

7. IMPACTOS SOBRE LOS RECURSOS HÍDRICOS

Alfredo Iglesias, Teodoro Estrela y Francesc Gallart

Contribuyentes

J. Andreu Alvarez, L. Hernández Barrios, M. A. Pérez Martín

Revisores

E. Custodio Gimena, F. Ayala Carcedo, V. Fabregat Ventura, O. Llorens García

RESUMEN

El cambio climático con aumento de la temperatura, y en España, disminución de la precipitación, causará una disminución de aportaciones hídricas y un aumento de la demanda de los sistemas de regadío.

Los impactos del cambio climático sobre los recursos hídricos, no solo dependen de las aportaciones que ceda el ciclo hidrológico, condicionadas por el uso y cubierta del suelo, la temperatura y la estructura temporal de la precipitación, sino que es el sistema de recursos hidráulicos disponible y la forma de manejarlo, un factor determinante de la suficiencia o escasez de agua frente a las necesidades humanas globales.

La sensibilidad de los recursos hídricos al aumento de temperatura y disminución de la precipitación es muy alta, precisamente en las zonas con temperaturas medias altas y con precipitaciones bajas. Las zonas más críticas son las semiáridas, en las que las disminuciones de aportación pueden llegar a ser del 50% de los recursos potenciales de la zona.

La temporalidad en la distribución de precipitaciones y temperaturas incide en la generación de recursos hídricos con mayor entidad, en muchas ocasiones, que los mismos valores medios de estos dos parámetros climáticos.

Para el horizonte de 2030, considerando dos escenarios, uno con aumento de 1°C en la temperatura media anual y otro con disminución de un 5% en la precipitación media anual y aumento de 1°C en la temperatura, son esperables disminuciones medias de aportaciones hídricas en España, en régimen natural, entre un 5 y un 14%. Las cuencas del Guadiana, Canarias, Segura, Júcar, Guadalquivir, Sur y Baleares son aquellas donde el impacto sobre los recursos hídricos se manifestaría más severamente.

Para el horizonte de 2060 y con un escenario de 2,5 °C de elevación de las temperaturas y un 8% de disminución de las precipitaciones se prevé una reducción global de los recursos hídricos del 17% como media de la Península junto a un aumento de la variabilidad interanual de los mismos. Estos cambios serán mayores en la mitad sur de España.

Con un escenario extremo (poco probable) en el que se suponga una disminución del 15% de la precipitación media anual y un aumento de 4°C de la temperatura, la aportación total variaría entre un 5% en Galicia Costa, un 22% en Guadiana II 20% en la cuenca del Júcar, y un 20% en las C.I. Cataluña.

Las principales opciones paliativas van encaminadas a la optimización del uso del agua (gestión de la demanda), la mejora del sistema de recursos hidráulicos y su gestión, en particular del agua subterránea, y al aumento de los recursos no convencionales, cosecha de agua de lluvia o rocío, trasvases entre cuencas, desalación y reutilización.

La variación de los recursos hídricos a consecuencia del cambio climático está condicionada por la influencia de otros sectores también afectados por el cambio climático. A su vez los cambios que se producen en los recursos hídricos afectan a muchos otros sectores de una forma importante, siendo clara y notable en los ecosistemas acuáticos y continentales, en la biodiversidad animal y vegetal, en los sectores agrícola, forestal, energético y turístico, en la salud humana y en los riesgos naturales de origen climático.

En la estimación de recursos hídricos a consecuencia del posible cambio climático existen incertidumbres inherentes tanto a los datos de base, como al proceso de generación de

recursos, siendo los primeros de mayor importancia relativa. Se destacan entre estas incertidumbres los escenarios previsibles, la distribución espacial y temporal de la precipitación, el comportamiento del uso y cubierta del suelo y la recarga de acuíferos y las limitaciones de los modelos de simulación.

El cambio que experimentan los recursos hídricos es detectable con el hábito de medidas establecido en España mediante los sistemas de control, que en unos casos están bien implantados o en vía de mejora y en otros se recomienda su implantación más generalizada. Entre estos últimos se debe mencionar la conveniencia de diseñar e implantar, o mejorar claramente la implantación, de las redes de control de usos del agua, superficiales y subterráneas, y de la red de medidas de caudales en fuentes y surgencias.

La disminución de recursos hídricos incide en un gran número de sectores, cuya regulación se lleva a cabo mediante la definición de políticas concretas. El cambio implicará necesariamente la remodelación y redefinición de nuevas políticas como la científica tecnológica, hidráulica, energética, agrícola, medioambiental y planificación del territorio.

Ante el cambio climático se perfilan como importantes y necesarias las investigaciones tendentes a mejorar las previsiones de precipitaciones y temperaturas y su distribución espacial y temporal, las tendentes a definir métodos de generación de series de datos climáticos basadas en los escenarios, las que propicien mejores y más fiables métodos de evaluación de evaporaciones y evapotranspiraciones, juego de agua en el suelo, interceptación y reserva de agua utilizable por las plantas, las destinadas a conocer con más fiabilidad la recarga de acuíferos y el desarrollo de modelos para automatización de cálculo de aportaciones y modelos de gestión en cuencas.

7.1. INTRODUCCIÓN

7.1.1. Planteamiento general de los impactos del CC sobre los recursos hídricos

Los recursos hídricos disponibles por la humanidad provienen de un desequilibrio en los continentes, entre el agua de precipitación y la que se evapora o evapotranspira, claramente favorable a la primera que los hace excedentarios. En los océanos el fenómeno es inverso, son deficitarios y la evaporación es aproximadamente un 10% superior a la precipitación. El excedente de los continentes discurre al mar por los ríos y restituye el déficit de los océanos. (Figura 7.1.)

Los recursos hídricos potenciales de que dispone la humanidad para cubrir sus necesidades de todo tipo, depende precisamente de esos excedentes en los continentes, entre el agua de precipitación y el agua que vuelve a la atmósfera.

El agua existente en la naturaleza es constante, por el principio de conservación de la masa, constituyendo un ciclo donde pasa continuamente de estado líquido o sólido a vapor y viceversa. El clima gobierna este ciclo y por tanto los cambios climáticos arrojan necesariamente cambios en el tiempo y en el espacio de los recursos hídricos disponibles.

Cambios en la precipitación condicionan directamente el agua que cae sobre los continentes y cambios en las temperaturas modifican los valores de evaporación y evapotranspiración quedando alterada la cantidad y característica de las escorrentías.

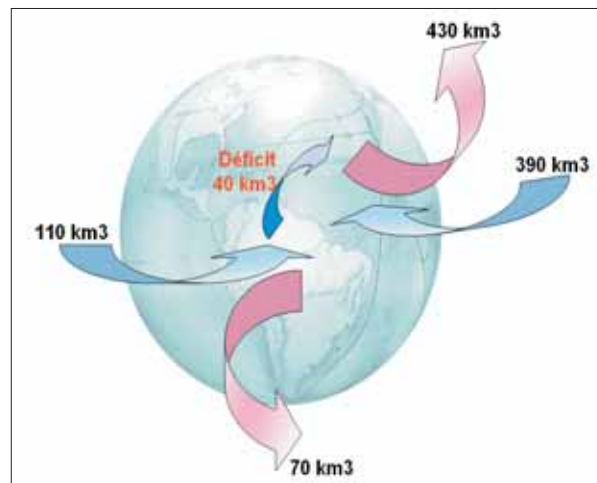


Fig. 7.1. Balance hídrico global (en miles de km³).

En el fenómeno de generación de la escorrentía, el suelo juega un papel de primera importancia mientras que el subsuelo condiciona la parte de esta escorrentía que será subterránea al infiltrarse en los acuíferos.

Habida cuenta de que solo se produce escorrentía cuando el suelo tiene excedentes, o bien la intensidad de precipitación es superior a la capacidad de infiltración, hay que admitir que la distribución temporal y el régimen de las precipitaciones incide sobre la generación de escorrentía tanto o más que el volumen de precipitación en sí mismo.

El Cambio Climático tiene, en consecuencia, una influencia directa y de suma importancia sobre los Recursos Hídricos. Los impactos sobre estos recursos se manifestarán no solo en la

variación de la cantidad sino también en la alteración de la calidad y en su distribución temporal.

Un volumen menor de agua disponible, provocaría el empeoramiento de la calidad de las aguas (Programa Nacional del Clima, MOPTMA 1995) y fenómenos como el aumento del nivel del mar asociados al calentamiento global y el descenso de niveles piezométricos en acuíferos conectados hidráulicamente con el mar favorecería los fenómenos de contaminación por intrusión marina.

