un clima en cambio, el siguiente ejemplo

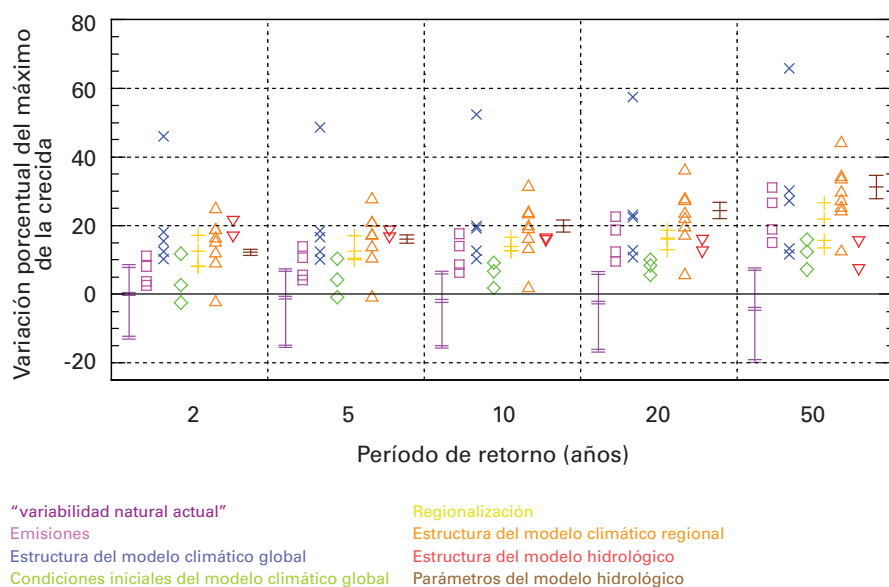


Figura 4 — Fuentes de incertidumbre, representadas en colores diferentes, en las relaciones de magnitud y frecuencia de las crecidas fluviales a partir de varias fuentes. La variación corresponde a la diferencia existente entre los datos de referencia del período 1985-2001 y los de 2071-2100. Los resultados se muestran para la cuenca del río Duddon, de 86 km², al noroeste de Inglaterra (crecida anual media de 120 m³/s). Los símbolos de la "variabilidad natural actual" indican la mediana y los límites superiores e inferiores al 90 por ciento (obtenidos a partir de nuevos muestreos) (fuente: Kay et al., 2009).

que se valora en este artículo es un enfoque detallado de modelización ante el riesgo de crecida fluvial, tratando concretamente de cuantificar los errores asociados con los aspectos de la evaluación. Cuando se utilizan las precipitaciones previstas por el modelo climático como dato de entrada en los sistemas de modelización hidrológica para predecir los regímenes de caudal de los ríos, los resultados pasan a incluir cierta dosis de incertidumbre procedente de diversas fuentes, entre las cuales pueden incluirse la estructura del modelo MCG empleado, los escenarios de emisiones, la estructura del MCR, la regionalización de los datos climáticos de entrada que gobiernan los modelos de escorrentía y la estructura de los modelos hidrológicos. La Figura 4 ofrece un ejemplo de la importancia relativa de estas fuentes de incertidumbre en el marco de un estudio llevado a cabo por Kay et al. (2009). El grueso de la figura consiste en una curva de frecuencia de crecidas, que en este caso relaciona la variación en la magnitud del caudal del río en el máximo de la crecida con su período de retorno medio. La variación se refiere a los caudales previstos para el período 2071 a 2100 en comparación con los registros del período de referencia (1985-2001) observados, debido a una serie de factores.

