

# LA ATENUACIÓN DEL IMPACTO SOBRE LOS RECURSOS HIDRÁULICOS DEL CALENTAMIENTO GLOBAL

(cambio climático/recursos hidráulicos/uso conjunto/modelos gestión)

ANDRÉS SAHUQUILLO HERRÁIZ \*

\* Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Politécnica de Valencia. asahuq@hma.upv.es.

## RESUMEN

La emisión de gases de efecto invernadero está produciendo cambios importantes en la distribución de la temperatura y precipitación que han modificado la disponibilidad de recursos hidráulicos, y ocasionando un aumento de las sequías e inundaciones en todo el mundo y también en España. Las previsiones de cambio se han basado en modelos de circulación global de la atmósfera y océanos, teniendo en cuenta sus interacciones mutuas y con la superficie de la tierra a los que hay que aplicar técnicas de escalado y modelos hidrológicos que proporcionen series hidrológicas de caudales superficiales y recargas de acuíferos con una incertidumbre elevada. Las incertidumbres sobre la precipitación son mayores que sobre la temperatura, y aún mayores sobre las aportaciones de los ríos o sobre la recarga de los acuíferos. En cualquier caso las opciones de *adaptación* siempre serán necesarias y desde luego tienen que ser complementarias de las de *mitigación*. Se analizan las posibilidades de adaptación que consisten en mejoras de la gestión de los recursos hídricos a través de la gestión de la demanda, la utilización conjunta de aguas superficiales y subterráneas, la reutilización, mejoras en el ahorro y eficiencia del agua, y cambios en la asignación del agua (mercados de agua). En California se ha simulado la adaptación con el modelo hidro-económico CALVIN desarrollado en la Universidad de California, demostrando que con costes aceptables se puede hacer frente a los cambios simulados. En España se ha desarrollado un MSD AQUATOOL por la Universidad Politécnica de Valencia que simula conjuntamente el sistema superficial y los acuíferos distribuidos de forma explícita y

directa con el Método de los Autovalores. Se propone adaptar este método en CALVIN, añadiendo la ventaja de simular los acuíferos distribuidos de forma explícita a la ventaja de la optimización económica que aporta CALVIN.

## ABSTRACT

Increasing amounts of greenhouse gases have produced important changes in temperature and precipitation affecting water resources, increasing droughts and floods, decreasing runoff and aquifer recharge and decreasing water supply. Precipitation and aquifer recharge time series obtained from GCM in coarse grids must be downscaled to obtain downscaled hydrologic time series of river runoff and aquifer recharge. Uncertainties on precipitation are higher than on temperature and higher again on river runoff and on aquifer recharge. Adaptation tools which can limit vulnerability to changing conditions can be obtained using underground storage, water transfers, conservation, recycling, desalination and water banking to expand their capacity to meet changing demands. In California adaptation has been explored and evaluated using the hydro economic model CALVIN developed by the University of California Davis. In Spain the SDS model AQUATOOL developed by the Polytechnic University of Valencia takes the advantage of simulating jointly distributed aquifers with the *Eigenvalue Method* and surface system, and their interactions, in an explicit and straightforward way. Coupling the Eigenvalue Method to Calvin both advantages, of jointly and explicit simulation of dis-

tributed aquifers and the economic optimization could be obtained.

**Key words.-** Climate change, water resources, conjunctive use, management models

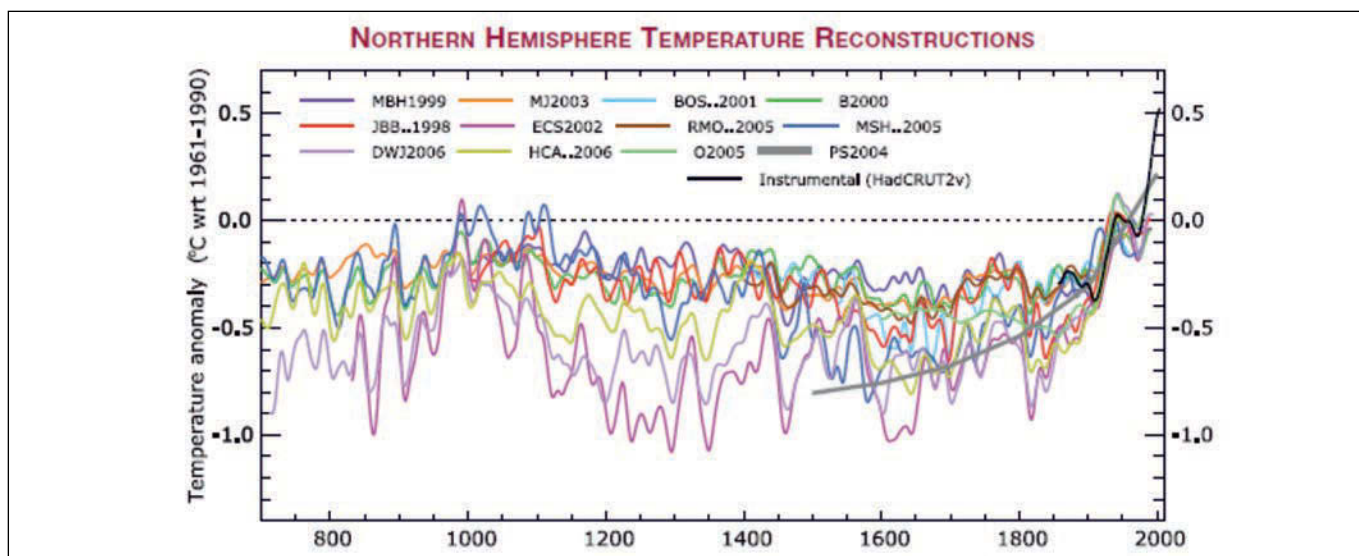
## INTRODUCCIÓN

Desde la mitad del siglo pasado se vienen observando aumentos generalizados de la temperatura en la atmosfera, superficie de la tierra y los océanos que han generado una preocupación creciente en sociólogos, economistas, políticos y científicos; preocupación que dio lugar a la creación por las Naciones Unidas del IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) que junto con otros organismos de carácter nacional o internacional han desarrollado en los últimos años una cantidad abrumadora de investigaciones y trabajos relacionados con el cambio climático. Esta inquietud se ha acrecentado por las previsiones de que el calentamiento global continúe durante este siglo y por los pesimistas augurios alentados por científicos y ambientalistas y aireados por los medios de comunicación.

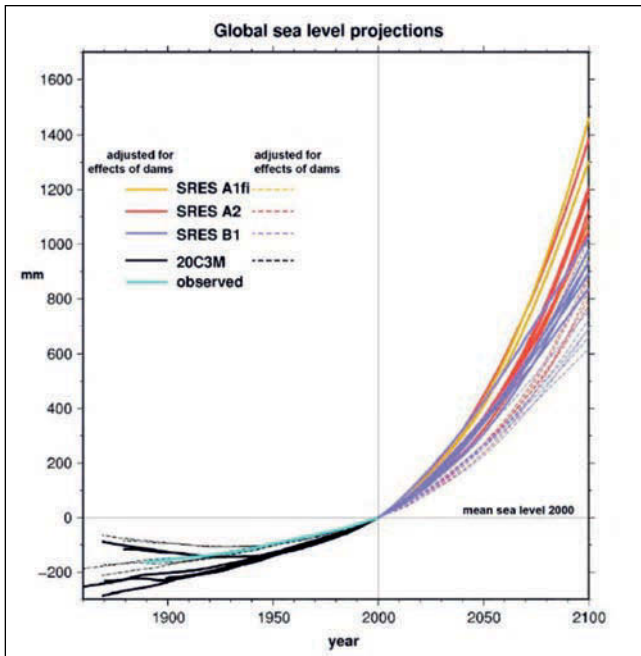
Las observaciones científicas indican que el cambio climático ha ocurrido en el pasado, está cam-

biando, y cambiará en el futuro debido a los efectos producidos por las actividades humanas; aunque la magnitud y características del cambio no han sido iguales en cualquier lugar de la tierra. Basándose en los datos proporcionados por el análisis de anillos de los árboles, sedimentos, polen, isótopos en el hielo polar, y otras observaciones científicas en todo el mundo, se puede afirmar que la temperatura media de la tierra es ahora mayor que la que ha habido en los últimos trece siglos. En los últimos cincuenta años el aumento de las temperaturas ha sido más intenso, especialmente en el Ártico.

Los procesos naturales que intervienen en la variabilidad climática no justifican los rápidos cambios ocurridos en el clima en las últimas décadas. Los únicos mecanismos con evidencias suficientes para hacerlo son los impactos humanos, que además juegan un papel creciente en el calentamiento global. Los cambios futuros pueden ser rápidos en comparación con los habidos históricamente. Las observaciones instrumentales en el océano, superficie terrestre y la atmosfera, las realizadas desde satélites; así como los datos históricos, los provenientes de periódicos y otros medios proporcionan informaciones valiosas sobre el clima en la actualidad y en el pasado. Las observaciones, experimentos y los desarrollos teóricos se utilizan para construir y refinar modelos matemáticos que simulan el clima y hacen predicciones sobre el



**Figura 1.** *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.



**Figura 2.** Proyección de la subida del nivel marino para varias predicciones y modelos. (Cayan 2008)

futuro. Los resultados de estos modelos mejoran el conocimiento del clima, el de las relaciones entre sus componentes: tierra, océano y atmósfera, e inspiran nuevas observaciones y experimentos. Aun cuando estos modelos presentan incertidumbres importantes es de esperar que con el tiempo sean capaces de hacer predicciones más fiables, (CCSP 2008).