Las aportaciones hídricas, entendidas como el volumen total de agua contabilizable anualmente en un punto de una cuenca hidrográfica en régimen natural, están inicialmente condicionadas, por la precipitación, la temperatura, el uso y cubierta del suelo y las características del suelo y subsuelo.

Los recursos hídricos, propiamente dichos, entendidos como los volúmenes de agua capaces de dejar satisfechas las necesidades hídricas en cantidad y calidad, en tiempo y en espacio están a su vez condicionados por la explotación, la estructura temporal de la demanda, el sistema de recursos hidráulicos (superficial y subterráneo) disponible y las reglas operativas definidas para el sistema o reglas de gestión del sistema.

Es en definitiva la labor de regulación, suministro, transporte, distribución y protección de la calidad de los Sistemas de Recursos Hidráulicos, tanto superficial como subterráneo, y la manera de manejarlo, lo que constituye el último paso, o grupo de factores, condicionantes de los recursos hídricos realmente aprovechables

Esto trae como consecuencia que existan dos grupos de factores que inciden directamente en la cantidad y calidad de recursos hídricos disponibles los endógenos y los exógenos. (Figura 7.2).

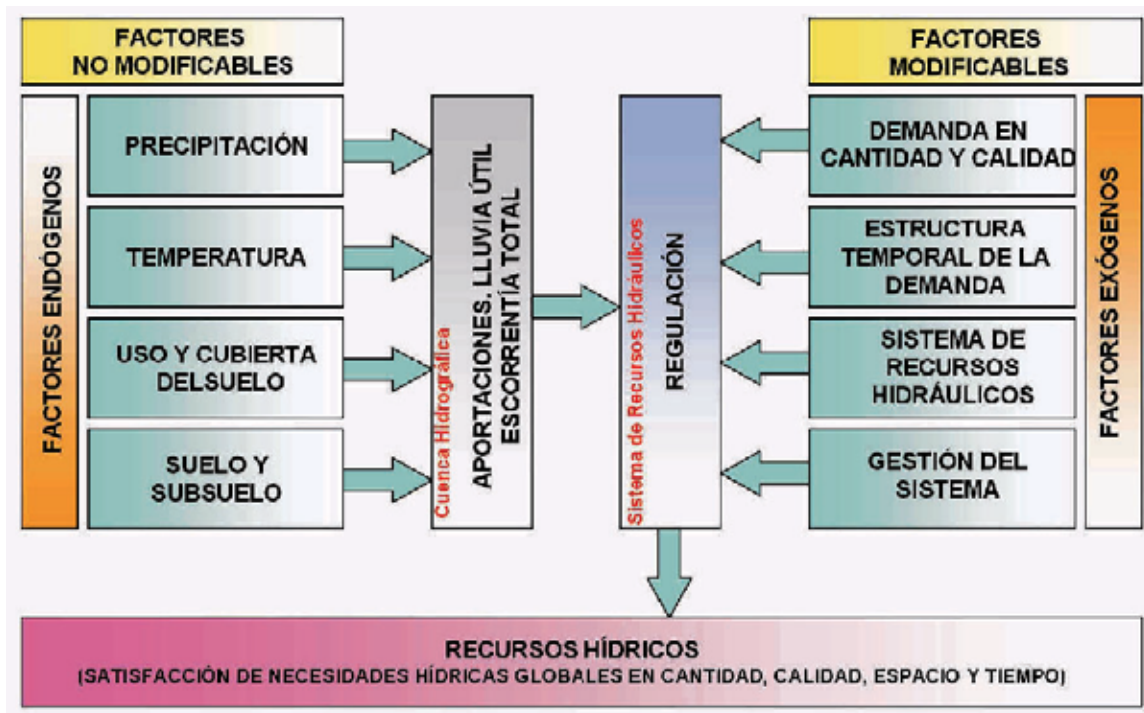


Fig. 7.2. Cuadro de factores que intervienen en la generación de recursos hídricos.

* Factores condicionados a la gestión del territorio, usualmente no integrada en la gestión de los recursos hídricos.

Los primeros tienen la característica de no ser modificables por la acción del hombre y en consecuencia son responsables directos de la variación de las aportaciones en el ciclo hídrico. Solamente hay que exceptuar el uso y cubierta del suelo, factores que condicionan apreciablemente las aportaciones (Bosch y Hewlett 1982) pero cuya gestión se suele llevar a cabo independientemente de la gestión de los recursos hídricos. Estas aportaciones se adecuan a la demanda y su estructura haciendo uso de los sistemas de recursos hidráulicos (superficiales y subterráneos), que son manejados de una manera adecuada mediante las normas de gestión que con frecuencia son diseñadas con el apoyo de los modelos de gestión.

En esencia el cambio climático con aumento de temperatura, y en España, disminución de la precipitación, causará una disminución de las aportaciones hídricas y un aumento de la demanda de los sistemas de regadío. Sin embargo el impacto real dependerá del sistema de recursos hidráulicos disponible y de la manera de manejar el sistema.

Demanda y su estructura, sistema y su manejo son los factores exógenos y modificables que pueden permitir la corrección o adecuación del impacto causado.

Sobre la demanda y su estructura caben acciones de optimización del uso del agua.

Sobre el sistema y su manejo caben opciones de modificación o ampliación del sistema, o bien de mejora de su manejo mediante las operaciones apoyadas por las herramientas de la gestión. (Figura 7.3).

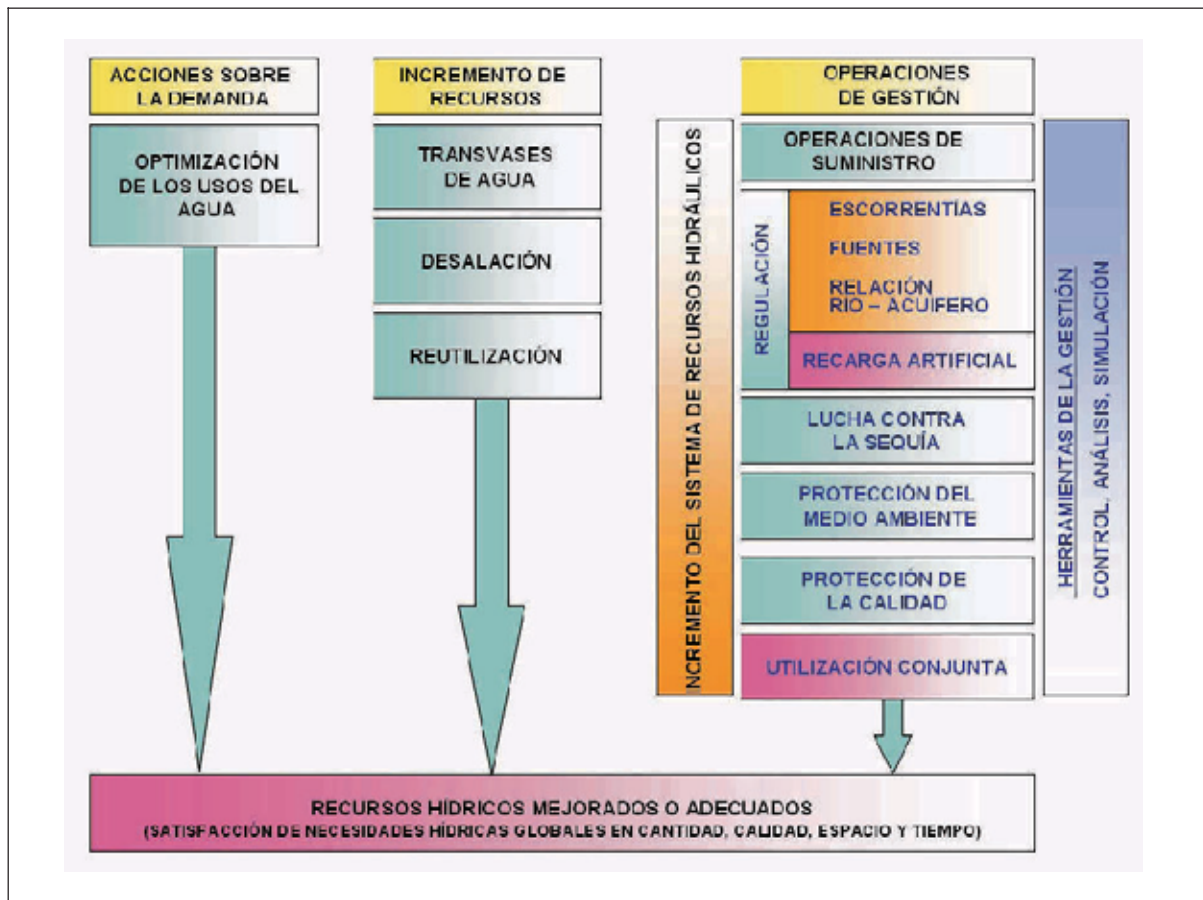


Fig. 7.3. Cuadro de posibles acciones correctoras en base a la gestión.