Se emplearon cinco MCG (HadCM3, CSIRO-Mk2, CGCM2, ECHAM4 y CCSR), junto con ocho MCR y dos modelos de cuenca hidrológica, un modelo conceptual basado en la dispersión de parámetros y un modelo de escorrentía y trazado basado en valores reticulares; la combinación precisa de modelos se detalla en Kay et al. (óp. cit.). La figura corresponde a una cuenca fluvial concreta del Reino Unido: se dispone de resultados similares para algunas otras cuencas del Reino Unido, y en lo que difieren es en el patrón de resultados. Una referencia métrica importante que hay que tener en cuenta es el índice de variación en la curva de frecuencia de crecidas que cabe esperarse a partir de la variabilidad climática "natural" sin tomar en consideración ninguna presión climática de origen antropogénico. La variabilidad "actual" en este trabajo se aproxima mediante el muestreo mensual reiterado de los datos de referencia: si se trata de un reflejo fidedigno de la extensión de la variabilidad en el clima mas allá de la producida como resultado de las emisiones es un tema que está sujeto a discusión.

Una de las conclusiones apuntadas en el trabajo sugiere que la incertidumbre derivada de los MCG es la mayor fuente de origen de incerti-

dumbre comprobada. Los resultados atípicos del modelo MCG (véase la Figura 4) corresponden al modelo CCSR, que es relativamente extremo en términos de las precipitaciones invernales previstas para el Reino Unido. En el trabajo se comentan incluso las limitaciones de una investigación muy detallada.

El enfoque utilizado en este ejemplo, es decir, el empleo de datos MCR sometidos a un proceso de regionalización para que gobiernen los modelos de cuenca hidrológica a fin de obtener series temporales de caudal a partir de las cuales se puedan establecer las mediciones relativas a crecidas futuras, es uno de los que el gobierno británico ha tomado como base para sus directrices de cara a establecer las asignaciones adecuadas para elaborar el diseño del esquema de gestión de crecidas teniendo en cuenta la variabilidad del clima (Department for Environment, Food and Rural Affairs, 2006; Department of Communities and Local Government, 2006). Los consejos se actualizan en la medida en que los escenarios climáticos evolucionan y los sistemas de modelos se desarrollan.

El trabajo que aparece en la Figura 4 forma parte de un conjunto de investigaciones que tratan de ofrecer una medida de confianza en torno a las mejores estimaciones posibles de los impactos de las crecidas a partir de los agentes que gobiernan el comportamiento del clima. De una forma similar, en cierto modo, a la presentación de los resultados de MCG en términos de convergencia de los signos de cambio entre los resultados de los diferentes modelos, Bell et al. (2009), por ejemplo, han estudiado si los diferentes resultados en términos de magnitud y frecuencia de las crecidas, con arreglo a distintas perspectivas climáticas para regiones del Reino Unido, muestran convergencia en lo que se refiere a signos que revelen la dirección del cambio del caudal máximo de la crecida de acuerdo con un rango de intervalos de recurrencia, o si, por el contrario, no muestran esa convergencia. Esto representa un movimiento de bienvenida hacia la definición de la solidez de las perspectivas hidrológicas, y también un avance que pone de relieve los resultados en términos probabilísticos provenientes de conjuntos (parciales). Hasta un país relativamente peque-

