



**Semana temática:** Agua y Ciudad: Pautas de los gobiernos locales para la sostenibilidad

**Eje temático:** Adecuación de los usos del agua al cambio climático

**Título de la ponencia:** Respuestas de adecuación ante los escenarios de cambio climático

**Autores:** Garrote de Marcos, Luis<sup>1</sup>; Martín Carrasco, Francisco<sup>2</sup>; Lama Pedrosa, Beatriz<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Universidad Politécnica de Madrid, ETS Ingenieros de Caminos. Profesor Aranguren s/n 28040 Madrid, Spain, Correo electrónico: [l.garrote@upm.es](mailto:l.garrote@upm.es), Teléfono: 913 366 751

<sup>2</sup> Universidad Politécnica de Madrid, ETS Ingenieros de Caminos. Profesor Aranguren s/n 28040 Madrid, Spain, Correo electrónico: [francisco.martin@upm.es](mailto:francisco.martin@upm.es), Teléfono: 913 366 801

<sup>3</sup> Universidad Politécnica de Madrid, EU Ingeniería Técnica de Obras Públicas. Alfonso XII, 3 y 5. 28014 Madrid, Spain, Correo electrónico: [beatriz.delama@upm.es](mailto:beatriz.delama@upm.es), Teléfono: 913 3367 944

#### **Resumen:**

La perspectiva del cambio climático abre numerosos interrogantes sobre las políticas de adaptación que resultarán más apropiadas a medio y largo plazo en el sector de la gestión de recursos hídricos. A pesar de que existe un amplio consenso en el mundo científico sobre la posible evolución de las temperaturas y precipitaciones a escala regional, resulta todavía muy difícil cuantificar el impacto que éstas tendrán sobre la disponibilidad de recursos hídricos a escala local. Los últimos estudios realizados en España concluyen que el cambio climático supondrá una presión adicional a las muchas que ya se ejercen sobre los sistemas de explotación de recursos hídricos. En esta ponencia se pasa revista a un abanico de medidas de adaptación que se consideran apropiadas para reaccionar a la nueva situación creada por el cambio climático. Estas políticas pueden verse como una colección de buenas prácticas o principios generales, cuya aplicación en el tiempo dependerá en gran medida de la iniciativa de los poderes públicos, de la evolución de la situación climática y de su percepción por parte de los usuarios.

**Palabras clave:** Recursos hídricos, cambio climático, adaptación

## **1. Introducción**

Los recursos hídricos españoles presentan una altísima irregularidad espacio-temporal en régimen natural, especialmente si se compara con las medias europeas. Por este motivo, ha sido necesaria una acusada intervención humana en el ciclo hidrológico, habiendo modificado profundamente sus características naturales. En la actualidad el grado de utilización de los recursos es muy alto en muchas regiones españolas. Junto a ello, los usos del agua tienen una gran trascendencia socioeconómica, especialmente en las zonas donde los recursos son más escasos. Este panorama supone una alta vulnerabilidad frente a posibles cambios climáticos, ya que, si no se modifica la estructura actual de utilización del agua, el margen disponible para la adaptación en algunas zonas es muy restringido.

La detección de los efectos del cambio climático en el ciclo hidrológico entraña una gran dificultad. El seguimiento de la precipitación y los caudales circulantes en los ríos es más difícil que, por ejemplo, el seguimiento de las temperaturas, debido al alto grado de intervención humana en el ciclo hidrológico y la acusada variabilidad hidrológica de los ríos españoles. Por este motivo no existe unanimidad en cuanto a la representatividad de la evidencia señalada en la literatura. Sin embargo, resulta inmediato deducir que las tendencias observadas en variables relacionadas con los recursos hídricos, como precipitación o temperatura, tendrán un efecto que será detectable a largo plazo.

El mejor instrumento disponible en la actualidad para el estudio de los impactos del cambio climático en los recursos hídricos son los modelos climáticos, en los que se estudian las consecuencias de la modificación prevista de la composición química de la atmósfera sobre distintas variables climáticas. En general, y a pesar de las grandes diferencias en cuanto a los escenarios analizados y las metodologías empleadas, los resultados obtenidos sobre los recursos hídricos son cualitativamente coincidentes. Se esperan reducciones de los recursos hídricos en régimen natural en la región mediterránea. La cuantía de la disminución es función de la variación supuesta de temperaturas y precipitaciones, pero resulta ciertamente preocupante en todos los casos. Esto exigirá una actitud decidida por parte de los poderes públicos y de los usuarios de agua para establecer las medidas de adaptación que permitan ir adecuando progresivamente el consumo de agua a las disponibilidades.