Además de esto siempre cabe la opción, con frecuencia más costosa, de incrementar los recursos disponibles con acciones de trasvase entre cuencas, desalación de aguas salobres o de mar y reutilización de recursos con todos los cuidados y precauciones que ello conlleva.

Una conclusión clara respecto a los impactos del cambio climático sobre los recursos hídricos, es que se trata de un sistema con un elevado grado de incertidumbre. Los recursos no solo dependen de las aportaciones que ceda el ciclo hidrológico, condicionadas por la cantidad y estructura temporal de la precipitación, la temperatura y el uso y cubierta del suelo, mientras que la demanda depende no solamente del clima sino también de los cambios técnicos y socio-económicos que vayan a producirse en el futuro. Por último, es el sistema de recursos hidráulicos disponible y la forma de manejarlo quien, en última instancia, condiciona la suficiencia o escasez de agua frente a las necesidades.

Las conclusiones del proyecto ACACIA en Europa (Parry 2000) respecto a la gestión del agua no son precisamente alentadoras: *“In the water sector, the major policy implication of climate change is that it is no longer possible to assume that the future hydrological resource base will be similar to that of the present. This is important in the context of sustainable water management. Water managers, at all levels, therefore need to (a) develop methodological procedures for adopting a scenario-based approach to strategy or scheme assessment, and (b) develop adaptive techniques that allow incremental adjustments over time. A second major implication is that the amount of climate change might make it more difficult to move to more sustainable management of water resources, particularly in the south of Europe”*.

Una conclusión clara respecto a los impactos del cambio climático sobre los recursos hídricos, es que estos no solo dependen de las aportaciones que ceda el ciclo hidrológico, condicionadas por el suelo, la temperatura y la estructura temporal de la precipitación, sino que es el sistema de recursos hidráulicos disponible y la forma de manejarlo, es el conjunto de factores que en última instancia condicionan la suficiencia o escasez de agua frente a las necesidades humanas globales.

7.1.2. Recursos hídricos en España. Aguas superficiales y subterráneas

Las aportaciones de los ríos al mar en España, han tenido una buena contabilidad a lo largo del tiempo, debido al alto grado de desarrollo del Sistema de Recursos Hidráulicos y a la importancia de disponibilidad de agua en la economía nacional. Sin embargo, la red foronómica no está diseñada para conocer la respuesta hidrológica de los sistemas naturales, sino que está claramente orientada a la gestión operativa de la parte superficial de los recursos.

Por lo tanto, teniendo en cuenta el alto uso del agua en España, no resulta fácil calcular las aportaciones de los ríos en régimen natural, dado que los caudales que se miden en ellos estarán alterados por las sustracciones para los diversos usos y aplicaciones del agua. Las evaluaciones en régimen natural no se realizan a partir de datos foronómicos sino mediante la utilización de modelos precipitación-escorrentía.

El Libro Blanco del Agua, MIMAM 1998, recoge los datos de las evaluaciones realizadas desde 1967 (Tabla 7.1) donde pueden apreciarse las escasas diferencias entre las realizadas para cada año, hecho que las hace fiables y consistentes.

Estas cifras representan las escorrentías totales, que incluyen aguas superficiales y subterráneas, debiendo entenderse que de las cifras dadas, una parte será escorrentía estrictamente superficial y la otra subterránea.

Sin embargo, hay varios estudios que señalan un descenso significativo de los aportes de los ríos principales durante la segunda mitad del siglo XX (figura 7.4), algunos de los cuales no

pueden justificarse por aumento de los usos consuntivos (Prieto 1996; Flores-Montoya *et al.* 2003; García-Vera *et al.* 2003).

Tabla 7.1. Estimación de las aportaciones totales en régimen natural.

Ámbito de Planificación	1967 (a)	1980 (b)	1993 (c)	1998 (d)	1998 (e)
Norte	37.500	38.700	42.088	42.258	44.157
Duero	13.200	15.900	15.168	15.168	13.660
Tajo	8.920	10.250	12.858	12.230	10.883
Guadiana	4.895	5.100	6.155	6.168	5.475
Guadalquivir	7.300	9.400	7.771	7.978	8.601
Sur	2.150	2.690	2.418	2.483	2.351
Segura	884	960	1.000	1.000	803
Júcar	2.950	5.100	4.142	4.142	3.432
Ebro	17.396	18.950	18.198	18.217	17.967
C.I. Cataluña	1.700	3.250	2.780	2.780	2.787
Total Península	96.895	110.300	112.588	112.424	110.116
Baleares	-	690	745	562	661
Canarias	-	965	965	826	409
Total España	-	111.955	114.298	113.812	111.186

(a) PG (1967). Recursos Hidráulicos. II Plan de Desarrollo Económico y Social. Presidencia de Gobierno.

(b) MOPU (1980). El agua en España.. CEH. DGOH. También en Heras (1977).

(c) MOPTMA (1993b) Memoria del anteproyecto de Ley del PHN.

(d) 1998 Datos de los Planes Hidrológicos de cuenca.

(e) 1998 Datos de la evaluación realizada en el Libro Blanco del Agua.

Nota: La cifra del Plan de cuenca (columna d) del Ebro no incluye los recursos del Garona y Gallocanta.

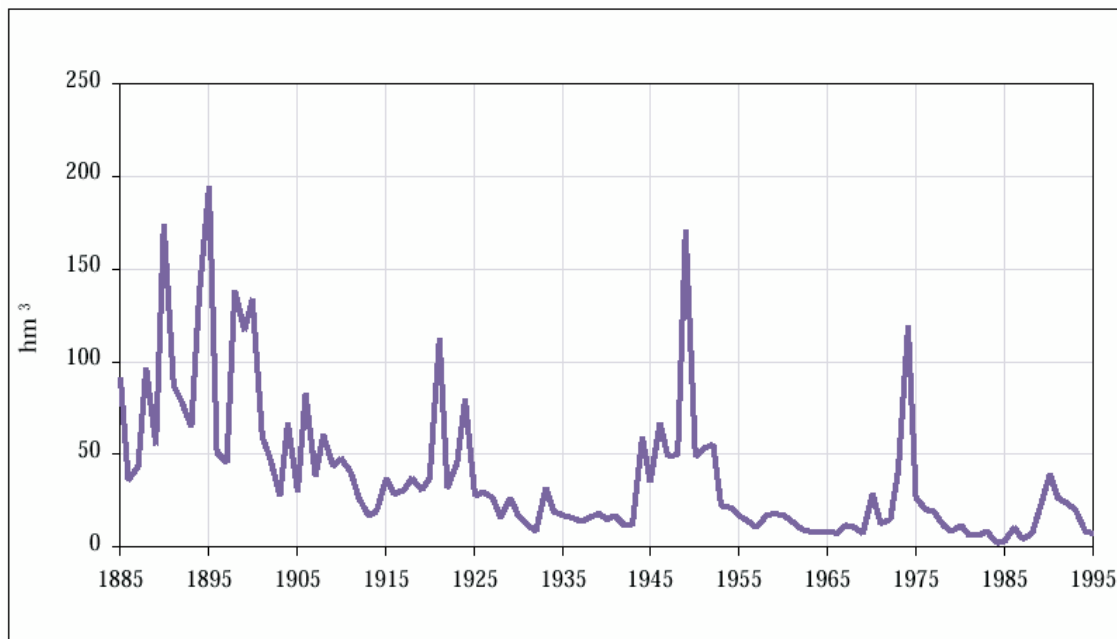


Fig. 7.4. Serie de aportaciones anuales del río Guadalestín en la presa de Puentes desde 1885 (MMA 1998).

Los valores de escorrentía subterránea también han sido evaluados en múltiples ocasiones con suficiente rigor, principalmente en los estudios regionales del Plan Nacional de Investigación de Aguas Subterráneas, IGME. Se adjunta en la tabla 7.2, los valores de aportaciones subterráneas para las cuencas hidrográficas de los grandes ríos españoles, sintetizados en el Libro Blanco de las Aguas Subterráneas (MOPTMA- MINER 1994).