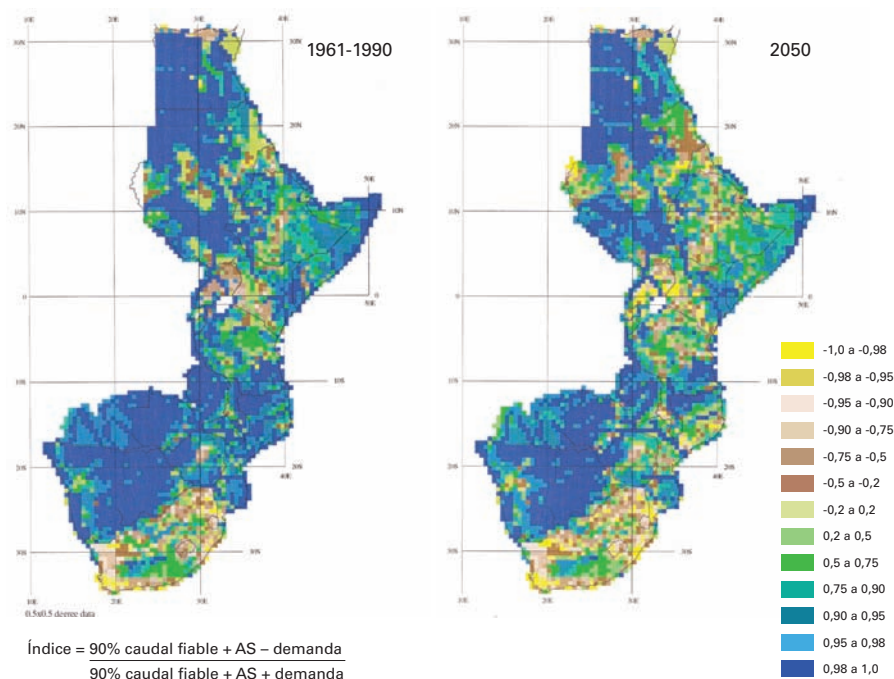


Figura 5 — Diferencias estimadas en la combinación de disponibilidades de agua en superficie y subterránea (AS) entre el período 1961-1990 y 2050 según una perspectiva de cambio climático acompañada de una elevada demanda de agua: el estrés hídrico se indica mediante valores negativos (fuente: Meigh et al., 1998).

ño como el Reino Unido y, que es también relativamente rico en lo que a datos se refiere, el patrón, incluso el referido a la dirección del cambio en el intervalo de recurrencia de crecidas en 50 años, se percibe como complejo y acompañado de importantes márgenes de error. Estos enfoques se encuentran en una interesante fase de exploración más que en un estado maduro de aplicación práctica. La evaluación de enfoques relativamente exhaustivos como este con respecto al impacto hidrológico provocado por el clima pone de manifiesto el amplio abanico de componentes que pueden tomarse en consideración, la variabilidad producida como consecuencia de ellos y la opinión informada que debe emitirse para proceder a utilizar esta información en la elaboración de políticas y en la gestión relacionadas con el riesgo derivado de las crecidas.

Demanda de agua y recursos hidrológicos

El último ejemplo de esta sección pasa de la consideración de los efectos climáticos relacionados con las inundaciones a una investigación de los impactos sobre los recursos hidrológicos, estudiando de nuevo un ejemplo de investigación a la

luz de lecciones más generales que pueden elaborarse en relación con las ventajas y desventajas de técnicas concretas. La Figura 5 muestra un análisis de la disponibilidad de agua de acuerdo con un escenario de cambio climático y de demanda en las zonas oriental y meridional de África, que se extienden por una región de 12,8 millones de kilómetros cuadrados y una población de más de 300 millones de personas. Se intentó llevar a cabo un enfoque coherente y realista aplicado a 20 países, con el fin de abarcar las variaciones espaciales y temporales en la disponibilidad y demanda de agua, contando con el impulso de los objetivos del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente y de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.

La metodología empleada (Meigh et al., 1999) se basa en la estimación de los caudales de agua en superficie, el rendimiento de las aguas subterráneas y la demanda de agua, en una rejilla de 0,5 por 0,5 grados de latitud y longitud, utilizando estimaciones numéricas interconectadas y modelos conceptuales, cuyos parámetros se obtienen a partir de datos con disponibilidad a gran escala como son la cobertura terrestre, el tipo de suelo, el tipo de acuífero,

la población y las distribuciones de ganado. Se incorporaron algunos datos de relleno y ciertos sistemas asociados a submodelos: los componentes del modelo hidrológico se compararon frente a los datos del período 1961-1990. Se tuvieron en cuenta las perspectivas climáticas mensuales hasta 2050 (Hulme, 1996) así como los escenarios de demanda hidrológica de cara a las poblaciones urbanas y rurales, y también para el desarrollo agrícola e industrial. Los detalles de los resultados aparecen en Meigh et al. (óp. cit.). A modo de resumen cabe mencionar que el incremento de la población y la tendencia hacia unos modos de vida cada vez mejores sugirieron la posibilidad de que podría elevarse de manera notable la proporción de países afectados por la escasez de agua y, en este ejemplo, con Sudán, Eritrea y Mozambique en situación especialmente comprometida por lo que a riesgo se refiere como consecuencia de los cambios en la disponibilidad de agua, y algunas partes de Sudáfrica y las regiones colindantes con el lago Victoria, donde se ha previsto que se producirá un agravamiento de los problemas ya existentes.