En esta ponencia se presentan varias propuestas de actuación en la estructura organizativa y en la planificación y operación de los sistemas de recursos hídricos para conseguir mejorar su potencial para la adaptación al cambio climático. En primer lugar se presentan los resultados de los últimos estudios sobre los impactos del cambio climático en los recursos hídricos. A continuación se realizan unas propuestas de políticas de adaptación, que pueden entenderse como una colección de buenas prácticas o principios generales, cuya aplicación en el tiempo dependerá en gran medida de la iniciativa de los poderes públicos, de la evolución de la situación climática y de su percepción por parte de los usuarios.

## **2. Análisis del impacto del cambio climático sobre los recursos hídricos**

En la actualidad existe un amplio consenso científico sobre la realidad del cambio climático, como se ha puesto de manifiesto en el último informe del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2007). Este consenso es consecuencia, entre otras cosas, de los resultados de los modelos climáticos globales, que permiten estudiar los efectos de la modificación de la concentración de los gases de efecto invernadero sobre el sistema climático del planeta. Según estos modelos, es altamente probable que se produzca un incremento de la temperatura media del planeta, que se distribuirá de manera irregular por las distintas regiones. El efecto sobre las precipitaciones es mucho más difícil de predecir, ya que depende en gran medida de fenómenos locales que no pueden representarse adecuadamente a la escala de trabajo de los modelos de clima.

global. A pesar de esta dificultad, los resultados de la mayor parte de los modelos son concordantes, y tienen a predecir una reducción de precipitaciones en la región mediterránea. Estos dos factores (incremento de temperatura y disminución de la precipitación) tendrán indudablemente efectos sobre los recursos hídricos en la región. Así se comprueba analizando los resultados publicados por los científicos que han estudiado el problema. Por ejemplo, en la Figura 1 se presenta el gráfico extraído último informe del IPCC, que está elaborado a partir del análisis de los resultados de 12 modelos de clima, y en el que se pone de manifiesto que la región mediterránea es una de las zonas del mundo en las que puede producirse un mayor impacto por disminución de la escorrentía.

Aunque resulta muy aventurado extraer conclusiones para territorios del tamaño de las cuencas hidrográficas españolas a partir de este tipo de estudios, sí puede obtenerse información muy relevante sobre el contexto general de la zona geográfica en la que se enmarca nuestro país. Uno de los proyectos que han realizado este tipo de análisis regional es el proyecto PRUDENCE (Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining European Climate change risks and Effects), (Prudence, 2007). *Prudence* es un proyecto de investigación a escala europea, entre cuyos objetivos están la elaboración de proyecciones regionalizadas de cambio climático europeas para 2071-2100 y la valoración de la incertidumbre asociada a las mismas. Desde el punto de vista metodológico, en *Prudence* se han utilizado distintos modelos regionales anidados en modelos globales de clima. Los modelos regionales permiten conseguir una mejor resolución espacial y analizar un mayor número de variables climatológicas para poder concretar las previsiones sobre distintos sectores afectados por el clima.

En la Figura 2 se presenta la distribución espacial de los resultados que el proyecto *Prudence* proporciona para el sector de recursos hídricos en uno de los escenarios de emisiones analizados. En la parte superior se presentan los valores medios de escorrentía (mm/mes) en el escenario de control (1960-1990) y en el horizonte 2070-2100, calculados como promedio de los resultados obtenidos con varios de los modelos regionales empleados en el proyecto. En la parte inferior de la figura se ha incluido la diferencia en los valores medios de generación de escorrentía en términos relativos, expresados en porcentaje sobre los valores del escenario de control. Como puede apreciarse, el impacto es más acusado en la mitad sur peninsular, con porcentajes de reducción de escorrentía que superan el 50% en algunas zonas.