Tabla 7.2. Estimación de las aportaciones subterráneas. Fuente: Planes de cuenca y Libro Blanco de las Aguas Subterráneas (MOPTMA-MINER 1994).

Ámbito de planificación	Superficie permeable aflorante (km ²)	Recarga por lluvia y cauces (hm ³ /año)	Recarga por riegos (hm ³ /año)
Norte	5.618	2.997	0
Duero	52.799	1.840	1
Tajo	17.475	1.565	0
Guadiana	14.754	787	20
Guadalquivir	15.140	2.573	16
Sur	5.305	865	69
Segura	6.958	674	83
Júcar	23.781	3.011	480
Ebro	17.057	4.433	586
C.I. Cataluña	6.616	938	45
Total Península	165.503	19.683	1.300
Baleares	3.674	517	69
Canarias	7.384	681	0
Total España	176.561	20.881	1.369

En definitiva los ríos españoles aportan al mar en régimen natural unos 110.000 hm³/año de los que unos 90.000 hm³ son escorrentía estrictamente superficial y los otros 20.000 hm³ han transcurrido por los acuíferos y son de origen subterráneo, aunque la estabilidad temporal de estos aportes no ha sido suficientemente estudiada.

7.1.3. Heterogeneidad espacial y temporal de los recursos hídricos en España

La heterogénea distribución espacial y temporal de la precipitación en España, mucho más acusada que en otros países de nuestro entorno, trae como consecuencia una extraordinaria variabilidad de las aportaciones a lo largo del tiempo y también una gran variación de aportaciones en las diversas cuencas hidrográficas.

	ESCORRENTÍA TOTAL	USOS TOTALES
CUENCA NORTE	39.000 hm ³ /año	930 hm ³ /año
CUENCA SEGURA	900 hm ³ /año	1.300 hm ³ /año

Fig. 7.5. Comparaciones entre aportaciones y usos del agua entre cuencas de la España “seca” y “húmeda”.

En la Figura 7.5, se plasman las necesidades y las escorrentías de dos cuencas españolas; Norte y Segura, donde se pone de manifiesto la diferencia en las situaciones para hacer frente a las demandas hídricas. Estas diferencias han sido las responsables de la existencia de las España “seca” y “húmeda”.

Tomando como referencia los cuadros del Libro Blanco del Agua, MMA 1998, Figura 7.6 y Figura 7.7, pueden verse las extraordinarias diferencias entre las escorrentías de una y otra cuenca y la variabilidad de la aportación en el tiempo.

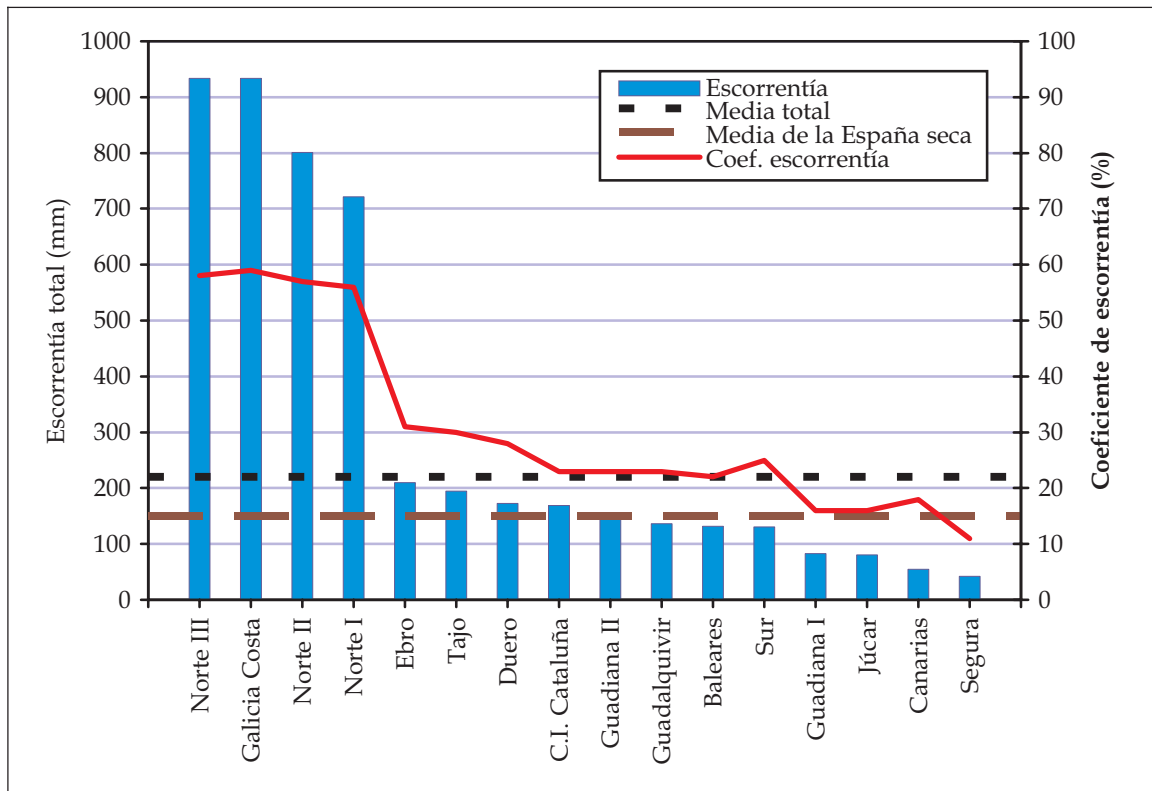


Fig. 7.6. Escorrentías medias totales anuales (mm) y coeficientes de escorrentía en régimen natural en los diferentes ámbitos territoriales de los Planes Hidrológicos. Según Libro Blanco del Agua. MMA 1998.

Las cuencas del Norte tienen excelentes valores de escorrentía frente a las demás y principalmente las del Segura, Júcar, Canarias y Guadiana I. Pero es precisamente en estas últimas cuencas, donde los usos consuntivos del agua, principalmente en regadío son más elevados.

La Figura 7.7. muestra los valores de la escorrentía en España, simulada en régimen natural para la serie 1940/41-1995/96, donde pueden verse mínimos de 50.000 hm³/año y máximos de 220.000 hm³/año, para una media de 110.000. Esto, la heterogeneidad temporal es otro de los grandes problemas de los recursos hídricos en España; la certeza de lo que aportará el ciclo hidrológico cada año es un factor de incertidumbre de muy alta incidencia. A estos problemas de base solo se les puede hacer frente gracias a un sistema de recursos hidráulicos de envergadura y además convenientemente manejado.

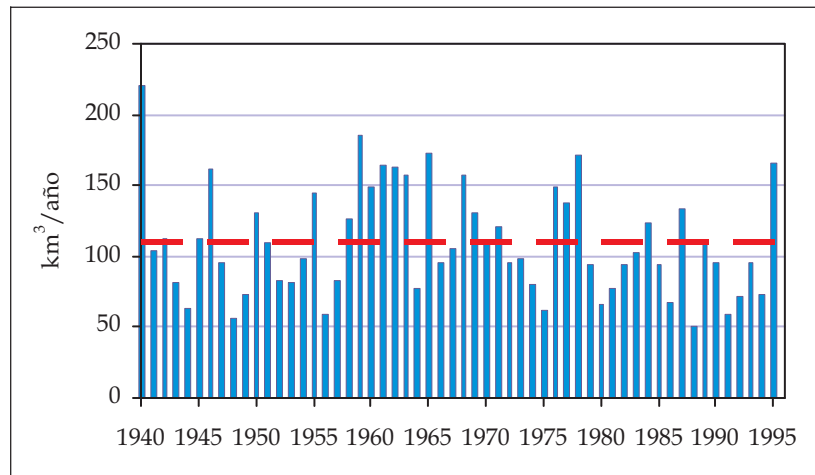


Fig. 7.7. Serie de aportaciones totales anuales en régimen natural en la España peninsular (periodo 1940/41-1995/96).

7.1.4. Usos y aplicaciones del agua en España

España es un país con una enorme tradición en materia de usos del agua. Principalmente su desarrollada agricultura y alto potencial hidroeléctrico han condicionado la construcción de una gran cantidad de embalses y captaciones de aguas subterráneas.

En muchos regadíos existen vestigios romanos y seguramente se iniciaron en tiempos anteriores, pero fueron los aprovechamientos hidráulicos de los árabes los que dieron origen a las ricas y fecundas vegas de Granada, Valencia, Murcia y Aragón.