El sistema semidistribuido de modelización de recursos hidrológicos, con sus posteriores mejoras, se ha utilizado en la zona occidental de África, en la cuenca del mar Caspio, en la región del Himalaya comprendida por el sistema fluvial de los ríos Ganges y Brahmaputra, y en el continente sudamericano. Las ventajas de este tipo de enfoque se encuentran en el diseño de una aplicación distribuida de forma espacial, a la luz de unas condiciones con una gran dispersión de datos y ante la necesidad de utilizar variables sustitutivas eficaces para abordar el proceso. Así, la utilización de este tipo de métodos podría considerarse más adecuada de cara al análisis de tendencias y a la elaboración de planificaciones a escala regional, en vez de para calcular los aspectos específicos de las demandas locales.

La sección final del presente artículo esboza los desafíos a los que aún hay que hacer frente, más allá de la información y del entendimiento indudables que algunos estudios, como los de los ejemplos descritos en este documento, ya han proporcionado a las comunidades tanto hidrológicas como de un carácter más general.



Desafíos por afrontar

En la introducción de este artículo se hizo hincapié en el hecho de que la planificación y gestión eficaces del dominio hidrológico son fundamentales si el clima varía de forma natural y/o antropogénica. Algunos estudios muy recientes se han centrado en posibles cambios futuros en las temperaturas y precipitaciones como consecuencia de la modificación antropogénica del clima, aunque en muchas regiones del mundo el clima actual presenta importantes problemas de gestión del agua en términos de déficit y/o exceso de la misma, sobre todo en los lugares donde la variabilidad natural es grande. Se ha comentado que, en bastantes regiones, es posible que los problemas relativos fundamentalmente a la variabilidad climática dominen sobre los relacionados con el cambio climático durante un período considerable de tiempo. Por lo que respecta al cambio climático antropogénico, es importante señalar que, en alrededor de un tercio del planeta (Bates et al., 2008), la dirección esperada del cambio en los índices de precipitaciones correspondientes al período 2090-2099 en comparación con los del período 1980-1990 es, según el escenario de emisiones SRES A1B (que representa un rápido crecimiento económico, con convergencia regional y equilibrio de las fuentes de energía), indeterminada a partir de las proyecciones realizadas con múltiples MCG.

Frente a esta cuestión de fondo, la parte final de este artículo analiza

brevemente los desafíos de investigación que nos esperan. Sería muy ventajoso tener la posibilidad de cuantificar la variabilidad natural del clima, o sea, el nivel de referencia contra el que actúan los efectos provocados por el hombre. En general, sería bueno saber dónde aparece la mayor sensibilidad en las predicciones, y también sería muy útil cuantificar, tal y como lo hacen cada vez más muchos de los trabajos que se llevan a cabo, las incertidumbres atribuibles a las diversas fuentes en las proyecciones del futuro climático e hidrológico. Es importante destacar que sería conveniente, aunque sin duda muy laborioso, llegar a distinguir, en la reacción hidrológica particularmente multivariante, los efectos por separado sobre los regímenes hídricos de los factores que van más allá de los climáticos, especialmente los derivados de la utilización del terreno y de las prácticas de gestión del agua superficial y subterránea, así como sus regímenes, no menos importantes, puesto que muchas medidas de adaptación pueden alcanzarse más fácilmente a través de estos caminos.