A pesar de la disparidad con la que los modelos representan la situación actual, la mayoría de ellos coinciden en pronosticar una reducción de aportaciones muy acusada en el escenario futuro, como puede apreciarse gráficamente en la Figura 3, donde se comparan los valores de escorrentía media mensual obtenidos en el escenario de control (1960-1990) y en el horizonte 2070-2100 por los distintos modelos del proyecto *Prudence*. Casi todos los modelos coinciden en una reducción próxima al 35%. Esta cifra es ciertamente preocupante, y supone una modificación al alza de las estimaciones realizadas a escala nacional con anterioridad sobre impactos de cambio climático en los recursos hídricos (Ayala-Carcedo e Iglesias, 1996; MMA, 2000; Rodríguez Medina, 2004; Hernández Barrios, 2007).

Esta previsible reducción de los recursos hídricos debida al cambio climático es sólo es una de las muchas presiones a las que debe enfrentarse la gestión del agua en España. La demanda de agua es creciente, especialmente en las zonas donde la escasez es más acusada, al tiempo que crece igualmente la presión social para la mejora de las condiciones medioambientales de las masas de agua. La reducción de las aportaciones naturales produciría un incremento de la frecuencia e intensidad de los episodios de escasez, cuyos efectos sobre la población pueden ser muy acusados. Junto a ello, las perspectivas socioeconómicas apuntan a un aumento de presiones sobre los recursos hídricos: aumento de la demanda urbana, agrícola e hidroeléctrica, intensificación de los procesos que originan el deterioro de la calidad de agua, incremento de la intervención humana sobre el ciclo hidrológico, etc.

### **3. Propuestas de adaptación en el sector de recursos hídricos**

La propuesta de políticas y estrategias de adaptación frente al cambio climático se basa en dos ideas clave, que se presentan a continuación.

En primer lugar, resulta necesario establecer políticas específicas en gestión de recursos hídricos que orienten la evolución del sector en función de las previsiones de cambio climático. A pesar de que los efectos del cambio climático sobre los recursos hídricos pueden ser muy significativos, los efectos de las políticas públicas de gestión pueden ser comparativamente mucho mayores, por lo que existe un gran potencial para orientar a largo plazo una adaptación racional al escenario de cambio climático en el sector que, además de compensar su efectos, pueda incluso mejorar sustancialmente la realidad actual.

En segundo lugar, la mayor parte de los problemas que se anticipan como consecuencia del cambio climático son una intensificación de problemas estructurales debidos a la escasez de agua que ya han aparecido en la actualidad en distintas regiones. Las políticas de adaptación al cambio climático tratan de prevenir y corregir estos problemas, por lo que resultan igualmente efectivas para abordar los problemas de gestión que existen en la actualidad. En consecuencia, la implantación decidida de estas estrategias de adaptación producirá resultados beneficiosos en un amplio rango de escenarios de evolución del clima.

En este sentido, la toma de conciencia social del problema del cambio climático puede resultar una oportunidad apropiada para la corrección de desequilibrios estructurales y para la solución de importantes problemas medioambientales. En algunas cuencas españolas los recursos disponibles pueden incrementarse con facilidad, mejorando la situación de las masas de agua. En otras, la infraestructura existente y las técnicas de gestión convencionales permitirán superar los efectos de las modificaciones de disponibilidad de caudales naturales y las alteraciones de calidad de agua con un coste relativamente bajo. En otros casos, sin embargo, el cambio climático intensificará problemas ya existentes en la actualidad y creará un estado social favorable a la intervención decidida para la corrección de desequilibrios extremos.

Teniendo en cuenta el alto grado de aprovechamiento actual de los recursos hídricos, la necesaria reserva para usos de naturaleza medioambiental y el escaso margen para incrementar la disponibilidad, resulta claro que no podrán mantenerse todos los usos actuales en un escenario de reducción de recursos naturales, por lo que la estrategia futura debe consistir en una reducción progresiva de la demanda y una reasignación de disponibilidades a los usos que socialmente se estimen más adecuados. Para hacer frente al proceso es necesario actuar en distintas líneas, que se esbozan a continuación:

*Planificación territorial:* La planificación hidrológica debe coordinarse con otras políticas sectoriales (energía, medio ambiente, agricultura, etc.) en el marco de la planificación territorial, que establece la distribución espacial de las actividades de acuerdo con los objetivos perseguidos. La planificación hidrológica debe conseguir que los recursos hídricos no sean el factor que impida el desarrollo territorial deseado. Para ello, la planificación territorial debe identificar y priorizar las demandas que deben atenderse, para que la gestión integrada de los sistemas de recursos hídricos se encamine a la satisfacción preferente de las demandas de agua que se consideren de interés social.