El origen del espectacular desarrollo actual hay que buscarlo seguramente en algunos hombres públicos del último tercio del siglo XIX, singularmente Joaquín Costa y Macías Picavea, que propugnaron una decidida acción de gobierno en el sentido de regular las aportaciones hídricas y ampliar las zonas regadas como meta preferente de la política económica general.

En el cuadro de la Figura 7.8, se sintetizan algunos de los problemas seculares del uso del agua en España.

EL CLIMA:	Factor de desarrollo y factor de agresión
PRECIPITACIONES:	Bajas y anárquicas en tiempo y espacio
ESTRUCTURA ECONÓMICA:	Fuerte participación agrícola y turística
DOTACIONES DE LOS CULTIVOS:	Altas
ESCORRENTÍAS DE ESTÍO:	Bajas
EL DESARROLLO ECONÓMICO:	Rápido
EL PODER:	Caos, freno, confusión y "sobreexplotación"

Fig 7.8. Cuadro de problemas seculares del uso del agua en España.

Sin embargo el uso del agua en España ha tenido siempre unos problemas muy conocidos principalmente debidos a su clima, en gran parte semiárido, a la heterogeneidad espacial y temporal de la precipitación y, desde luego a su estructura económica con fuerte participación

agrícola, que demanda grandes volúmenes de agua justo en las épocas de estío, cuando no la hay.

Algunos ejemplos muy significativos permiten comprender las dificultades y complejidades del uso del agua en España, y sobre todo el extraordinario volumen de agua que se precisa con carácter anual.

En la Figura 7.9 se exponen estos ejemplos; en el primero se puede ver (Moreno Torres 1982) como en España la parte de superficie regable que es efectivamente regada, dobla a la media mundial. Un uso consuntivo como es el regadío está tan extendido en nuestro país que los afanes por esta actividad son el doble que la media de los demás países.

En el segundo caso se hacen algunas comparaciones globales, muy generales, entre los usos del agua y las aportaciones de España y Francia.

Francia, un país más grande en extensión y con un desarrollo superior al español, tiene unos usos totales del agua muy inferiores y sin embargo las aportaciones de los ríos franceses son sustancialmente superiores a la de los españoles.

En este contexto Francia, consume en regadíos el 25% que España, siendo el uso para regadíos el más difícil de dejar satisfecho, dado que las demandas de agua son en estío mientras las aportaciones se generan en épocas húmedas.

	MUNDO	ESPAÑA
SUPERFICIE CULTIVADA	4.000 M ha	21 M ha
SUPERFICIE REGABLE	1.000 M ha	5 M ha
SUPERFICIE REGADA	250 M ha (25%)	2.5 M ha (55%)

	FRANCIA	ESPAÑA
USOS TOTALES (1975)	15 km ³	25 km ³
USOS AGRÍCOLAS	5.2 km ³	21.5 km ³
ESCORRENTÍA TOTAL	180 km ³	110 km ³
CAPACIDAD DE EMBALSE	7 km ³	40 km ³

Fig 7.9. Comparaciones de los usos del agua en España y en Francia y la frecuencia de regadíos españoles con algunas cifras a nivel mundial.

Esto hace que mientras el sistema español de recursos hidráulicos sea algunos años insuficiente con más de 40 km³ de capacidad de embalse, el sistema francés sea muy suficiente con solo 7 km³.

En la tabla 7.3 se detallan los aportes totales anuales, los consumos netos una vez descontados los retornos, y la relación entre consumos netos y aportes totales.

Tabla 7.3. Aportes y consumos anuales. Fuente: Libro Blanco del Agua en España, MMA (1998).

ámbito	aportes hm ³	consumo hm ³	relación %
Norte III	5.614	98	2
Galicia Costa	12.245	479	4
Norte II	14.405	145	1
Norte I	13.147	403	3
Ebro	18.647	5.361	29
Tajo	11.371	(1) 2.328	20
Duero	14.175	2.929	21
C.I. Cataluña	2.728	493	18
Guadiana II	1.053	121	11
Guadalquivir	9.09	2.636	29
Baleares	696	171	25
Sur	2.359	912	39
Guadiana I	4.624	1.756	38
Júcar	3.335	1.958	59
Canarias	394	244	62
Segura	(1) 1.411	1.350	96
España	113.998	20.613	18

(1) Se ha tomado el valor nominal de 600 hm³ del ATS

El consumo del 20% de los recursos hidráulicos renovables totales se considera como el límite de la sobreexplotación de un sistema (Falkenmark y Lindh 1976). Según este criterio, y tomando los aportes medios anuales como recursos totales, la mayor parte de las cuencas sobrepasan el límite de la sobreexplotación.

En resumen, puede indicarse que en España, los recursos de agua están sobreutilizados en la mayor parte de las cuencas y que principalmente la agricultura es un uso prioritario que no solo demanda volúmenes muy grandes sino que los demanda en las épocas que no los proporciona el ciclo hidrológico, requiriéndose un bien desarrollado sistema de recursos hidráulicos, para poder hacer frente a las necesidades planteadas.

Un país de estas características se hace muy sensible a las disminuciones que puedan presentar los recursos hídricos inherentes al cambio climático.

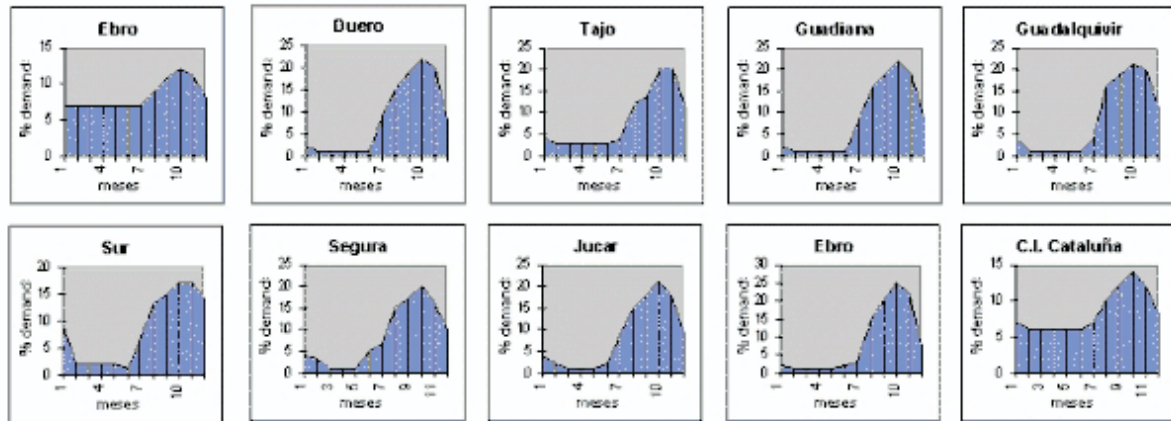
7.1.5. El binomio recursos- demandas, regulación y sistemas de recursos hidráulicos

Dejar satisfechas las necesidades hídricas en cantidad, calidad, espacio y tiempo implica disponer de un sistema de recursos hidráulicos, que permita adecuar las aportaciones a la estructura de la demanda. Aportaciones cuya estructura temporal está condicionada por el ciclo hidrológico y demandas, cuya estructura viene fijada por los diversos usos y aplicaciones del agua.

Los recursos hídricos en España, se presentan generalmente bajos para las épocas en que se precisan. Baste indicar que de los 110.000 hm³ que suponen la escorrentía total anual, solo unos 10.000 discurren por los ríos en los meses de estío, donde los usos agrícolas demandan más de 24.000 hm³.

En la Figura 7.10 se representa la distribución porcentual de la demanda en las diversas cuencas españolas, donde puede verse su heterogeneidad y falta de regularidad.

Cuenca	Oct.	Nov.	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	
Norte	7	7	7	7	7	7	7	9	11	12	11	8	100
Duero	2	1	1	1	1	1	9	15	19	22	20	8	100
Tajo	4	3	3	3	3	3	4	12	14	20	20	11	100
Guadiana	2	1	1	1	1	1	6	16	19	22	19	9	100
Guadalquivir	4	1	1	1	1	1	4	16	19	21	20	11	100
Sur	9	2	2	2	2	1	6	13	15	17	17	14	100
Segura	4	3	1	1	1	5	7	15	17	20	16	10	100
Júcar	4	2	1	1	1	2	6	15	16	21	18	9	100
Ebro	2	1	1	1	1	2	3	15	20	25	22	7	100
C.I. Cataluña	7	6	6	6	6	6	7	10	12	14	12	8	100



* Meses de octubre a septiembre

Fig. 7.10. Distribución porcentual de la demanda en las diversas cuencas españolas.