Con el fin de llevar a cabo algunas de las aspiraciones comentadas en estas líneas, los métodos de transferencia de la información climática e hidrológica entre escalas temporales y espaciales, aunque siguen considerándose como aspectos activos de investigación en términos de procedimientos basados en parámetros físicos y estadísticos (véase, por ejemplo, Fowler et al., 2007), siguen constituyendo un área con margen de mejora de cara a registrar los

efectos de los procesos físicos, tanto atmosféricos como terrestres. Sin embargo, se ha subrayado el hecho de que, por ejemplo, incluso un buen proceso de regionalización efectuado a partir de un modelo a gran escala que es en sí mismo impreciso y/o incompleto dará como resultado datos de un mejor fraccionamiento, aunque de dudosa calidad y relevancia. Sigue existiendo la imperiosa necesidad, especialmente para cuantificar el riesgo de crecidas, de contar con estimaciones más fiables acerca de las precipitaciones extremas, particularmente en fraccionamientos temporales más precisos.

Los productos obtenidos a partir de modelos climáticos destinados al campo de la hidrología y, desde luego, los productos de naturaleza hidrológica destinados a los usuarios, cada vez se suministran más en forma de conjuntos y deberían venir acompañados de alguna medida relativa a su fiabilidad. La investigación también puede dirigirse de forma muy provechosa hacia un mayor grado de coherencia espacial en las estimaciones de los cambios en el régimen hidrológico, en contraposición a las selecciones de estimaciones (ampliamente independientes) puntuales (o reticulares) trazadas en un sentido espacial. Este proceso resulta valioso a la hora de abordar las medidas de adaptación y, al igual que ocurre con otros aspectos de la investigación, debería abarcar procedimientos tanto para áreas de disponibilidad de datos reducida como elevada.

Anteriormente se hizo referencia a la naturaleza multivariante del sistema hidrológico: sería importante incluir en los métodos y modelos hidrológicos una representación dinámica adecuada del dominio en función de las características (más allá de los contenidos y caudales de agua) que pudiera responder a los cambios en el clima incluyendo el uso del terreno, las prácticas de gestión del agua y las características del desarrollo socioeconómico y de infraestructuras. Esta incorporación de los grados de respuesta ante el cambio climático allana el camino para una evaluación más realista de las opciones de adaptación. Las expresiones de riesgo fácilmente comprensibles deberían acompañar a estos estudios pasajeros de los escenarios hidrológicos.

Desde una perspectiva de política y gestión hidrológica, el futuro en los campos de la hidrología y la climatología estará mejor acompañado por estimaciones fiables y/o directrices para la gestión a la luz de las incertidumbres. También podría resultar rentable enfocar el problema valorando qué políticas y acciones relacionadas con el agua, en el marco de las condiciones económicas y políticas, pueden introducirse más fácilmente para abordar las necesidades actuales mientras se comprueban los procesos de gestión hidrológica de cara al futuro. Wilby (2008), por ejemplo, promueve soluciones de “poco remordimiento”, que mantienen abiertas las opciones de adaptación en el futuro. Los escenarios climáticos e hidrológicos obtenidos pueden servir de banco de pruebas para verificar las intervenciones propuestas en lugar de presentarlos fundamentalmente de cara a la obtención de respuestas.

Estos tipos de investigación y de formas de actuación se benefician claramente del esfuerzo de la colaboración y del proceso de intercambio de información entre las comunidades científicas y nacionales. El hecho de dilucidar las influencias independientes y variadas relativas al comportamiento del ciclo hidrológico, ofrece un gran potencial —aunque desafiante— para evaluar los riesgos asociados a los cambios hidrológicos y a sus patrones a lo largo del espacio y del tiempo, así como la oportunidad de analizar las opciones de adaptación a fin de contar con unos regímenes hidrológicos seguros dentro de unas condiciones climáticas en proceso de evolución.