*Fortalecimiento de las instituciones:* Es necesario propiciar el fortalecimiento institucional de la Administración Hidráulica en una doble dimensión: diversificación y flexibilización del marco legal y normativo de la gestión del agua y potenciación de las instituciones públicas de gestión para conseguir la reasignación progresiva de usos respetando los derechos actuales. Las funciones que debe desempeñar la Administración Hidráulica en el futuro son sustancialmente diferentes de las

que ha desempeñado en el pasado. Durante el siglo XX, la Administración Hidráulica fundamentalmente estuvo dedicada a incrementar y garantizar la disponibilidad de recursos hídricos mediante la ejecución de obras de infraestructura y el control de los usos. En algunas regiones es posible que se reduzca la disponibilidad efectiva de los recursos hídricos como consecuencia del cambio climático, estando muy limitadas las posibilidades de incrementar la disponibilidad mediante obras de infraestructura. En estas zonas, la Administración Hidráulica deberá ser el gestor público de la escasez. Tendrá como función primordial garantizar la economía y racionalidad en los usos del agua y administrar el reparto de los recursos disponibles entre los distintos usos. Para desempeñar estas funciones primordiales deberá fortalecer su estructura en dos líneas prioritarias de actuación. En primer lugar, habrá que adaptar el marco legal y normativo de la gestión pública del agua a esta situación, desarrollando los instrumentos adecuados en el marco del régimen económico-financiero o en el régimen sancionador, para conseguir potenciar los usos racionales y evitar los usos perjudiciales. En segundo lugar, deberán potenciarse las instituciones públicas de gestión del agua. Es importante que estas instituciones dispongan a medio plazo de los medios necesarios para llevar a cabo sus funciones, especificando claramente sus competencias en relación con otros sectores y administraciones y dotándolas de los medios técnicos y recursos humanos adecuados para el desempeño de las tareas de reasignación de usos.

*Mejora de los procesos de toma de decisiones:* Los métodos y técnicas de la planificación hidrológica han sido desarrollados para situaciones de estacionariedad del régimen hidrológico, y deben adaptarse para tener en cuenta la incertidumbre que el cambio climático introduce sobre la disponibilidad futura de recursos. Desde el punto de vista metodológico, esto exige la revisión de las técnicas de análisis de sistemas hidráulicos y la modificación de los criterios de evaluación y selección de alternativas, estableciendo dos principios básicos: verificar la efectividad de las estrategias de gestión propuestas bajo distintos escenarios posibles y seleccionar la estrategia que responda adecuadamente en todos los escenarios. Posiblemente sea necesario revisar el concepto tradicional de garantía, que surge en un contexto de asignación de los recursos disponibles a los distintos usos. En un escenario de reducción de disponibilidades, no se podrá asegurar el cumplimiento de los criterios de garantía previamente establecidos para todas las demandas, pero esto no quiere la situación del sistema sea inaceptable. Si se establecen, por ejemplo, mecanismos de intercambio de usos que proporcionen a los abastecimientos urbanos recursos destinados a riego durante las situaciones de escasez a cambio de una compensación económica, el agricultor puede tolerar déficits de garantía que en la planificación hidrológica tradicional se consideran inadmisibles. Por este motivo, será necesario desarrollar nuevos criterios de evaluación del comportamiento de los sistemas que permitan mejorar la selección de alternativas y optimizar la toma de decisiones.