Existen cuencas como Ebro, Guadalquivir y Guadiana que prácticamente el 90% de sus necesidades se centran en los meses de mayo a septiembre. Este cuadro de heterogeneidad temporal, no parece que pueda hacer otra cosa que agravarse ante las perspectivas de heterogénea distribución de la precipitación que se presenta con el cambio climático. En síntesis, la regulación en España, para dejar satisfechas las necesidades hídricas, es una regulación dura y difícil, siendo previsible que el cambio climático empeore la situación.

7.2. SENSIBILIDAD AL CLIMA ACTUAL

7.2.1. Relaciones entre clima, suelo, usos del suelo y aportación. Índices de escorrentía

Tal y como se ha indicado, la generación de aportaciones esta fundamentada en el juego entre el binomio clima y superficie (suelo y cubierta). La capacidad de retener agua por parte del suelo, y de ser utilizada por las plantas, trae como consecuencia que el agua de precipitación, o una parte de ella quede retenida a expensas de que las plantas la evapotranspiren. La reserva de agua utilizable por las plantas, que es función de la capacidad de campo, punto de marchitez permanente, densidad aparente y profundidad radicular media, incorpora agua de precipitación y devuelve agua a la atmósfera por evapotranspiración de un modo continuo llenándose o vaciándose, según sean superiores las entradas o las salidas, hasta que se llega a un punto en que el suelo no admite mas agua, se llena la reserva y se genera la escorrentía o la recarga de los acuíferos con los excedentes. Las características de la vegetación también determinan los intercambios de agua y energía, no sólo por la profundidad de las raíces sino también por la biomasa aérea y la rugosidad aerodinámica.

El índice de escorrentía de una cuenca, entendido como la relación entre la aportación o escorrentía medida en una cuenca y el volumen de precipitación total caída sobre ella, varía en consecuencia siendo menor cuanto menor es la precipitación y mayor la evapotranspiración potencial inherente a la elevación de temperaturas. El índice de escorrentía también aumenta, a iguales condiciones climáticas, con las características de los suelos o de la vegetación que

disminuyen los retornos a la atmósfera, como el menor espesor de suelo, la menor capacidad de campo, o también la menor profundidad radicular media, biomasa aérea o rugosidad aerodinámica.

7.2.2. Estudio de la sensibilidad unitaria. Influencia sobre la aportación de las variaciones unitarias de la temperatura media y la precipitación anual.

Siempre a efectos de orientación teórica, pueden buscarse procedimientos para la estimación de cual puede ser la sensibilidad de la aportación a variaciones unitarias en los parámetros del cambio climático, precipitación y temperatura.

Con esta óptica, se han efectuado los cálculos de esorrentía, por el método de Turc, para valores de precipitación anual entre 200 y 900 mm anuales y de temperatura diaria media anual diaria entre 10° C y 30° C.

En los cuadros de la figura 7.11, se representan las disminuciones porcentuales de la aportación entre los citados rangos de valores de precipitación y temperatura, para las siguientes hipótesis:

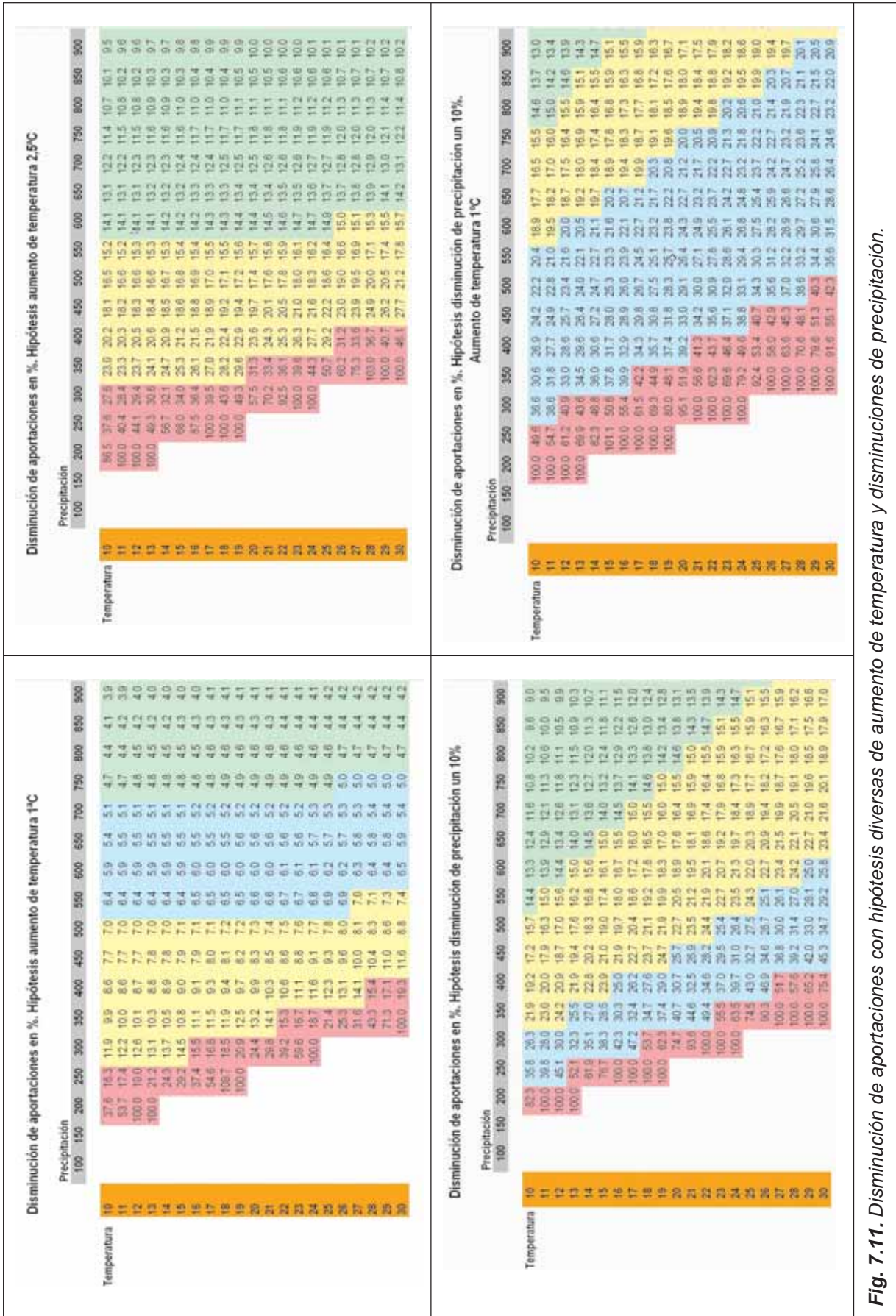
- Aumento de la temperatura 1° C
- Aumento de la temperatura 2,5° C
- Disminución de la precipitación un 10%
- Aumento de la temperatura 1° C y disminución de la precipitación un 10%

El simple análisis de los cuadros, pone de manifiesto que la sensibilidad es muy alta, precisamente en las zonas con temperaturas medias altas y con precipitaciones bajas. Es decir; en las zonas de España con precipitaciones más altas y temperaturas medias las disminuciones de aportación bajo los escenarios propuestos alcanzan valores casi siempre inferiores al 4% o 5%.

Sin embargo en las zonas más críticas, que pueden ser calificadas de semiáridas, con precipitaciones entre 200 y 400 mm y temperaturas medias diarias anuales sobre 18 o 20 °C, las disminuciones de aportación pueden ser tan graves que pueden dejar en la mitad los recursos potenciales de la zona.

En España un elevado número de sitios con escasez de precipitaciones y temperaturas altas lo que condiciona una sensibilidad alta, en términos generales, a los cambios del clima que se estudian.

Este tipo de cálculos son simples orientadores, que tienen valor como análisis de sensibilidad, pero que pueden ser de utilidad para plantear los distintos escenarios.



7.2.3 Sensibilidad a las variaciones estacionales de precipitación y temperatura

Los recursos hídricos no se generan en un momento instantáneo concreto del tiempo, ni tampoco de una forma regular a lo largo del año. Tienen periodos en los que su generación es posible, en función de las temperaturas y precipitaciones de este periodo y del estado de saturación del suelo entre otros factores.

Ello hace que la temporalidad en la distribución de precipitaciones y temperaturas incida en la generación de recursos hídricos con mayor entidad, en muchas ocasiones, que los mismos valores medios de estos dos parámetros climáticos.