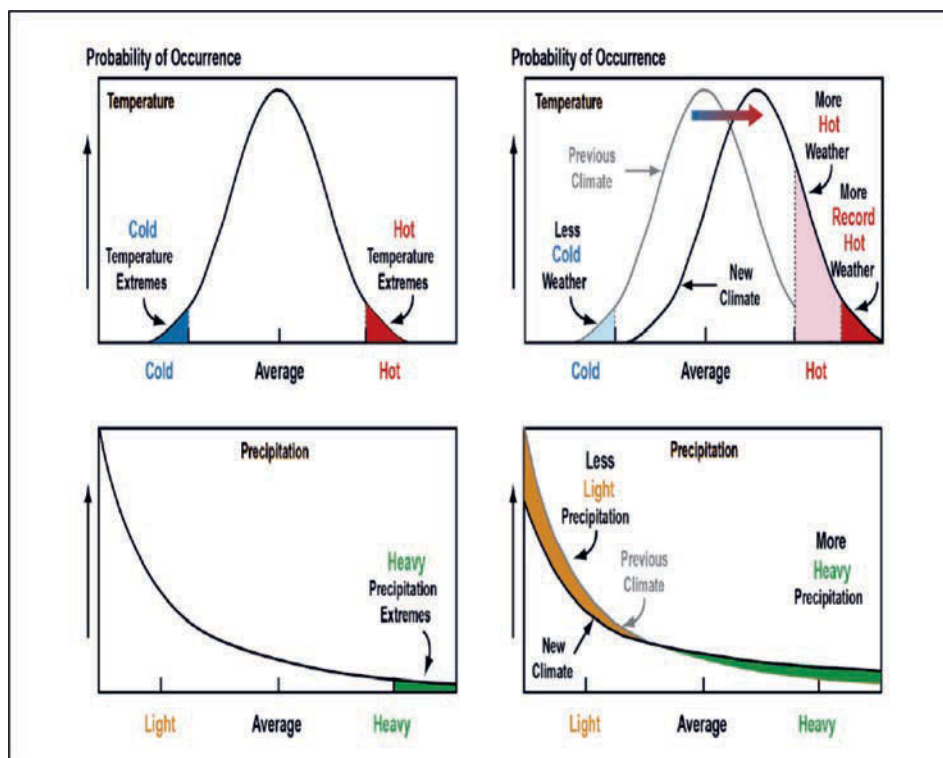
Las emisiones producidas por el uso generalizado de combustibles fósiles desde el comienzo de la revolución industrial han aumentado la concentración de gases de efecto invernadero, (GEI). No sólo se aumenta el contenido de  $\text{CO}_2$  en la atmósfera por la utilización de combustibles fósiles, carbón y petróleo; sino que también intervienen en los procesos del calentamiento otros gases como el vapor de agua, el metano y óxidos de nitrógeno. Por otra parte es importante la influencia de aerosoles y gases criogénicos, como el freón, el vapor de agua, los producidos por el volcanismo, y el polvo atmosférico. Los cambios climáticos han sido muy importantes a lo largo de los distintos periodos geológicos y la intervención del hombre en la agricultura; la deforestación, los cambios producidos en la cubierta vegetal y la quema de vegetales ha inducido cambios detectables en el clima terrestre en los últimos milenios. Durante la presencia humana cabe destacar un periodo de máximo frío en Europa

hace 16.000 años, un periodo cálido que hizo posible el desarrollo de las culturas griega y romana, un periodo frío en la época medieval, un periodo cálido durante los siglos XI y XII y la pequeña edad del hielo entre los siglos XVI a XIX, en los que desapareció la viticultura de muchas regiones europeas como en el sur de Inglaterra, se helaron golfos y estuarios, entre ellos el del Támesis en Londres, y se produjo un avance importante en los glaciares de los Alpes y Norte de Europa. El siglo XX ha sido un periodo de bonanza climática, (figura 1).

Las proyecciones de los modelos climáticos globales (MCG) del 4º informe (4AR), del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC 2007), pronostican que durante el siglo XXI las temperaturas aumentarán entre 1.1 y 6.4° C; dependiendo de los diferentes escenarios de emisiones de GEI, y también de los modelos empleados. Con el aumento de temperatura se espera que para finales de este siglo se origine un aumento del nivel del mar debido a la fusión de hielo en los glaciares y la expansión térmica del agua, que en el informe citado se estima del orden de 0.3m, sensiblemente inferior al de informes anteriores del IPCC, en los que se ha ido reduciendo sucesivamente esta predicción; aunque estimaciones más actuales las vuelven a elevar hasta valores superiores a 1m (Cayan et al 2008).

## EXTREMOS DE LA TEMPERATURA Y PRECIPITACIÓN. AVENIDAS Y SEQUIAS.

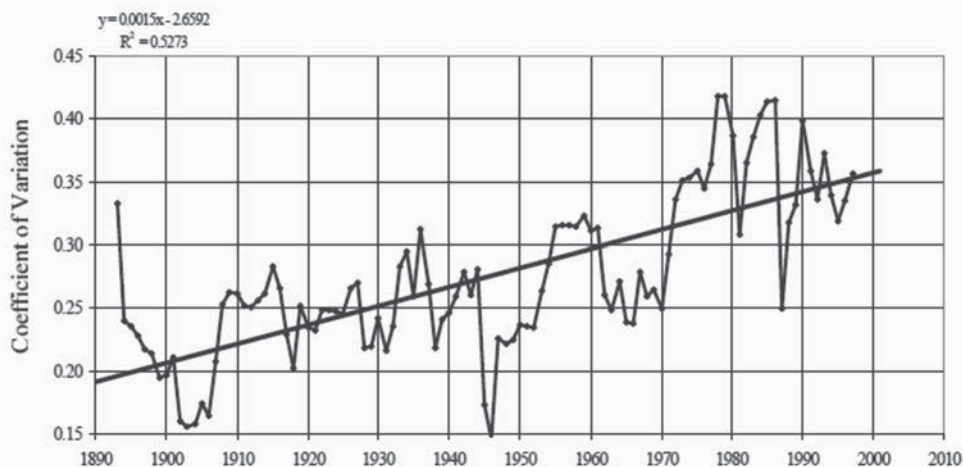
El cambio climático tiene un impacto complejo sobre las diferentes variables climáticas. El aumento de las temperaturas producirá cambios en las precipitaciones y variará su distribución espacial en mares y continentes y también aumentarán la dispersión y los extremos; cambios que son difíciles de cuantificar. La figura 3 muestra alguna de las formas posibles de como pueden cambiar en el futuro la temperatura y la precipitación, (CCSP 2008) y como aumentarían las precipitaciones más intensas, lo que influiría en el aumento de la frecuencia de avenidas y sequías. En la figura 4 ya aparece para el siglo pasado el aumento de la variabilidad de las precipitaciones en California. La forma seca y caliente de cambio climático tiene su efecto más severo en la escorrentía superficial, evaporación y recarga de acuíferos si se compara con las



**Figura 3.** Descripción gráfica de los extremos y probabilidad de distribución de la temperatura y precipitación (CCSP 2008)

condiciones históricas. En California para el año 2050 en un escenario seco y caluroso se produciría un descenso de precipitación del 27% y un aumento de temperatura de 4,5° (Medellín-Azuara *et al.*, 2009).

La relación de Clausius-Clapeyron, que expresa que el aumento de la capacidad de retención de vapor de agua por la atmósfera terrestre es del 7% por el aumento de 1° centígrado en la temperatura, hace que



**Figura 4.** Coeficiente de variación de la precipitación anual media en California entre 1890 y 2001 (California Department of Water Resources 2006)

la atmosfera aumente su contenido de humedad y aumenten la evaporación y evapotranspiración, y también la precipitación media anual, la variabilidad, la intensidad, y el contenido de humedad del suelo. Parece lógico intuir que el calentamiento global ocasionará una aceleración del ciclo hidrológico que incidiría en la intensidad y frecuencia de avenidas y sequías. Se espera que las precipitaciones sean menos frecuentes pero más intensas en muchas áreas y las sequías sean más frecuentes y severas en las áreas en las que la precipitación media descienda. En este sentido en la segunda mitad del siglo pasado se han producido los cambios en la intensidad de las precipitaciones en EE.UU que se pueden ver en la figura 5. Los distintos modelos prevén aumentos de la precipitación en las latitudes altas, tanto en invierno como en verano, aumento de la precipitación en las zonas tropicales y en las zonas monzónicas del sur de Asia y de Australia y descensos de la precipitación en la región mediterránea y en otras zonas áridas y semiáridas. Cambios que solo se pueden considerar de forma general y están sujetos a incertidumbres importantes. Las discrepancias entre los resultados de los modelos y las observaciones, (que se discuten más adelante), se deben a la complejidad de los fenómenos que influyen en el clima, a que la magnitud de las celdas de los modelos son de dimensiones mucho mayores que la

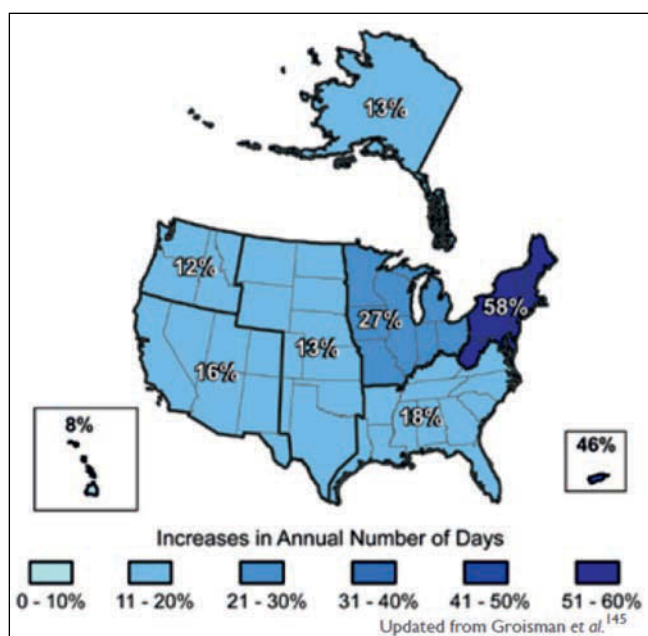
heterogeneidad de muchos de los fenómenos implicados y a que las trayectorias de la circulación atmosférica al llegar a las zonas continentales colisionan con la complejidad de los sistemas terrestres y sus diferencias topográficas, suelo y vegetación, (NAP 2011).

## CAMBIOS HIDROLÓGICOS INDUCIDOS.

El calentamiento global produce cambios importantes en la disponibilidad de los recursos hidráulicos. El aumento de temperatura trae como consecuencia el aumento de la evapotranspiración y evaporación en embalses, lagos y humedales. La disminución del hielo acumulado en los glaciares, la disminución de las nevadas y del almacenamiento de nieve en las zonas montañosas de las cuencas hidrográficas y el adelanto de la fusión de la nieve ocasionaría cambios estacionales del caudal de los ríos. Este fenómeno tiene una importancia limitada solo en algunas cuencas españolas, pero es importante en muchas zonas de Asia, Europa y América con grandes glaciares en zonas montañosas. En estas zonas el adelanto de la fusión del hielo puede influir en el aumento de los caudales de avenidas. En California ese adelanto obliga a sustituir el almacenamiento natural del agua en forma de nieve por un almacenamiento artificial, superficial o subterráneo.