*Políticas de gestión de la demanda e incremento de oferta:* Los escenarios de cambio climático que se anticipan en la actualidad prevén una intensificación de los problemas de gestión del agua. Por este motivo, deben intensificarse las políticas que ya están en marcha para el incremento de la oferta de recursos y para la gestión de la demanda de agua, como camino hacia una gestión más eficiente. Las actuaciones de gestión de la demanda permiten reducir su presión sobre las fuentes de suministro, especialmente en épocas de escasez. Pueden aplicarse tecnologías de ahorro que permiten disminuir sustancialmente las dotaciones de riego, lo que exige buscar mecanismos para sufragar el alto coste económico de su implantación y poner en marcha planes de formación para que los agricultores puedan manejar las instalaciones. En medio urbano, las actuaciones pueden basarse en mejorar la información y la educación de los ciudadanos para fomentar o imponer el ahorro de agua, junto con una política adecuada de tarifas y un esfuerzo para mejorar en el rendimiento hidráulico de las redes de distribución. En el campo de la oferta, deberán incrementarse y diversificarse las fuentes de suministro, potenciando el aprovechamiento conjunto de agua superficial y subterránea y los recursos no convencionales, en especial la reutilización de las aguas residuales depuradas. En las zonas que se encuentran ya en la actualidad con graves problemas de escasez, se debe contemplar el desarrollo de nuevas tecnologías para la mejora del

rendimiento energético de la desalinización de agua de mar o salobre como última alternativa para el incremento de disponibilidad de recursos. Todas estas estrategias de adaptación a la escasez supondrán costes significativos: inversión en infraestructuras, externalidades medioambientales, limitaciones al consumo, pérdida de derechos legalmente establecidos, etc., por lo que deberán planificarse adecuadamente, puesto que, una vez que aparezcan los problemas, será muy difícil acometer su solución.

*Fomento de la gestión integrada de los sistemas hidráulicos:* La oferta y demanda de recursos deben gestionarse eficazmente, procurando la ampliación y diversificación de las fuentes de suministro y su integración en sistemas únicos, respondiendo al principio básico de solidaridad para atender el bien común. Los sistemas que integran un número importante de fuentes de suministro y de demandas pueden responder mejor a situaciones de escasez, ya que en ellos es posible el aprovechamiento conjunto de los recursos hídricos, utilizando cada fuente de recursos para los fines que son más apropiados, en función de su cuantía, regularidad y fiabilidad. De igual modo, la integración de demandas de distinta naturaleza en sistemas únicos permite la atención preferente a las demandas prioritarias mediante la reserva de usos o el intercambio de derechos. Para conseguir esta integración de fuentes de suministro y demandas en sistemas más robustos es necesario superar dos obstáculos: debe establecerse un marco normativo apropiado para el intercambio de derechos de uso y debe garantizarse que la utilización alternativa de varias fuentes de suministro pueda ser realmente efectiva. Esto exige una densificación de las redes de transporte y distribución de agua, para conseguir interconectar el mayor número posible de fuentes de suministro y demandas.

*Adaptación inmediata y progresiva:* Es necesario comenzar a implantar las medidas de adaptación, y planificar adecuadamente la intensificación progresiva de dichas medidas en el futuro, en función de la evolución de la situación y de los resultados de las políticas que se vayan aplicando. Para ello, resulta esencial adaptar las redes hidrométricas para realizar un seguimiento del impacto del cambio climático en los recursos hídricos. Será necesaria una profunda revisión de las redes de medida, estableciendo las redundancias suficientes como para poder realizar con garantías la restitución a régimen natural a partir de las observaciones, cerrando los balances en cada una de las subcuencas, lo que permitirá hacer un seguimiento detallado de la evolución de la situación. Igualmente deben potenciarse los sistemas de archivo y recuperación de datos relativos a la gestión del agua, superando las actuales carencias en el control público de los usos del agua. Finalmente, la intensificación de las políticas de adaptación debe basarse en la potenciación de las actividades de I+D+i: apoyo al desarrollo de sistemas que mejoren la eficiencia de los usos del agua en el consumo domiciliario, los procesos industriales y el regadío, las técnicas de tratamiento de aguas residuales, la eficiencia energética de la desalación, la corrección de impactos ambientales de las obras de captación, regulación, depuración y vertido, los métodos y técnicas de planificación hidrológica, los sistemas de soporte de decisión para gestión, el estudio y prevención de sequías e inundaciones, y un largo etc.