En términos generales y pensando en la mayor parte de la superficie de España, los recursos hídricos se generan en los meses más fríos o con mayor precipitación siempre que no hayan ascendido excesivamente las temperaturas. Es decir; en verano con temperaturas y evapotranspiraciones altas, la mayor parte del agua que es capaz de retener el suelo es utilizada por las plantas. El suelo está seco o en bajo estado de saturación y no se producen recarga ni escorrentías significativas. En los meses más fríos la evapotranspiración es muy baja y por tanto la demanda de agua de las plantas es también baja mientras que el exceso de aportación satura el suelo y se producen los excedentes.

Si las temperaturas aumentan solo en verano muy probablemente el volumen de escorrentía no disminuiría apreciablemente, dado que no se produciría escorrentía ni antes ni después del posible cambio climático. El mismo razonamiento cabe si se asumen disminuciones de la precipitación pero solo para los meses de verano; daría igual a nivel de generación de escorrentía, salvo en que el déficit de agua de los regadíos sería mas acusado.

La falta de conocimiento en la estimación de la distribución mensual de la precipitación y la temperatura, condiciona que no se puedan hacer cálculos orientativos. Sin embargo a nivel conceptual puede indicarse que la generación de recursos hídricos es cualitativamente muy sensible al modo en que se distribuyan precipitaciones y temperaturas a lo largo del año.

7.2.4. Sensibilidad a sucesos extremos; sequías y avenidas

Suponiendo que los cambios de precipitación y temperatura fueran aproximadamente lineales, un aumento de la temperatura y una reducción de la precipitación se combinarían en un aumento de la frecuencia y severidad de las sequías hidrológicas. El aumento de la demanda evapotranspirativa relacionado con el calentamiento representará un aumento de los retornos a la atmósfera, así como unas condiciones antecedentes más secas de los suelos durante los eventos lluviosos, de modo que cabe esperar una reducción de la escorrentía y de la recarga de los acuíferos, al mismo tiempo que un empeoramiento de la calidad del recurso, debido a una menor dilución. Un aumento de la frecuencia y severidad de las sequías en el último decenio ha sido ya observado en algunas zonas del Globo, especialmente en África y Asia. Por otra parte los modelos climáticos predicen un aumento de la frecuencia de las situaciones de sequía pluviométrica para el próximo futuro, sobre todo en zonas continentales de altitud media (IPCC 2001).

Sin embargo, las crecidas y avenidas no siguen este patrón relativamente sencillo. Un calentamiento de las temperaturas y un ligero descenso de las precipitaciones tendría poca influencia en la frecuencia y magnitud de las crecidas. Sin embargo, hay evidencias de que las precipitaciones extremas han aumentado ligeramente durante las últimas décadas en diversas áreas del Globo (IPCC 2001) y en particular en algunos sectores del Pirineo (Beguería 2003). Las predicciones de los modelos climáticos no son adecuadas para la predicción de avenidas, ya que no son capaces de simular los eventos a la escala temporal adecuada; sin embargo, se señala como muy probable un aumento de las precipitaciones extremas como resultado de una

actividad climática más acelerada. Por otra parte, en las áreas donde una parte significativa de la precipitación es en forma de nieve, cabe esperar un adelanto de la estación de fusión como consecuencia del calentamiento global, lo que puede causar cambios en la magnitud de las crecidas si coincide el período de fusión con un periodo de precipitaciones más copiosas.

Por último, cabe señalar algunos posibles efectos indirectos del cambio climático sobre la generación de crecidas y la erosión de los suelos. En un escenario de calentamiento global y de aumento de la sequía estival, cabe esperar una degradación de la cubierta vegetal y un aumento de la frecuencia de los incendios forestales. Estas condiciones pueden representar un aumento de la frecuencia y severidad de las crecidas y de los fenómenos de erosión de los suelos en cuencas de pequeño tamaño.

7.3. IMPACTOS PREVISIBLES DEL CAMBIO CLIMÁTICO

7.3.1. Introducción a las relaciones Clima – Hidrología

Una modificación de la temperatura o de la precipitación debida a un cambio climático repercutiría sobre los recursos hídricos de un territorio, pues, a largo plazo, sus recursos renovables son igual a la diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración.

Si, de acuerdo con los escenarios climáticos disponibles para España, las precipitaciones anuales disminuyen ligeramente y las temperaturas aumentan, se producirá en el futuro una disminución de los recursos hídricos.

Por otra parte, las tendencias que se apuntan para España son de una mayor irregularidad temporal de las precipitaciones, lo que repercutiría negativamente en el régimen de las crecidas y en la regulación de los ríos.

No solo los aspectos cuantitativos del agua son afectados por un cambio en el clima, los aspectos relacionados con la disminución de la calidad de la misma pueden verse acentuados si se produce un descenso en cantidad del recurso. Un menor volumen de agua disponible provocaría el empeoramiento de la calidad de las aguas y el descenso de los niveles piezométricos en los acuíferos, lo que en zonas costeras, facilitaría la intrusión marina, hecho además favorecido por el aumento del nivel del mar.

Algunos procesos físico-químicos y biológicos en el agua dependen de la temperatura, como por ejemplo, el desarrollo de las algas, que aumentaría con la temperatura, produciendo un mayor consumo de oxígeno en su descomposición. Todo ello puede afectar a la calidad del agua en embalses que se vería afectada por la reducción de las concentraciones de oxígeno y por la disminución de aportaciones a los mismos.

7.3.2. Definición de escenarios para evaluar el impacto sobre los recursos hídricos

7.3.2.1. Introducción

Un escenario se define como una representación plausible de una variable o conjunto de variables en el futuro (población mundial, actividad industrial, emisión de CO₂, nivel medio del mar, temperatura, precipitación, etc...), que puede ser construida sobre la base de diferentes supuestos o de evoluciones históricas en el pasado. De esta forma un escenario climático se define como una representación plausible del clima futuro (fundamentalmente en cuanto a las variables de temperatura y precipitación), que puede ser construido sobre la base de otros escenarios.

Debido a que existen numerosas incertidumbres relacionadas con múltiples factores que regulan el comportamiento del sistema climático, no es recomendable utilizar un escenario

climático como si fuera una predicción meteorológica a corto plazo. Ante esta situación, es aconsejable representar el clima futuro utilizando una gama de proyecciones que cubran un amplio espectro de incertidumbres.

7.3.2.2. Tipos de escenarios

Los escenarios climáticos utilizados para evaluar el impacto de un cambio climático sobre los recursos hídricos se construyen teniendo en cuenta escenarios socioeconómicos, de uso del suelo, ambientales o de emisión y ofrecen como resultado los cambios previsibles en las variables que intervienen en el ciclo hidrológico. Las más estudiadas son la temperatura y la precipitación, aunque también otras variables, como la radiación solar, la velocidad del viento o la humedad relativa pueden ser de gran interés.

Para las evaluaciones de los impactos en los recursos hídricos se emplean tres tipos distintos de metodologías para la definición de escenarios climáticos.

- *Los escenarios incrementales o sintéticos* son simples ajustes del clima de referencia (clima actual) con arreglo a cambios futuros previstos (aumento de 1° o 5° de la temperatura, disminución de un 5% o 10% de la precipitación, etc...). Estos escenarios están basados en algunas ocasiones en los resultados de los escenarios de los Modelos de Circulación General Acoplados Océano-Atmósfera (MCGA-OA).
- *Los escenarios analógicos* son la representación analógica de un clima que ha cambiado a partir de registros anteriores o registros de otras regiones.
- *Los escenarios de los Modelos de Circulación General Acoplados Océano-Atmósfera (MCGA-OA)*. Son los más utilizados en la actualidad y los que presentan mayor fiabilidad. Generan escenarios climáticos indicando las variaciones respecto a un clima de referencia, inicialmente basado en las observaciones regionales del clima realizadas por la Unidad de Investigación del Clima (Climate Research Unit, CRU) de la Universidad de East Anglia en el Reino Unido durante el período 1961-1990. Actualmente estos estudios para definir el clima de referencia se han extendido al periodo comprendido entre 1900 y 1990.

7.3.2.3. Escenarios de Cambio Climático para España

En las figuras 7.12 y 7.13, se muestran las variaciones estacionales en la temperatura y la precipitación obtenidas para España con 7 modelos MCGA-OA procedentes de distintos institutos de investigación de diferentes países. Estos modelos proyectan, para mediados del siglo XXI, un calentamiento para España comprendido entre 1.0 y 5.0 °C y una disminución de las precipitaciones hasta 40 mm en los meses de verano.