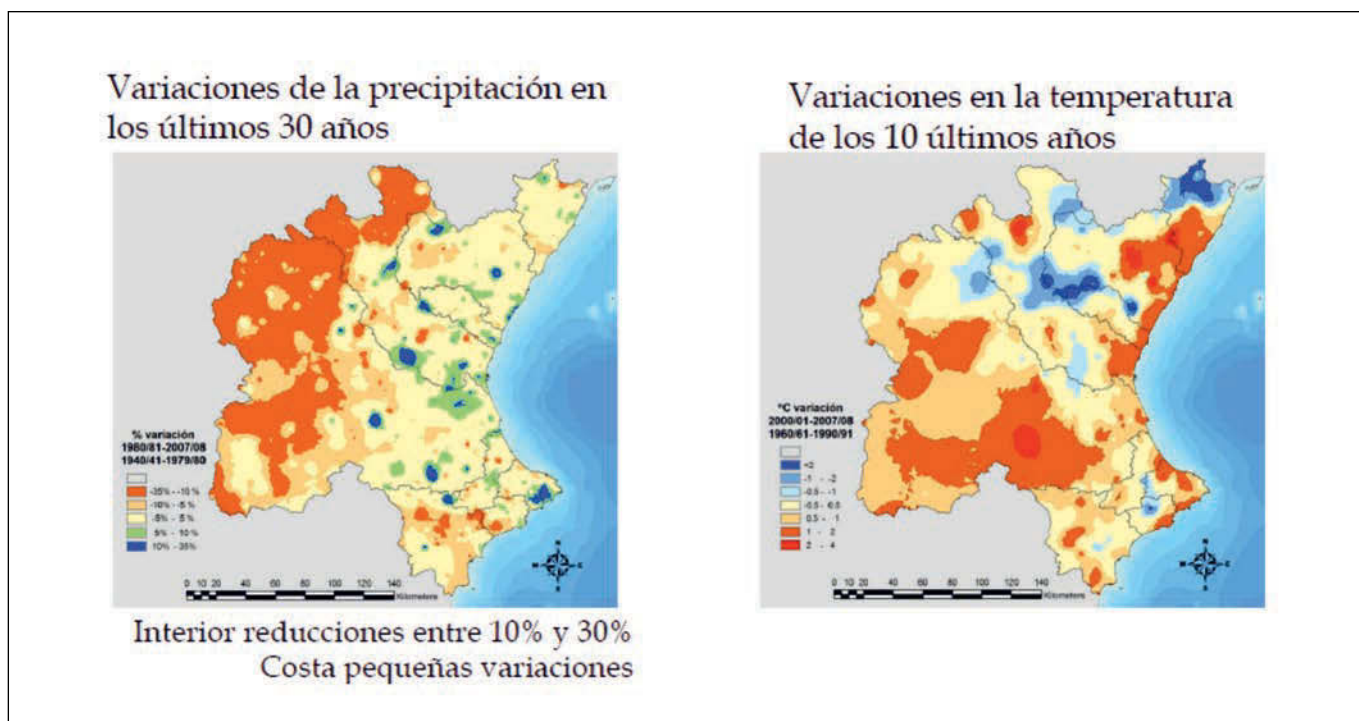
En general aumentará la variabilidad climática; con aumento de la intensidad de las lluvias y el aumento de las avenidas y de las sequías y su duración. Las avenidas y las sequías también están fuertemente influidas, al estarlo la escorrentía, por cambios antrópicos del uso del suelo y la cubierta vegetal, así como por la deforestación y repoblación, las prácticas agrícolas que incluyen los riegos, la urbanización, las explotaciones de aguas subterráneas y las derivaciones de agua de los ríos y los almacenamientos de agua en presas. Estos cambios hidrológicos modifican la escorrentía superficial y la recarga de los acuíferos tanto en sus valores medios, como en su variabilidad anual y estacional.

No hay argumentos para atribuir los cambios recientes en la precipitación y temperatura de algunas cuencas, como los de la figura 6, ya sea a la variabilidad del fenómeno, o por el contrario al calentamiento



**Figura 5.** Aumento del número de días con precipitaciones muy intensas. (definidas como las del 1% más altas) entre 1958 y 2007, (Groisman et al 2005)





**Figura 6.** Cambios recientes en la precipitación y temperatura en la cuenca del Júcar (Pérez Martín 2009)

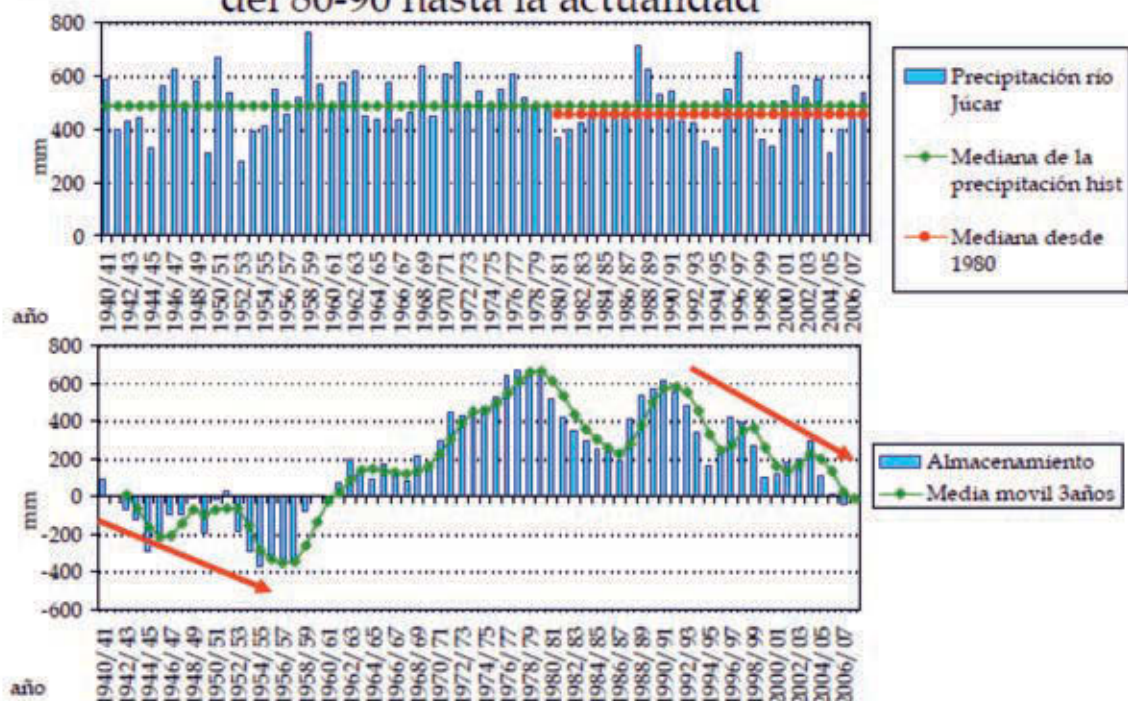
global. Lo mismo se puede decir de variación reciente de las precipitaciones y aportaciones de la Cuenca del Júcar que se muestran en la figura 7, que podrían atribuirse a un periodo seco similar al habido entre las décadas de los años cuarenta y cincuenta. En la figura 8 se indican los probables cambios que se producirán en la escorrentía para mediados de este siglo en los EE.UU.

Se producirán cambios en la recarga de los acuíferos que pueden influir en la relación entre las aguas superficiales y subterráneas. En las zonas en las que esta aumente, tramos de cauces que ahora son perdedores pueden pasar a recibir agua de los acuíferos al subir los niveles piezométricos. Por el contrario en zonas en las que disminuya, algunos tramos de cauces que ahora drenan los acuíferos pueden convertirse en perdedores. La persistencia de los cambios climáticos incidirá a su vez en cambios en el suelo y cubierta vegetal y en los ecosistemas que a su vez influyen en aspectos hidrológicos como la escorrentía y recarga de los acuíferos. También se pueden producir cambios en la calidad del agua superficial y subterránea, en su salinidad, temperatura y oxígeno disuelto. En áreas en las que aumente la intensidad de las lluvias es de esperar que aumente la contaminación de pesticidas, materia

orgánica, bacterias y metales pesados (IPCC 2007). Y en zonas donde aumente el nivel freático la contaminación en el suelo y la zona vadosa puede llegar a contaminar la zona saturada, (Harou y Lund 2010). Todos estos efectos juntamente con la subida de nivel del mar que afecta a estuarios, deltas y acuíferos costeros, influyen en la gestión y disponibilidad de los recursos de agua. También influyen en la demanda de agua por el aumento de la evapotranspiración potencial y de las necesidades de riego de los cultivos y de los caudales ambientales. El agua subterránea juega un papel importante en la sostenibilidad de muchos ecosistemas terrestres y acuáticos especialmente en épocas de sequía. El aumento de los consumos de agua superficial y subterránea puede tener efectos importantes en ecosistemas y sobre la biodiversidad.

En las zonas semiáridas, en las que la explotación de los recursos hidráulicos es intensa, pueden ser importantes los impactos del calentamiento global y el de los posibles descensos de la precipitación. El aumento de la variabilidad climática incrementa la severidad de las sequías y de las avenidas afectando la disponibilidad de agua con respecto a la calidad y cantidad. En la figura 9 se muestra una reconstrucción de la severidad de las sequías en el Oeste de EE.UU.

## Precipitaciones: Existencia de un ciclo seco desde la década del 80-90 hasta la actualidad



## Aportaciones: Existencia de un ciclo seco desde la década del 80-90 hasta la actualidad

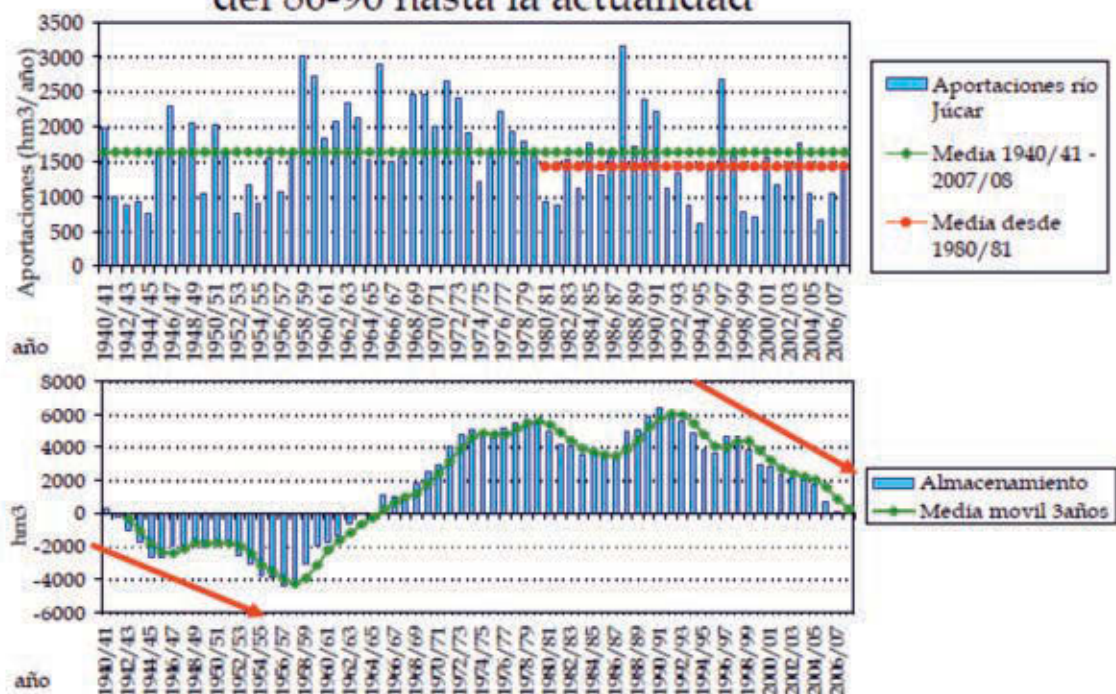
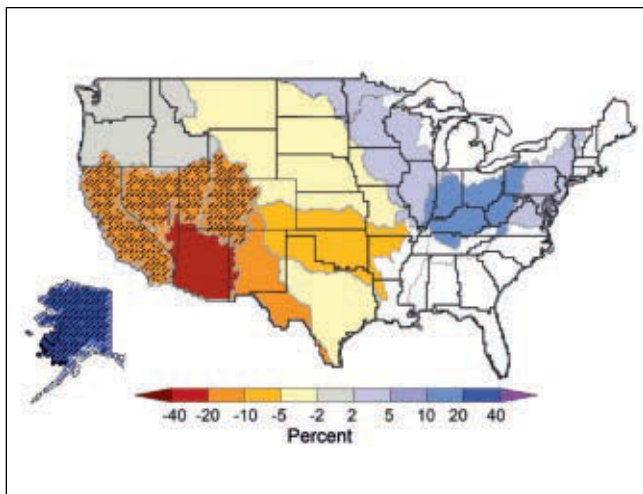