#### **4. Conclusiones**

Es conveniente una toma de conciencia sobre los posibles impactos del cambio climático en los recursos hídricos y las medidas de adaptación más apropiadas. Aun reconociendo las limitaciones del estado del arte actual para poder modelizar los procesos de cambio climático y su efecto sobre los recursos hídricos los avisos de la comunidad científica, difundidos por los distintos informes del IPCC, no pueden ser ignorados en los procesos de toma de decisiones sobre gestión de recursos hídricos. En este caso es aplicable el principio cautelar de “más vale prevenir que curar”. En la situación actual aún existe margen para la prevención, pero, si no se comienza a aplicar medidas con carácter inmediato, el coste de la mitigación de los efectos crecerá de manera exponencial. En el sector del agua, el reto al que se enfrenta la sociedad española es de una gran envergadura y exigirá unos altos niveles de planificación, organización, esfuerzo y sacrificio.

## **5. Bibliografía**

Ayala-Carcedo F.J. e Iglesias López A., 1996: *Impactos del cambio climático sobre los recursos hídricos, el diseño y la planificación hidrológica en la España peninsular*. Tecnoambiente, Nº64: 43-48.

Hernández Barrios, L., 2007: *Efectos del cambio climático en los sistemas complejos de recursos hídricos. Aplicación a la cuenca del Júcar*. Tesis Doctoral. ETS Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Valencia.

IPCC, 2007: *Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.

MMA, 2000: *Libro blanco del agua en España*. Ministerio de Medio Ambiente.

Prudente, 2007: *Página web del Proyecto PRUDENCE*. Disponible en <http://prudence.dmi.dk/>

Rodríguez Medina, I., 2004: *Sensibilidad de los sistemas de explotación de recursos hídricos frente al cambio climático en España*. Tesis Doctoral. ETS Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid

## 6. Figuras y tablas

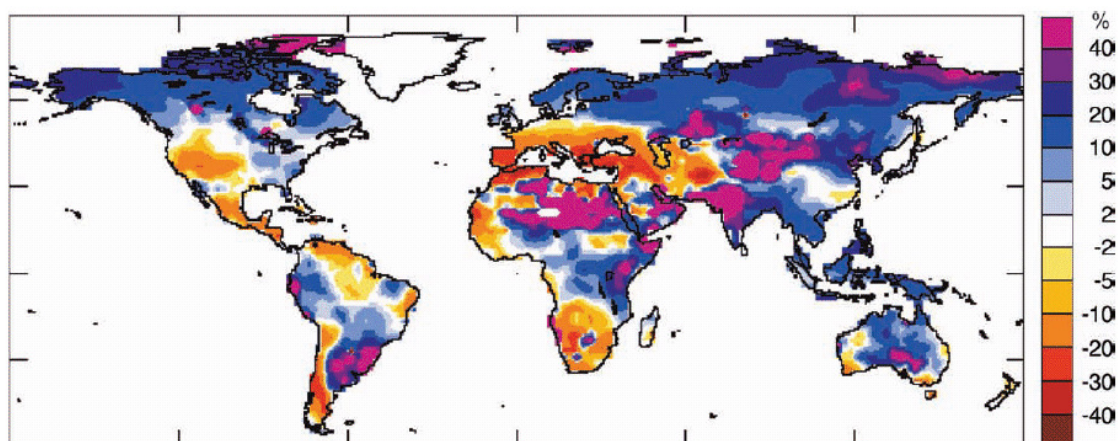


Figura 1. Mapa mundial de variación porcentual de la escorrentía el escenario A1 de SRES, elaborado a partir de los resultados de 12 modelos de clima (IPCC, 2007)