Referencias

- BATES, B.C., Z.W. KUNDZEWICZ, S.WU and J.P. PALUTIKOF (eds.), 2008: Climate change and water. Technical paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC Secretariat, Geneva, 210 pp.
- BELL, V.A., A.L. KAY, R.G. JONES, R.J. MOORE and N.S. REYNARD, 2009: Use of soil data in a grid-based hydrological model to estimate spatial variation in changing flood risk across the UK. *Journal of Hydrology* (en imprenta).
- CULLEN, M.J.P., 1993: The Unified Forecast/Climate Model. *Meteorological Magazine*, 122, 81-94.
- Department of Communities and Local Government, 2006: Planning Policy Statement 25: *Development and Flood Risk*. Stationery Office, London.
- Department for Environment, Food and Rural Affairs, 2006: Flood and Coastal Defence Appraisal Guidance FCDPAG3 Economic Appraisal. Supplementary Note to Operating Authorities: Climate Change Impacts. London, 9 pp.
- Department of Trade and Industry, 2002: *Foresight futures 2020: revised scenarios and guidance*. HMSO, London, 32 pp.
- Dialogue on Water and Climate, 2003: Climate changes the water rules: how water managers can cope with today's climate variability and tomorrow's climate change. Ed B. Appleton. *Dialogue on Water and Climate*, Netherlands, 105 pp.
- ESSERY, R.L.H., M.J. BEST, R.A. BETTS, P.M. COX and C.M. TAYLOR, 2003: Explicit representation of subgrid heterogeneity in a GCM land surface scheme. *Journal of Hydrometeorology*, 4, 530-543.
- European Commission Joint Research Centre, 2005: *Climate change and the European water dimension: a report to the European Water Directors*. (S.J. Eisenreich (ed.)), EU Report No. 21553, 253 pp.
- EVANS, E., R. ASHLEY, J. HALL, E. PENNING-ROUSELL, A. SAUL, P. SAYERS, C. THORNE and A. WATKINSON, 2004: *Foresight: Future flooding*. Scientific summary, Volume I: Future risks and their drivers, 366 pp; Volume II: Managing future risks. Office of Science and Technology, London, 417 pp.
- FOWLER, H.J., S. BLENKINSOP and C. TEBALDI, 2007: Linking climate change modelling to impacts studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling. *International Journal of Climatology*, 27, 1547-1578.
- HALL, J.W., R.J. DAWSON, P.B. SAYERS, C. ROSU, J.B. CHATTERTON and R.A. DEAKIN, 2003: Methodology for national-scale flood risk assessment. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: *Water, Maritime and Energy*, 156, 235-247.
- HULME, M. (Ed.), 1996: *Climate change and southern Africa: an exploration of some potential impacts and implications in the SADC region*. Climatic Research Unit, University of East Anglia, Norwich, United Kingdom.
- HULME, M., G.J. JENKINS, X. LU, J.R. TURNPENNY, T.D. MITCHELL, R.G. JONER, J. LOWE, J.M. MURPHY, D. HASSELL, P. BOORMAN, R. McDONALD and S. HILL, 2002: *Climate change scenarios of the United Kingdom: the UKCIP02 Scientific report*. Tyndall Centre for Climate Change Research, University of East Anglia, Norwich, United Kingdom, 120 pp.
- KAY, A.L., H.N. DAVIES, V.A. BELL and R.G. JONES, 2009: Comparison of uncertainty sources for climate change impacts: flood frequency in England. *Climatic Change*, 92, 41-64.
- MEIGH, J.R., A.A. MCKENZIE, B.N. AUSTIN, R.B. BRADFORD and N.S. REYNARD, 1998: *Assessment of global water resources—Phase II: estimates of present and future water availability for eastern and southern Africa*. Institute of Hydrology report to Department for International Development, Wallingford, 55 pp.
- MEIGH, J.R., A.A. MCKENZIE and K.J. SENE, 1999: A grid-based approach to water scarcity estimates for eastern and southern Africa. *Water Resources Management*, 13, 85-115.
- WILBY, R.L., 2008: Dealing with uncertainties of future climate: the special challenge of semi-arid regions. Proceedings of the WaterTribune. *Climate change and water extremes*. Expo Zaragoza, Spain.
- WMO [OMM], 2009 (en preparación): Challenges and opportunities in research to enable improved products and new services in weather, climate and environment. Report of the Executive Council Task Team on research aspects of enhanced climate, weather, water and environmental prediction framework.