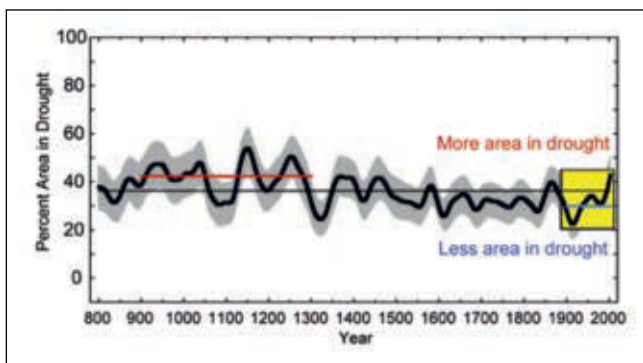
Figura 7. Precipitaciones y aportaciones recientes en la Cuenca del Júcar. (Ferrer Polo 2009)





**Figura 8.** Cambios previstos en la escorrentía para 2040-2060 en relación con la de 1901-1970. Para emisiones intermedias. Los mayores descensos se producen en el Suroeste y los máximos aumentos en el Noreste. Las zonas rayadas indican una mayor confianza debido a la fuerte coincidencia entre los resultados de distintos modelos. (Milly et al 2008)

Casi todos los métodos desarrollados para la planificación, gestión y operación de los recursos sistemas de recursos hidráulicos asumen la estacionariedad de los procesos hidrológicos. La estacionariedad ha sido hasta ahora un paradigma asumido universalmente en la gestión de los recursos hídricos. El calentamiento global está produciendo cambios no solo en los caudales medios de los ríos sino también en la estructura y variabilidad de las series hidrológicas. Se propugna una nueva hidrología que tenga en cuenta los cambios



**Figura 9.** Sequía en el Oeste de EE.UU. en los últimos 1200 años. La línea gruesa indica el porcentaje del área afectada por la sequía. (Determinada por el Drought Severity Index de Palmer menor que -1). La línea roja indica la sequía del período de 900 a 1300. La sequía del período de 1100 a 1300 ha sido muy superior a las habidas en los últimos 100 años, que han supuesto un período de bonanza hidrológica. (Cook et al 2004).

y tienen que replantearse las redes hidrológicas de control y toma de datos hidrológicos. Según Milly et al (2008) la estacionariedad ha muerto y hay que planificar y tomar decisiones sin un conocimiento perfecto de cómo está cambiando el clima. Pero esto no es un reto nuevo para la ingeniería hidráulica, donde la incertidumbre está siempre presente. La magnitud de los cambios climáticos en el futuro y la severidad de los impactos será mayor si no se toman decisiones para reducir las emisiones de GEI; es lo que se designa como mitigación y dependen fuertemente de como la humanidad decida producir y utilizar la energía. El conjunto de las acciones para reducir la vulnerabilidad de los sistemas naturales y humanos ante el cambio climático, actual o esperado, se designa como adaptación. Pero ante las incertidumbres de los riesgos que se presentan es aconsejable que las acciones sean flexibles y robustas, para ir aprendiendo de la experiencia y poder ajustar las acciones posteriores de forma adecuada.

## La modelación hidrológica de los cambios futuros

La simulación del cambio climático se tiene que hacer eligiendo un escenario de emisión de GEI y uno de los modelos de circulación global existentes. Con esto se obtienen los datos climáticos de precipitación y temperatura a la escala del MCG y escenario de emisión elegidos. La utilidad de los datos que proporcionan los MCG en una región o cuenca específica es limitada. Hay que considerar que los MCG no pueden proporcionar información a escala menor que la de la malla que utilizan, del orden de 200km. Para llenar los huecos de la resolución espacial y transformarlos en proyecciones realistas que se utilicen en los análisis hidrológicos a escala local es necesario aplicar técnicas de escalado (downscaling). Las técnicas de escalado se suelen agrupar en dos tipos, el escalado dinámico que utilizan modelos de circulación regional MCR anidados en los MCG, que requieren una capacidad de cálculo importante, y los modelos estadísticos. Con estos se determina una correlación entre las variables regionales o locales a predecir y las variables proporcionadas por los modelos de circulación global MCG en las grandes celdas. Hay varios tipos de modelos estadísticos: los sinópticos que agrupan los datos meteorológicos en relación con los distintos



patrones de circulación atmosférica, con los que generan secuencias sintéticas combinando los resultados de los MCG, los estocásticos, que modifican parámetros de generadores de clima para generar climas locales, y los de regresión, (Chirivella 2011, Green et al 2011). Los modelos estadísticos no requieren medios de cálculo importantes y son fáciles de aplicar a partir de los datos que proporcionan los MCG; sin embargo, la asunción básica de que las relaciones estadísticas desarrolladas para el clima presente también se mantienen para las condiciones de climas futuros puede no ser válida bajo situaciones diferentes, y también pueden haberse introducido cambios en el suelo y vegetación y en el uso del territorio. La variabilidad de la recarga es grande al depender de las propiedades hidráulicas del suelo y de la vegetación, y también son importantes las incertidumbres de los modelos precipitación-escurrimiento en los que influye la variabilidad de la precipitación y del uso del suelo. La deforestación ha sido la causa del aumento de la recarga en algunas cuencas australianas que ha desplazado las aguas subterráneas sumamente salinas en equilibrio con la vegetación anterior en cuencas muy áridas, proceso que ha dado origen a un incremento importante de la salinidad en algunos ríos, NLWRA (2001). En las cuencas áridas, al ser en general pequeña la recarga, es más difícil precisar tanto la recarga media, como su variabilidad temporal, y sólo se puede aproximar conociendo bien el acuífero y sus características hidrogeológicas. En España es en estas cuencas donde es más probable el aumento de la aridez en un futuro próximo.

La repercusión hidrológica de los cambios climáticos futuros tiene que deducirse a partir de modelos hidrológicos que proporcionen la escurrimiento a los ríos y la recarga de los acuíferos a partir de las lluvias y cambios climáticos proporcionados por los modelos de circulación global y el escalado correspondientes. Pero es importante tener en cuenta que los modelos lluvia-escurrimiento, o de recarga de acuíferos, para precipitaciones y temperaturas distintas a las históricas pueden presentar incertidumbres adicionales agravadas por el hecho de que no es posible la calibración de sucesos futuros. Hay que considerar que los MCG no pueden proporcionar información a escala menor que la de la malla que utilizan para la solución de los procesos climáticos. Además de los errores numéricos de discretización y de la no consideración de los procesos que se

producen a escalas menores, las predicciones climáticas están afectadas por la no linealidad e inestabilidad de las ecuaciones a resolver. Además, los resultados que proporcionan los MCGs dependen de las condiciones iniciales impuestas para la solución del sistema, que en general son ampliamente desconocidas y las del forzamiento del clima producido por las emisiones futuras de GEI que se utilicen, que se superponen a la variabilidad natural de los procesos climáticos. Tal como afirma Klemes (2000) probablemente solo seremos capaces de detectar y cuantificar la mayoría de los cambios climáticos bastante después de que ocurran. Parece claro que a pesar de los grandes avances conseguidos en estos modelos todavía tiene que pasar algún decenio antes de que consigan su madurez. Y se necesitará la colaboración de climatólogos, hidrólogos e ingenieros hidráulicos para trasladar los avances de la climatología a la ingeniería hidráulica.

### **La fiabilidad de los modelos de circulación global**

El desarrollo de los modelos climáticos ha seguido un planteamiento análogo a los de otros campos de la ciencia. La modelación del CC ha madurado con el empleo de resoluciones espaciales mas finas, la inclusión de un gran número de procesos físicos y la comparación con observaciones climáticas cada vez más extensas. Los modelos tienen fortalezas y limitaciones importantes. Han incluido un número creciente de procesos y fenómenos a los que se atribuyen influencias en los cambios climáticos pasados y futuros, aunque no todos. La modelización del clima ha mejorado continuamente en las últimas décadas, pero el ritmo ha sido desigual debido a que varios aspectos importantes del sistema climático presentan desafíos importantes para su simulación. Aunque en el conjunto de modelos están presentes una serie de sesgos sistemáticos, las fortalezas y debilidades de la simulación varían sustancialmente de un modelo a otro cuando se compara los resultados obtenidos con el clima actual. Se puede decir que no existe ningún modelo actual que sea superior a los demás, sino que diferentes modelos tienen diferentes puntos fuertes y debilidades. Desde muchos puntos de vista, la media del conjunto de modelos de simulación del clima resulta claramente superior a cualquier modelo indi-

vidual, lo que justifica el enfoque multimodal en los aspectos de proyección climática (CCSP 2008). Las variaciones estacionales y a gran escala de las temperaturas en superficie están bien simuladas en los modelos recientes, con correlaciones típicas del 95% o mejores. La simulación de la precipitación ha mejorado con el tiempo pero aun es problemática. La correlación entre modelos y observaciones está entre 50 al 60% para medias estacionales y observaciones de unos pocos cientos de kilómetros (CCSP 2008). No se sabe que parte del calentamiento del producido por los GEI ha sido contrarrestado por el enfriamiento debido a los aerosoles; ya que estos interactúan con las nubes y pueden cambiar las propiedades de radiación de estas y la cubierta nubosa. Están siendo objeto de activas investigaciones muchos otros procesos que es preciso incluir y/o mejorar en los modelos climáticos, algunos de los cuales aun están en su infancia.