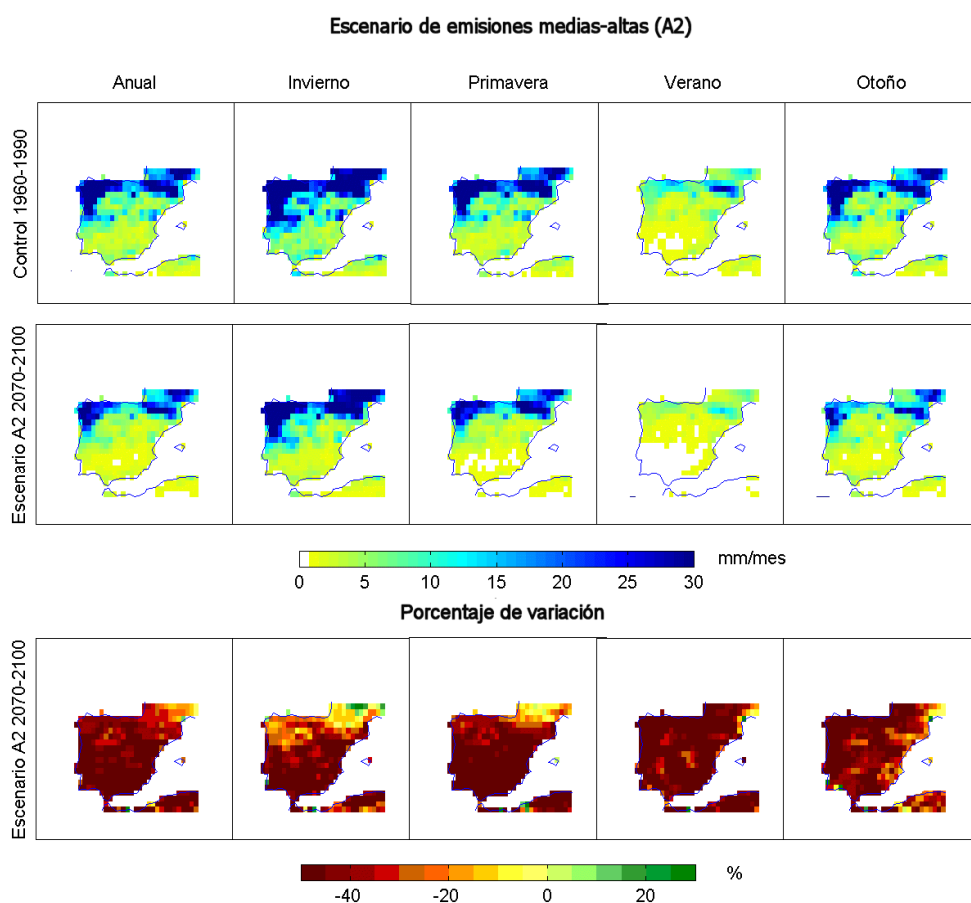


Figura 2. Resultado de las simulaciones de escorrentía en el proyecto PRUDENCE para el escenario de emisiones A2 (media de varios modelos)

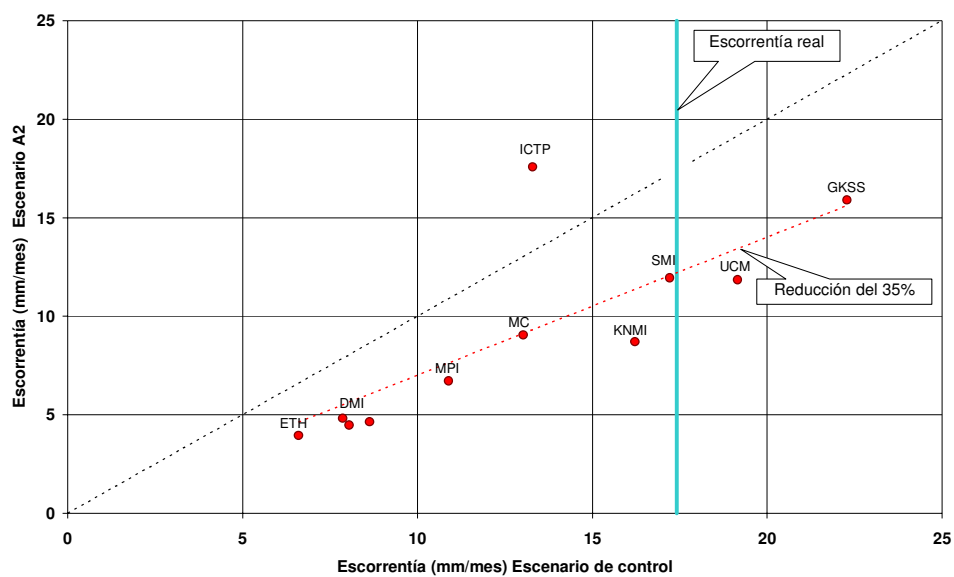


Figura 3. Comparación de la escorrentía media mensual obtenida en el escenario de control y en el escenario A2 en los modelos del proyecto PRUDENCE.