Las fuentes de confianza que se esgrime por los redactores de AR4 (2007), de basarse en leyes físicas establecidas, reproducir las pautas de comportamiento del sistema y haber sido capaz de predecir medidas históricas en el sistema, es lo mínimo que se debe exigir a un modelo para poder confiar en su capacidad de predicción. Los modelos hidrológicos, que en general son mucho más simples que los climáticos, se considera que están calibrados cuando reproducen los datos históricos de una forma aceptable, pero no hay más reglas que un buen juicio hidrológico para juzgar su capacidad de predecir el comportamiento futuro de un sistema. El que un modelo haya sido capaz de reproducir la historia pasada no garantiza que pueda predecir el futuro (Konikow y Bredehoeft 1992); que citan a Winograd (1986) que discutiendo los problemas de la modelación del almacenamiento de residuos radiactivos de alta actividad, comenta que hay argumentos poderosos para poder afirmar que en las ciencias naturales, entender un proceso no implica que sea posible predecirlo, que hay casos en la hidrología y en la ciencia en general en los que la comprensión del fenómeno es grande y nuestra capacidad de predicción es pequeña y otros en que la comprensión es mínima y alta la capacidad de predicción. En cualquier fenómeno la precisión no puede asegurarse hasta después de pasado el tiempo de la predicción. Cuando el número de parámetros o la heterogeneidad de un sistema es grande la solución del problema inverso, o el de la identificación de los parámetros del modelo,

no es única. La confianza en las predicciones aumenta cuanto más largo es el periodo de validación en relación con el periodo de predicción. Pero en cualquier caso es conveniente observar el comportamiento del sistema implantando una red de observación adecuada. Pero hay que decir que la complejidad de los modelos es tanta y las opciones de parametrización tan elevadas que el que un modelo haya sido capaz de reproducir un conjunto de observaciones realizadas en el pasado no garantiza su capacidad de simular adecuadamente los aspectos futuros que interesan. Los procesos mismos simulados por los MCGs incluyen incertidumbres. De hecho la modelización del sistema climático ha ido añadiendo complejidad y subsistemas adicionales con el paso de los años. Por ejemplo, gran parte de las simulaciones realizadas en los últimos años suponían que la vegetación era constante en el tiempo y permanecía invariable en simulaciones seculares de cambio climático antrópico. En la realidad, la vegetación y el suelo edáfico, que lógicamente depende de las condiciones climáticas cambiantes, tiene también capacidad para afectar al clima, y como tal debería simularse. En cualquier caso los caudales superficiales y la recarga de acuíferos obtenidas con modelos climáticos, para precipitaciones y temperaturas distintas a las históricas, están sujetos a incertidumbres adicionales importantes. No solo influyen los cambios en la precipitación media, vegetación y suelo; para la escorrentía y la recarga de los acuíferos también son importantes la intensidad, frecuencia y duración de cada episodio de lluvia.

### **La fiabilidad de los modelos hidrológicos resultantes de los datos proporcionados por los modelos climáticos.**

#### *Los resultados para España del Proyecto PRUDENCE.*

Para Europa y la Cuenca Mediterránea se realizó el proyecto PRUDENCE, que proporciona proyecciones de cambio climático a lo largo del siglo XXI utilizando 21 RCMs, entre ellos el modelo PROMES de la UCLM. En la figura 10 se puede ver la media de los 21 MCR del proyecto para temperaturas y precipitación a finales del siglo XXI, anual, para (DJF) Diciembre, Enero y Febrero y para (JJA) Junio, Julio y Agosto. En la fila inferior se da el número de modelos que dan

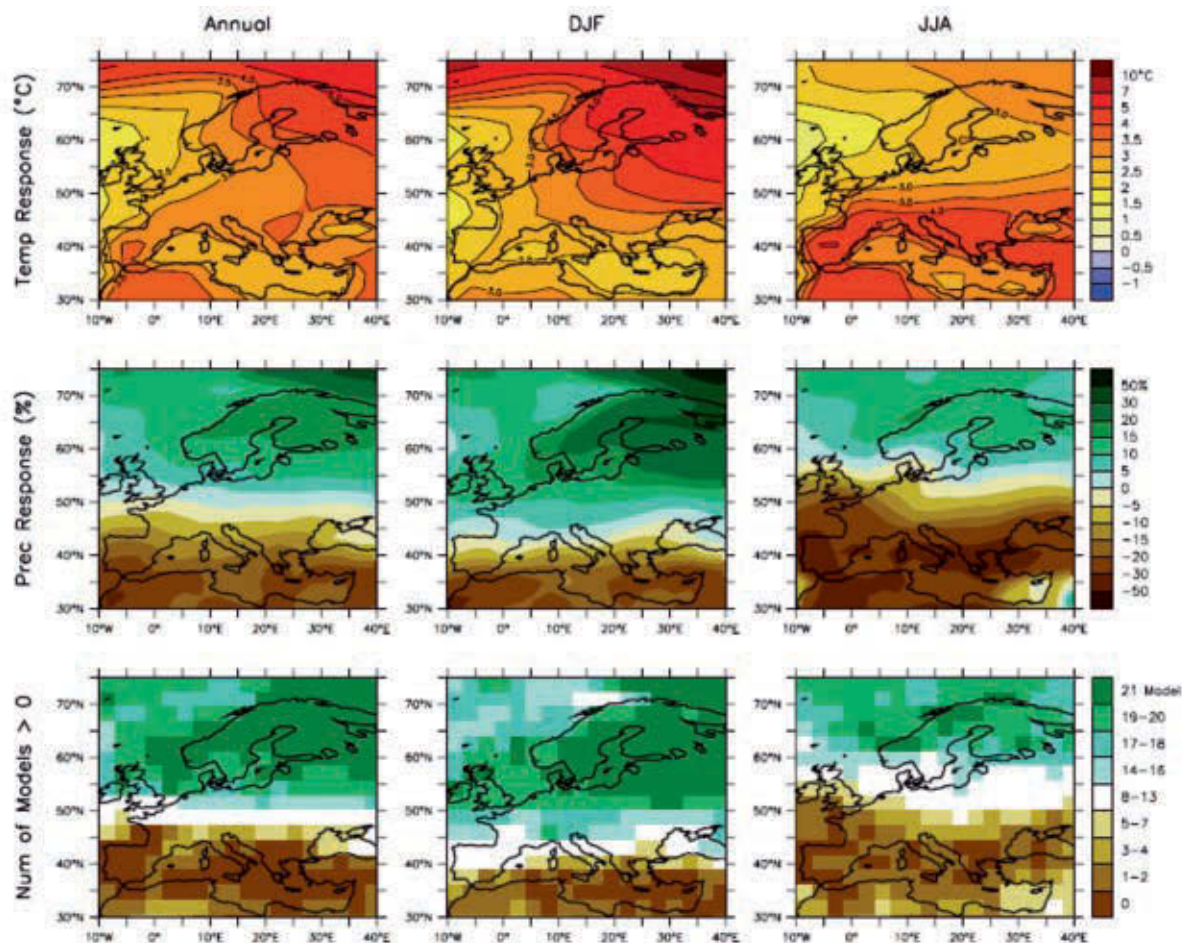


Figure 11.5. Temperature and precipitation changes over Europe from the MMD-A1B simulations. Top row: Annual mean, DJF and JJA temperature change between 1980 to 1999 and 2080 to 2099, averaged over 21 models. Middle row: same as top, but for fractional change in precipitation. Bottom row: number of models out of 21 that project increases in precipitation.

**Figura 10.** Cambios de temperatura y precipitación. Media de los modelos en el sur de Europa y Mediterráneo. Proyecto Prudence. (Christensen et al 2007)

aumento de precipitación. Se puede observar que para los meses DJF, meses que pueden dar lugar a escorrentía y recarga de los acuíferos en la mayor parte de España. Entre los 21 modelos utilizados hay entre 8 y 13 modelos que dan aumento de precipitación. Y para la precipitación anual hay algún modelo que también da aumento de esta. Lo cual es un índice de la dispersión y fiabilidad de los resultados.

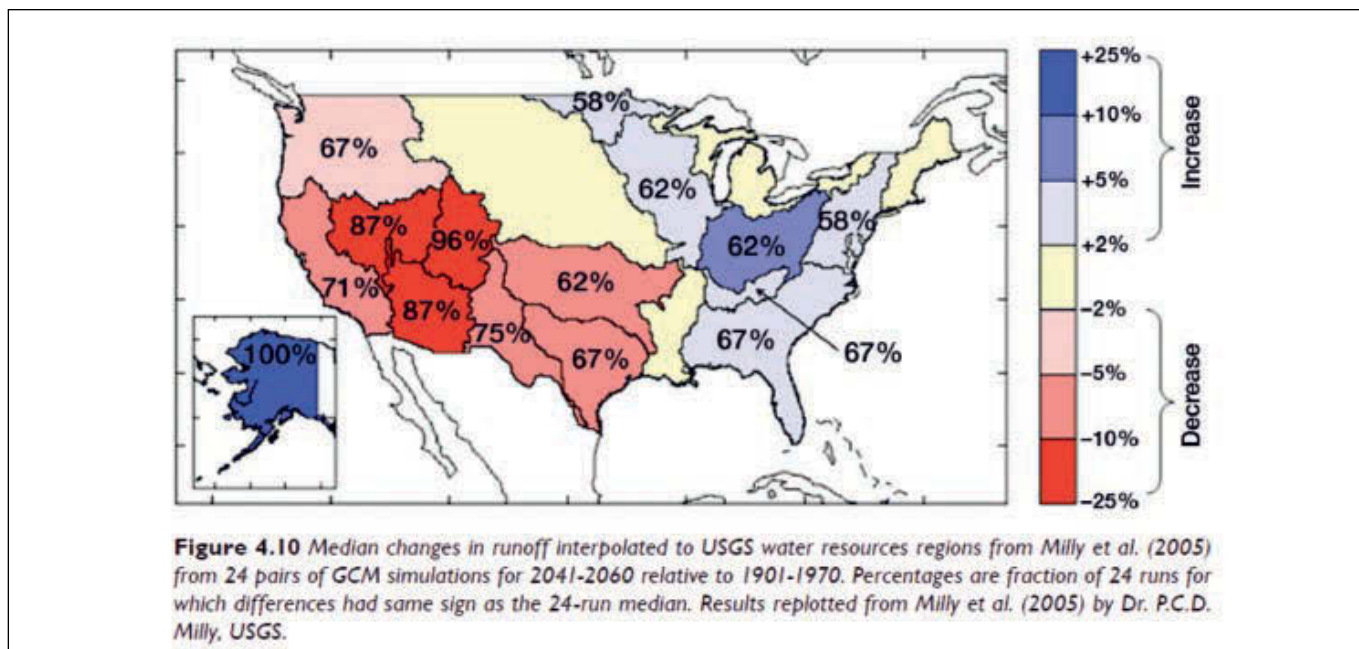
#### *Los resultados de 24 modelos para EE.UU*

La figura 11 presenta los resultados de las 18 regiones hidrológicas de EE.UU de los cambios en la escorrentía, para 2040-2060 en relación con 1901-

1970, que proporcionan 24 pares de simulaciones de modelos. Indican aumentos de escorrentía en el norte y este y disminuciones en el suroeste. Los porcentajes en cada región indican el de las simulaciones con el mismo signo que la mediana para cada región. Esto indica que para una disminución del 71% hay 17 modelos que predicen disminución de escorrentías y 7 predicen aumentos, y para el 67% estas cifras son 16 y 8 respectivamente. Resultados que indican una tendencia, y también incertidumbres importantes.

Incluso como se ha comentado antes, utilizando en distintos modelos hidrológicos los datos de precipitación y temperatura futura simulados con un MCG, se obtendrían resultados de escorrentía muy diferentes.





**Figura 11.** Cambios previstos para la escorrentía en la simulación de 24 modelos de MCG para EE.UU. Lettenmaier et al (2008)

Diferentes modelos climáticos regionales producen respuestas diferentes a las condiciones de contorno de los modelos globales, lo que representa otra fuente de incertidumbre (National Research Council 2011). Los modelos actuales más avanzados solo nos pueden dar información sobre las posibles tendencias futuras de los recursos hidráulicos a gran escala y con incertidumbres importantes. Para cuencas concretas las incertidumbres son aun mayores que para regiones más amplias.

## LA ADAPTACIÓN PARA AUMENTAR LA DISPONIBILIDAD DE RECURSOS HIDRÁULICOS

Para hacer frente a los efectos del calentamiento global sobre los recursos hidráulicos y sobre los demás aspectos que afectan a la sociedad, y en general a nuestro entorno, se han sugerido dos tipos de acciones, la mitigación y la adaptación. La mitigación pretende disminuir el calentamiento global reduciendo las emisiones de GEI. Es una tarea fuera del alcance y objetivo de este análisis y es difícil de llevar a cabo por la dependencia de la economía de los países, desarrollados y en desarrollo, de los combustibles fósiles. Además los gases que hay en la atmosfera permanecerán durante mucho tiempo y seguirán contribuyendo

al calentamiento global. La adaptación aplica iniciativas y medidas para reducir la vulnerabilidad de los sistemas naturales y humanos a los efectos del cambio climático. Una forma evidente de adaptación para los recursos hidráulicos es la mejora de la gestión, cuando estos recursos están muy solicitados y las demandas siguen creciendo, especialmente en el caso de aumento de la frecuencia e intensidad de las sequías. También pueden presentarse posibilidades para la adaptación con el objetivo de minorar los efectos de las avenidas.

Las opciones de adaptación incluyen tanto acciones sobre la demanda de agua, mejora de eficiencias y utilización de otros mecanismos que sustituyan o hagan disminuir su necesidad, y también sobre la oferta, mejora de la operación de los sistemas, utilización conjunta de aguas superficiales y subterráneas, conservación, reducción de la evaporación de lagos y embalses, transferencias de otras cuencas, desalación y desalobración, reutilización de aguas usadas, y mercados y bancos de agua. En las cuencas en zonas áridas o semiáridas más solicitadas es conveniente empezar ya a considerar las opciones de adaptación por dos motivos; por una parte porque pueden servir de entrenamiento para hacer frente a los problemas futuros, y además para valorar la efectividad de las respuestas que se vayan implementando e ir las mejorando de forma iterativa. En cualquier caso estas actuaciones

pueden servir para mejorar la gestión actual de los recursos hidráulicos.

Las decisiones además de ser política, social y legalmente aplicables tienen que ser flexibles y robustas para poder ajustarlas de forma progresiva. Hasta ahora los gestores del agua se han preocupado del problema de la variabilidad de las aportaciones superficiales, tratando de tenerla en cuenta y reproducirla en las series hidrológicas estacionarias. En la situación actual y con la información que disponemos hay que ver qué posibilidades hay de mejorar la gestión de los sistemas hídricos para hacer frente a mayores demandas, con avenidas y sequías más extremas, con aportaciones menores y de mayor variabilidad. Planificar reduciendo la vulnerabilidad a las avenidas y sequías es un problema difícil incluso en ausencia de cambio climático. Las predicciones de los impactos del cambio climático nunca serán perfectas. Las mejoras de la operación de los embalses superficiales y subterráneos pueden proporcionar alternativas eficientes para contrarrestar el efecto del aumento de las sequías y las avenidas. Pero, con independencia de las incertidumbres que puedan existir sobre su importancia en una cuenca concreta para mejorar la gestión es conveniente plantear análisis más rigurosos de los sistemas hidráulicos.

La experiencia de adaptación al cambio climático es limitada. Sin duda la más amplia es la de California donde el uso conjunto tiene una gran tradición y desarrollo y juega un papel muy importante en la consecución de los objetivos que se plantean.

## Algunas posibilidades de actuación

### *Uso conjunto*

El uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas es una de las acciones más claras para aumentar la disponibilidad de recursos de agua. Por otra parte, la construcción de embalses ha disminuido en todo el mundo por razones económicas y ambientales. En general los embalses con posibilidad de ser construidos tienen mayor contestación política y ambiental, y económicamente son menos atractivos que las aguas subterráneas. Los acuíferos pueden proporcionar una gran capacidad de almacenamiento subterráneo, en general muy superior a la que sería nece-

saria con una óptica económica, capacidad que en general no está totalmente aprovechada y en la mayoría de los casos ni siquiera considerada. Los acuíferos, si se gestionan adecuadamente, pueden contribuir a aliviar la presión de las solicitudes provocadas por el cambio climático. Su almacenamiento y sus recursos extendidos por todo el acuífero, hacen posible que muchas demandas se pueden satisfacer extrayendo el caudal preciso directamente en un sitio muy próximo a la localización de la demanda; que es lo mismo que disponer de una capacidad de distribución que no es necesario construir (Sahuquillo 1983a, 2002, 2010). Los acuíferos pueden añadir a las funciones de almacenamiento y distribución, esenciales en los sistemas hídricos, el disponer de agua almacenada, en volúmenes muy superiores a las recargas medias anuales para acuíferos medianos y grandes. Posibilidades que añadidas a los componentes clásicos de un sistema superficial: tomas y derivaciones de los ríos y embalses, conducciones, y presas y almacenamiento superficial son los componentes de un sistema de utilización conjunta.

Las dos alternativas importantes para utilizar el almacenamiento subterráneo son la recarga artificial, que es la más analizada en la literatura especializada y el uso conjunto alternante de aguas superficiales y subterráneas, (UCA). Desde antiguo en muchos países se aumenta la explotación de las aguas subterráneas para regar en épocas de sequía. El UCA hace uso de esta idea bombeando más agua de los acuíferos cuando el agua almacenada en los embalses, o el caudal de los ríos son más reducidos. Por el contrario en periodos o años más húmedos se aumenta la utilización de aguas superficiales, disminuyendo los bombeos de los acuíferos. El almacenamiento subterráneo se consigue con la variación de los volúmenes de agua almacenados en los acuíferos; más altos al final de un periodo húmedo y más bajos al final de uno seco.

En los países áridos la subida de los niveles freáticos, debido a los retornos de riego y las pérdidas en canales y ríos perdedores, ocasiona problemas de salinización y drenaje en muchos riegos. El bombeo de aguas subterráneas se ha utilizado para aliviar estos problemas, con lo que además se ha aumentado sustancialmente la superficie de riego en bastantes zonas, aunque en general se ha hecho de forma poco planificada. Los riegos del Indo, donde se han recuperado

unos 4 millones de hectáreas que se habían abandonado por problemas de drenaje y salinización, es un ejemplo notable de esta situación, (Burke y Moench, 2000; van Steenberg y Oliemans, 2002, Sahuquillo (1983 y 2002), Foster y van Steenberg (2011) reseñan el aumento de la superficie de riego con aguas subterráneas en numerosas zonas de riego con canales en la llanura Indo-Gangética y en otros lugares. Lund et al (2009) opinan que aumentar el uso conjunto en periodos interanuales o de sequía puede producir beneficios económicos y operativos importantes.

Donde se realiza el uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas es posible incorporar a la gestión los demás recursos de agua de la cuenca, reutilizar aguas residuales o desaladas y hacer una gestión conjunta de todos los componentes teniendo en cuenta sus interacciones. La reutilización de aguas residuales se está incrementando rápidamente, aunque requiere tratamientos avanzados para poder utilizarlas en usos urbanos. En California por el Southern California Water Committee, además de tratamientos terciarios se utiliza la ozonización y nanofiltración antes de recargar en los acuíferos, (Atwater 2011, Reichard 2010) y así se hace también en la barrera contra la intrusión del delta del Llobregat (Ortuño 2011).

Cuando exista algún embalse y se produzcan aumentos de demanda o disminución de recursos por el cambio climático conviene analizar las posibilidades del uso conjunto y compararlas con la solución de construcción de nuevos embalses.

### *Operación de embalses*

Es bastante general que los embalses se operen con unas reglas fijas basadas en la experiencia de la información hidrológica existente. En general en España no existen reglas para la operación de los embalses públicos y los desembalses se hacen siguiendo recetas o normas simples o a petición de los usuarios. En California las operaciones para el control de avenidas se hacen con reglas fijas y no se utilizan ni predicciones, ni otros análisis especiales. Para los desembalses normales solo se utilizan predicciones de año seco o húmedo, lo que es claramente mejorable. Para superar esta carencia se ha analizado para el Norte de California, a través del proyecto INFORM una *gestión adaptativa* acoplada con un sistema de modelación

hidrológica y “downscaling” que tenga en cuenta las predicciones probabilísticas de acuerdo con los objetivos de la gestión, teniendo en cuenta las incertidumbres. Los resultados hacen posible la operación de los periodos de sequía y superan la vulnerabilidad y riesgos a los que está puesto el sistema (Georgakakos 2012).

### *Modelación del uso conjunto*

En sistemas complejos de uso conjunto hay que simular conjuntamente todos los elementos superficiales y subterráneos. Y hay que hacerlo para cada serie posible de posibles aportaciones superficiales y para cada alternativa de gestión. Para ello hay que simular tanto el sistema superficial, el subterráneo y el intercambio de flujos de agua entre ríos y acuíferos, considerando las distintas posibilidades de satisfacer las demandas, evaporaciones y retornos. El único modelo que conocemos capaz de simular eficientemente sistemas de complejidad alta, en el que se puedan simular además del sistema superficial, los acuíferos de forma distribuida y las interacciones con las aguas superficiales, es el SSD AQUATOOL, (Andreu et al 1994), suficientemente conocido para que haga falta presentar sus particularidades.

Probablemente los sistemas más complejos que incluyan aguas superficiales y subterráneas en los que se han aplicado modelos de uso conjunto son algunos de los que se les ha aplicado el AQUATOOL en España. Para la planificación en California se han desarrollado modelos de planificación y gestión a nivel mensual CalSim II y CalSim III por el Departamento de Recursos de Agua de California (DWR) y el Bureau of Reclamation (USBR) para la gestión del Canal de California (SWP) y del Proyecto del Valle Central (CVP) que comprenden la mayor parte del estado, pero no incluyen la simulación conjunta con los acuíferos. También se ha desarrollado por separado una serie de modelos de acuíferos. En el informe del panel que revisó el modelo CalSim II criticó que no se modelase conjuntamente el sistema superficial y el subterráneo (San Joaquin River Valley CalSim II Model Review 2006) y se ha trabajado en la aplicación del método de las “*funciones de influencia*” en el modelo CalSim III que es una actualización del anterior para desarrollar un modelo integrado de las aguas superficiales y subterráneas del estado (Young, 2007; Joyce, 2007). En el



CWP 2009 se considera que la falta de datos y la resolución de los modelos que disponen no son suficientes para estimar y modelar los impactos de los bombeos en los flujos superficiales, pero es de suponer que se sigue trabajando en ello. Pensamos que la aplicación del “*método de los autovalores*”, empleado en AQUATOOL, al proporcionar soluciones explícitas de la respuesta del acuífero a las acciones exteriores, es una alternativa superior a la de las *funciones de influencia*, aunque hay una labor importante a realizar para hacerlo aplicable a modelos de acuíferos con muchos miles de nudos, tarea en la que se está investigando en la Universidad Politécnica de Valencia.

Para tomar decisiones de desembalse en situación de sequía se ha desarrollado un sistema de gestión con el que se hacen simulaciones con AQUATOOL, con un abanico de series de aportaciones probables a los embalses del sistema, a partir de un instante crítico, para decidir la operación óptima en esa situación. Simulaciones que se repetirían para cada estado posterior y así actualizar secuencialmente las decisiones de explotación. La mejora de los modelos climáticos llevará sin duda a una mejora de las predicciones hidrológica a plazos corto y medio con lo que la metodología aumentará su eficiencia. Esto puede permitir mejorar la gestión tanto de los embalses de superficie como del almacenamiento subterráneo. (Sánchez Quispe et al 2001). La extensión lógica de lo que se ha denominado como *gestión anticipada de las sequías*, es aumentar la explotación de los acuíferos con la misma idea de anticiparse a las situaciones críticas. En esta gestión anticipada de las sequías sería posible alcanzar un mayor vaciado de los embalses de superficie cuando se prevean aportaciones posteriores altas en los ríos. Así se pueden evitar o disminuir los vertidos futuros que se podrían producir con una operación más conservadora.

## La adaptación en California y posibilidades en España

Desde 2005 se está analizando la influencia del CC desde la actualización del California Water Plan de 2005. Para la actualización del de 2009 se han realizado simulaciones de su sistema hidráulico para distintos escenarios climáticos futuros según las predicciones de varios modelos de circulación global esca-

lados para las distintas cuencas. El sistema de recursos hídricos de California tiene dos particularidades que permiten una intervención amplia en su gestión y operación: el gran desarrollo de la utilización conjunta y la alta conectividad de su sistema de recursos hidráulicos, proporcionada por la amplia red de conducciones de las transferencias de agua desde el Norte al Sur, desde el Río Colorado y otras como el acueducto de Los Ángeles. Se ha hecho una simulación con el modelo CALSIM-II utilizando las demandas y escenarios climáticos hasta 2050 con los criterios de operación actuales, pero sin incluir los acuíferos como se ha comentado antes.

Un análisis novedoso de las posibilidades de la atenuación las proporciona el modelo hidroeconómico CALVIN (CALifornia Value Integrated Network), que analiza los suministros y demandas de agua (Lund et al 2003; Tanaka et al 2006; Medellín Azuara et al 2009; Harou et al 2009). Es un modelo de optimización económica que se ha aplicado a California para diversos escenarios climáticos, hasta final de siglo, figura 4. Determina la operación mensual del sistema, proporciona los precios sombra y los beneficios y costes marginales. Incluye los acuíferos de forma agregada, restricciones ambientales y las restricciones en las conducciones. Hace posibles los cambios en la asignación del agua a través de mercados, haciendo transferencias según la capacidad de pago de cada uso; lo que permite la transferencia de agua desde los usos agrícolas a los urbanos y cambios de cultivos y barbechos. Tiene en cuenta el ahorro en usos urbanos y la eficiencia de riego, la reutilización y la desalación. Para la operación del sistema de recursos de agua de California propone una operación de la utilización conjunta de aguas superficiales y subterráneas, que las incluye de forma agregada, mucho más radical que la efectuada hasta ahora. Consideran entre otros un escenario seco y otro húmedo con 92 millones de habitantes para 2100, lo que supone una demanda urbana de  $8,65 \text{ km}^3$ , la urbanización de zonas de riego reduce la demanda agrícola en  $3,25 \text{ km}^3$  con lo que el aumento neto de la demanda es muy importante  $5,4 \text{ km}^3$ . El modelo tiene más de 1200 elementos, 51 embalses superficiales, 28 subterráneos, más de 600 conexiones o trasvases y representa más del 88% del regadío y del 92% de la población de California. Los resultados del estudio preliminar indican la posibilidad física de un sistema complejo y diverso interconectado para adaptarse a

cambios notables en el clima y en población, aunque a costes importantes. La adaptación es posible gracias a cambios importantes en la operación de la gran capacidad de almacenamiento del sistema, transferencias de agua entre los usuarios y una cierta adaptación a tecnologías nuevas.

También con CALVIN, Harou et al (2010) analizan un episodio severo y prolongado de sequía como el que secó el lago Mono alrededor del año 900, idéntico al que se representa en la figura 9 en el que se estimó un descenso en las aportaciones hasta el 40% de la aportación actual y muestran que es posible, aunque costoso, adaptarse a esas condiciones extremas aprovechando el gran volumen de agua almacenado en los acuíferos.

En España los resultados del proyecto PRUDENCE, entre otros, son bastante negativos para la disponibilidad de recursos de agua, al pronosticar menos aportaciones y más evaporación potencial, y efectos negativos para los ecosistemas; en especial en las cuencas mediterráneas que son en las que las demandas se acercan, o superan ya, a las disponibilidades y se están produciendo, o ya se han producido efectos indeseables sobre muchos humedales y otros ecosistemas. Recordamos la incertidumbre de las predicciones climáticas futuras y en que hay algún modelo que prevé incluso aumento en las precipitaciones anuales. Pero con eso no queremos incitar a la pasividad sino a mejorar en todo lo posible la gestión de estas cuencas, además de seguir muy de cerca los progresos en la modelación del cambio climático y en los temas relacionados con este.

La inclusión del método de los autovalores en CALVIN puede ser interesante al juntar las posibilidades de la optimización económica a la de poder simular los acuíferos de forma distribuida y los intercambios de caudal con los ríos de forma explícita y directa y las alturas piezométricas en diversos puntos de interés. Hasta ahora solo se ha hecho en acuíferos pequeños (Pulido 2003) pero parece obvio que su mayor ventaja está en aplicarlo a acuíferos mayores.

Las conclusiones que se pueden sacar de estos análisis son que es posible adaptar el sistema de California con un coste relativamente reducido para su economía a la disminución de recursos que produciría el calenta-

miento global. Utiliza el almacenamiento subterráneo, incluye nuevos recursos como reutilización y en menor medida desalación, aumenta la eficiencia (eficiencia de riegos, eficiencia en la gestión, ahorros urbanos, etc.) e introduce cambios en la asignación del agua (mercados y cambios de asignación). Todo ello a pesar del aumento de la demanda que tiene mayor influencia que los efectos del cambio climático.

La conectividad de los sistemas hídricos en España es mucho menor que en California, lo que disminuye las posibilidades de actuación. Además del uso conjunto habría que incluir la reutilización, la desalación y desalobración, la mejora de la eficiencia, cambios de cultivos y variedades y el intercambio de asignaciones a través de los mercados de agua o transferencias de derechos. Pero para poder hacerlo es preciso dedicarle desde este momento esfuerzos importantes y una financiación adecuada. Aunque no tengamos un conocimiento perfecto de cómo va a influir el CC en nuestros sistemas hidráulicos ya hay que tomar decisiones sobre la planificación y política hidráulica. Y una de las más importantes es la de proteger los acuíferos de la contaminación para que puedan realizar las funciones que tendrán que cumplir en el futuro. Se precisan mejoras importantes en el conocimiento de nuestros sistemas hidráulicos y cambios radicales en la disposición de la administración española. El conocimiento de los acuíferos y su relación con las aguas superficiales y los humedales es aún deficiente y es urgente superarlo sobre todo en las cuencas en las que se va a hacer necesaria una utilización conjunta más agresiva como la descrita antes. Las inversiones públicas en los estudios de aguas subterráneas son muy reducidas e incluso descendieron tras la promulgación de la ley de aguas de 1985 que las declaraba públicas. Además la carencia de personal con formación hidrogeológica en las confederaciones y en las agencias de agua es notoriamente insuficiente. La preocupación institucional sobre la protección de las aguas subterráneas contra la contaminación es mínima, lo que requiere ser superado, y tampoco es adecuada la relacionada con los problemas ambientales.

## CONCLUSION.

El calentamiento global va a producir cambios en la temperatura, precipitación y disponibilidad de recursos

hidráulicos que según los modelos de circulación global MCG pueden ser importantes en las zonas más secas de España. La incertidumbre de sus resultados y de las proyecciones sobre las aportaciones de los ríos y recarga de los acuíferos, son mayores que las que hay sobre la precipitación y temperatura, pero es de esperar que los avances que se están realizando hagan disminuir estas incertidumbres en un futuro difícil de establecer. En cualquier caso hay que tomar decisiones para encarar el futuro con un conocimiento imperfecto de cómo está cambiando el clima, decisiones que tienen que ser flexibles y no tengan que lamentarse. La adaptación ante estos cambios para contrarrestar los efectos ambientales y sobre las disponibilidades de agua se puede tratar de conseguir a través del uso conjunto, utilizando el almacenamiento subterráneo, las transferencias de agua, la conservación, reutilización y desalación y de los bancos de agua. Son acciones que en cualquier caso pueden contribuir a la mejor gestión de los recursos hidráulicos. Puede ser interesante la aplicación a CALVIN de las ventajas del método de los autovalores; al juntar las posibilidades de la optimización económica a la de poder simular los acuíferos de forma distribuida de forma explícita y directa. Y parece imprescindible acabar cuanto antes con las carencias en el conocimiento de muchos acuíferos en España y aumentar el número de especialistas en hidrología subterránea en las agencias de cuenca.

## REFERENCIAS

1. Andreu, J., J. Capilla, y F. Cabezas, "Los sistemas soportes de decisión en la planificación y gestión racionales de los recursos hídricos", en Ingeniería del Agua, vol. 1, núm. 2, pp.7-20, 1994.
2. Atwater, R., (2011). *History of Groundwater Conjunctive Use in Southern California*. Managed Aquifer Recharge Symposium. January 25-26, 2011. Irvine, California
3. Burke, J.J. and Moench, M (2000). *Groundwater and Society: Resources, Tensions and Opportunities*. United Nations Publications. Sales No. E.99.II.A.1 170pp
4. California Department of Water Resources (2006).- *Progress on Incorporating Climate Change into Management of California's Water Resources*.339 pp
5. Cayan, D., E. Maurer, M. Dettinger, M. Tyree, and K. Hayhoe. 2008. Climate change scenarios for the California region. *Climatic Change*, 87 (Suppl. 1): 21-42. DOI: 10.1007/s10584-007-9377-6.
6. CCSP, 2008: *Climate Models: An Assessment of Strengths and Limitations*. A Report by the U.S. Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research [Bader D.C., C. Covey, W.J. Gutowski Jr., I.M. Held, K.E. Kunkel, R.L. Miller, R.T. Tokmakian and M.H. Zhang (Authors)]. Department of Energy, Office of Biological and Environmental Research, Washington, D.C., USA, 124 pp
7. Christensen, J.H., et al (2007) Regional Climate Projections. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
8. Chirivella, V, (2011). *Caracterización de los futuros escenarios climáticos en la Comunidad Valenciana: propuestas de mejora para la evaluación de la oferta y demanda de recursos hídricos*. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia
9. Foster, S y Frank van Steenberg. (2011) *"Conjunctive groundwater use: a lost opportunity" for water management in the developing world?*. Hydrogeology Journal 19:959-962.
10. Georgakakos, A.P., et al.(2011) *Value of adaptive water resources management in Northern California under climatic variability and change: Reservoir management*. J. Hydrol. (2011),
11. Green, T.R., et al. Beneath the surface of global change: Impacts of climate change on groundwater. J. Hydrol. (2011)
12. Groisman, P.Ya., R.W. Knight, D.R. Easterling, T.R. Karl, G.C. Hegerl, and V.N. Razuvaev, 2005: Trends in intense precipitation in the climate record. *Journal of Climate*, **18(9)**, 1326-1350. California Department of Water Resources (2006).- *Progress on Incorporating Climate Change into Management of California's Water Resources*.339p
13. Harou J. J, Manuel Pulido-Velazquez, David E. Rosenberg, Josué Medellín-Azuara, Jay R. Lund, Richard E. Howitt, (2009) *Review: Hydro-economic models: Concepts, design, applications, and future prospects*. Journal of Hydrology 375, 627-643
14. Harou, J. J., and J. R. Lund. 2008. "Ending Groundwater Overdraft in Hydrologic-Economic Systems." *Hydrogeology Journal* 16(6): 1039-55.
15. Harou, J. J., M. Pulido-Velazquez, D. E. Rosenberg, J. Medellín-Azuara, J. R. Lund, and R. E. Howitt. 2009. "Hydro-Economic Models: Concepts, Design, Applications, and Future Prospects." *Journal of*



*Hydrology* 375(3–4): 627–43.

16. Harou, J. J., J. Medellín-Azuara, T. Zhu, S. K. Tanaka, J. R. Lund, S. Stine, M. A. Olivares, and M. W. Jenkins. 2010. "Economic Consequences of Optimized Water Management for a Prolonged, Severe Drought in California." *Water Resources Research* 46: W05522, doi:10.1029/2008WR007681.
17. Joyce, B. 2007. Linking CalSim-III to C2VSIM via the Use of Discrete Kernel - (2) Implementation. California Water and Environmental Modeling Forum 2007 Annual Meeting. Feb. 26-28. [www://cwemf.org/Asilomar/CWEMF\\_CBJoyce.pdf](http://www.cwemf.org/Asilomar/CWEMF_CBJoyce.pdf)
18. Jyrkama, M.I., Sykesa, J.F., (2007). *The impact of climate change on spatially varying groundwater recharge in the grand river watershed (Ontario)*. *J. Hydrol.* 338, 237– 250
19. Klemes, V., 2000a. "Sensitivity of Water Resource Systems to Climatic Variability" in V. Klemes, *Common Sense and Other Heresies: Selected Papers on Hydrology and Water Resources Engineering*, Canadian Water Resources Association, Cambridge, Ontario.
20. Klemes, V., 2000b. "Design Implications of Climate Change" in V. Klemes, *Common Sense and Other Heresies: Selected Papers on Hydrology and Water Resources Engineering*, Canadian Water Resources Association, Cambridge, Ontario.
21. Konikow, L.F. y J.D Bredehoeft. (1992) Groundwater models cannot be validated. *Advances in Water Resources*, **15**, 75–83
22. Lettenmaier, D., D. Major, L. Poff, and S. Running, 2008. *Water Resources*. In: *The effects of climate change on agriculture, land resources, water resources, and biodiversity in the United States*. A Report by the U.S. Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research. Washington, DC., USA, 362 pp
23. Lund, J. R., Howitt, R. E., Jenkins, M.W., Zhu, T., Tanaka, S., Pulido, M., Tauber, M., Ritzema, R. and Ferriera, I.: 2003, 'Climate Warming and California's Water Future', Center for Environmental and Water Resources Engineering Report No. 03–1, Dept. of Civil and Environmental Engineering, University of California, Davis, CA, <http://cee.engr.ucdavis.edu/faculty/lund/CALVIN/>
24. Jay R. Lund, Richard E. Howitt, Josué Medellín-Azuara, Marion W. Jenkins. (2009) "*Water management lessons for california from statewide hydro-economic modeling*" A Report for the California Department of Water Resources
25. Medellín Azuara, L.G. Mendoza-Espinosa, J.R. Lund, J.J. Harou, R.E. Howitt(2009). *Virtues of simple hydro-economic optimization: Baja California, Mexico*. *Journal of Environmental Management* 90 (2009) 3470–3478
26. Milly, P.C.D., J. Betancourt, M. Falkenmark, R.M. Hirsch, Z. Kundzewicz, D.P. Lettenmaier, and R.J. Stouffer, 2008. Stationarity is Dead: Whither Water Management. *Science*, 319, 573-574.
27. NLWRA. (2001). Australian Dryland Salinity Assessment 2000. National Land and Water Resources Audit.
28. National Academy of Sciences.(2010). Adapting to the Impacts of Climate Change. NAP Cat number 1278
29. National Research Council, Committee on Hydrologic Science (2011) *Global Change and Extreme Hydrology: Testing Conventional Wisdom*. National Academy Press.
30. Ortuño Gobern. F , (2011). *La recarga artificial de acuíferos en Cataluña y la barrera del Llobregat*. Agencia Catalana del Agua. Jornada sobre la Recarga Artificial de Acuíferos en España. Madrid, 14 de Abril de 2011
31. Pérez Martin, M.A. (2009). Herramientas para la evaluación de los efectos del cambio climático en los recursos hídricos. Jornada "Repercusiones del Cambio Climático en la Planificación y Gestión de los Recursos Hídricos". Universidad Politécnica de Valencia.
32. Pulido, M.A. (2003).- Optimización económica de la gestión del uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas en un sistema de recursos hídricos. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.
33. Reichard, E. G. (2010).- Large-Scale Aquifer Control Using Recycled Water in California. Coastal groundwater for irrigation and supply: sustainable use and remediation actions. Presentation ppt Zaragoza CIHEAM March 2010
34. Sahuquillo, A. (1983).- Panorámica mundial. Tipología del uso conjunto. En Utilización conjunta de aguas superficiales y subterráneas, Servicio Geológico de Obras Públicas y Universidad Politécnica de Valencia, Cap A-1.
35. Sahuquillo, A. 2002.- Conjunctive Use of Surface Water and Groundwater, in Theme 2.9 Groundwater, Edited by Luis Silveira, in UNESCO Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS). Eolss Publishers, Oxford, UK.
36. Sahuquillo, A. (1999).- La calidad y la contaminación de las aguas subterráneas en España. ¿quo vadimus?. En *La Contaminación de las Aguas Subterráneas: Un problema Pendiente* (eds. J. Samper, A. Sahuquillo, J.E. Capilla, J.J. Gómez Hernández). Asociación. Internacional de Hidrogeólogos, G.E-Instituto Tecnológico y Geominero de España. Madrid.
37. Sahuquillo, A. (2002).- Conjunctive Use of Surface

- Water and Groundwater, in Theme 2.9 Groundwater, Edited by Luis Silveira, in UNESCO Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS). Eolss Publishers, Oxford, UK.
38. Sahuquillo, A. (2010). Cap XII. Perspectivas de los modelos de utilización conjunta Modelos de uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas. A. Sahuquillo, E. Cassiraga, A. Solera y J.M. Murillo. Instituto geológico y Minero de España.
39. Sánchez Quispe S.T., J. Andreu y A. Solera., 2001.- Gestión de recursos hídricos con decisiones basadas en estimación del riesgo. *Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos*. Editorial Universidad Politécnica de Valencia.
40. Tanaka, S. K., Tingju Zhu, J. R. Lund, R. E. Howitt, M. W. Jenkins, M. A. Pulido, M. E. Tauber, R. Ritzema and I. C. Ferreira.- (2006). Climate Warming and Water Management Adaptation For California Climate Change. OI: 10.007/s10584-006-9079-5. Springer.
41. van Steenbergen, F and Oliemans, W. (2004). A review of policies in groundwater management in Pakistan 1950-2000. *Water Policy*, Volume 4, Issue 4, 2002, Pages 323-344
42. Winograd, I.J. (1986).- Archeology and public perception of a transcientific problem-disposalo toxic wastes in the unsaturated zone. U.S Geological Survey Circular 990,.
43. Young, C. 2007. Linking CalSim-III to C2VSIM via the Use of Discrete Kernel - (1) Theory. California Water and Environmental Modeling Forum 2007 Annual Meeting. Feb. 26-28. [www://cwemf.org/Asilomar/CWEMF\\_CYoung.pdf](http://www://cwemf.org/Asilomar/CWEMF_CYoung.pdf)