Los resultados sobre temperaturas en la península ibérica, a partir de estos modelos globales, representan variaciones siempre positivas mientras que en el caso de las precipitaciones estas variaciones son moderadas y se mueven en ambos sentidos.

Uno de los modelos MCGA-OA más conocido es el modelo UKMO (United Kingdom Meteorological Model del Hadley Centre for Climate Research de Bracknell, Reino Unido), que es un modelo que utiliza celdas con una resolución horizontal de 2.5°C x 3.75°C en latitud-longitud (en la Península Ibérica corresponde a celdas de 280 km de ancho por 320 km de altura, ver figura adjunta).

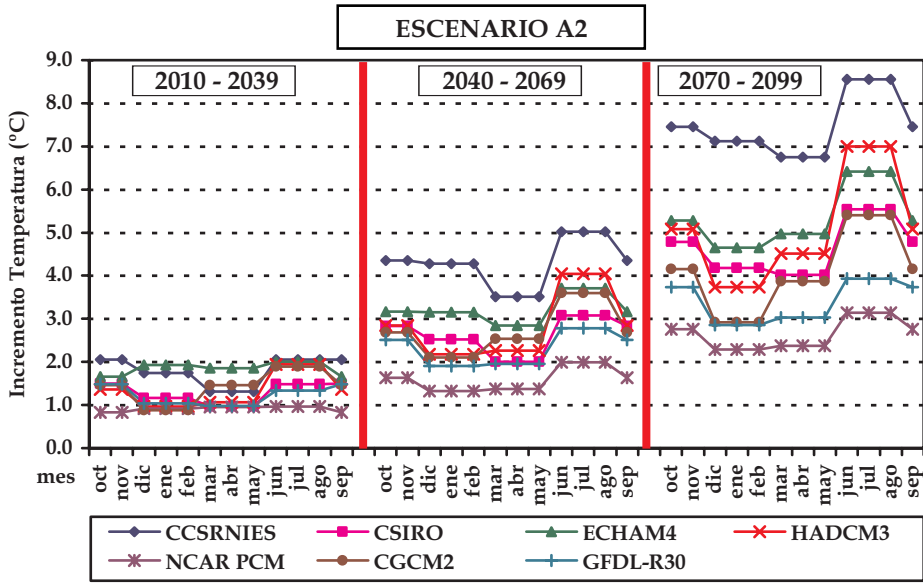


Fig. 7.12. Incremento de temperaturas escenario A2 (IPPC).

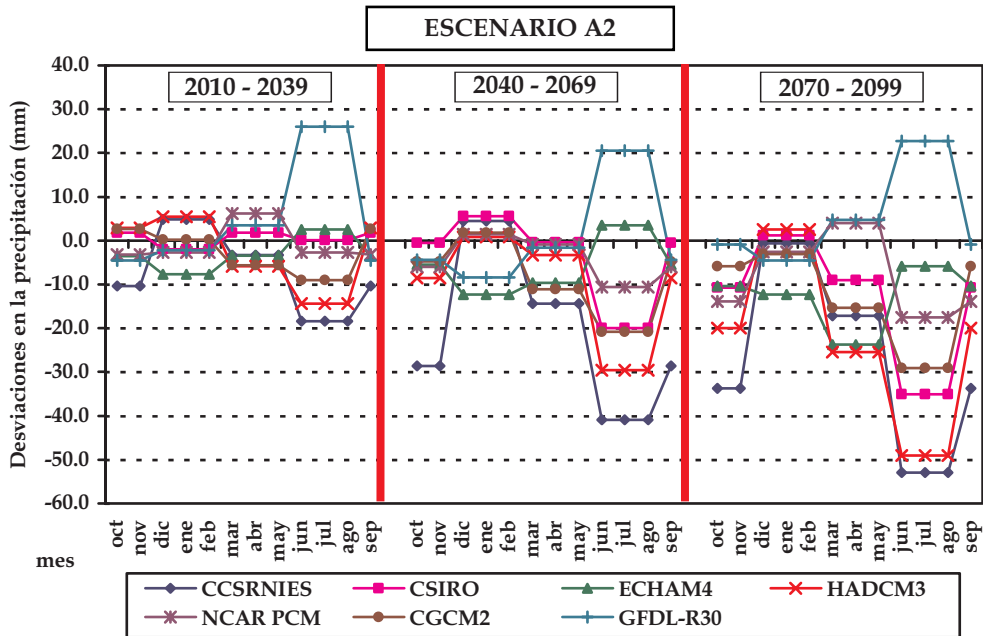


Fig. 7.13. Variación de las precipitaciones escenarios A2 (IPPC).

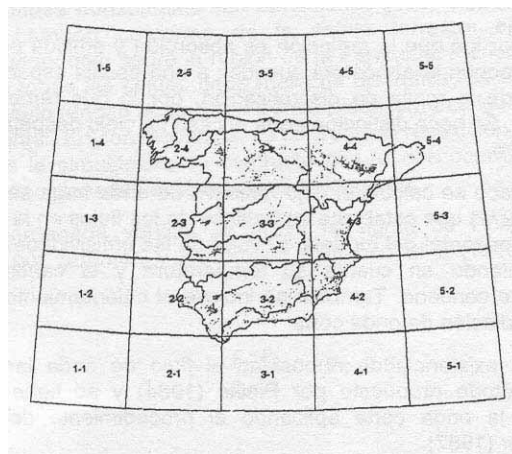


Fig. 7.14. Esquema de las celdas del modelo UKMO para España.

Los datos utilizados por este modelo proceden de dos escenarios de clima futuro: el clima con las condiciones de CO₂ actuales (1xCO₂) y el clima con condiciones de doble CO₂ equivalente (2xCO₂). En ambos casos pertenecen al mismo intervalo de tiempo, del año 2040 al 2049, que corresponden a los diez años a partir de los cuales se dobla el CO₂ en el segundo escenario.

Las salidas del modelo UKMO consisten en las medias mensuales de cada año de la temperatura máxima (°C), la temperatura mínima (°C), la precipitación (mm), la velocidad del viento (m s⁻¹) y la humedad relativa (%).

Estos escenarios climáticos se caracterizan en España por un aumento de la temperatura al duplicarse la concentración de CO₂ atmosférico. La precipitación, sin embargo, aumenta en unos casos y disminuye en otros, con diferencia entre estaciones, dándose en general una reducción de la precipitación durante los meses de verano y un aumento en el resto del año (ver tabla 7.4).

CELDA	TMAX		TMIN (°C)		TMED (°C)		PRECIP (mm)		SRAD(MJ/m2)	
	1xCO2	2xCO2	1xCO2	2xCO2	1xCO2	2xCO2	1xCO2	2xCO2	1xCO2	2xCO2
2-2	22,6	26,5	11,5	15,1	17,0	20,8	347,1	402,9	7360,6	7079,1
2-3	18,8	22,6	8,7	12,1	13,8	17,4	749,7	853,8	6198,5	6170,5
2-4	14,1	17,4	7,0	9,8	10,6	13,6	1502,1	1502,7	4254,2	4482,9
3-2	19,2	23,6	8,3	12,1	13,8	17,8	594,0	528,0	6638,2	6684,6
3-3	14,8	19,2	5,5	9,0	10,1	14,1	950,7	860,4	5205,0	5702,4
3-4	12,7	16,1	5,5	8,5	9,1	12,3	833,4	662,1	4356,0	4843,6
4-2	19,5	22,7	17,0	20,1	18,2	21,4	118,8	94,5	8872,0	8472,6
4-3	17,7	21,4	8,1	11,7	12,9	16,6	345,0	345,3	6685,4	6478,6
4-4	12,9	17,0	5,6	8,9	9,2	12,9	1043,7	892,2	4200,1	4786,0

Valores medios del período 2040-2049

CELDA	TMAX		TMIN (°C)		TMED (°C)		PRECIP (mm)		SRAD(MJ/m2)	
	F-A	F/A	F-A	F/A	F-A	F/A	F-A	F/A	F-A	F/A
2-2	3,9	117,3	3,6	131,3	3,8	122,4	55,8	116,1	-281,5	98,2
2-3	3,8	120,2	3,4	139,1	3,6	126,1	104,1	113,9	-28,0	99,5
2-4	3,3	123,4	2,8	140,0	3,0	128,3	0,6	100,0	238,7	105,6
3-2	4,4	122,9	3,8	145,8	4,0	129,0	-66,0	88,9	46,4	100,7
3-3	4,4	129,7	3,5	163,6	4,0	139,6	-90,3	90,5	497,4	109,6
3-4	3,4	126,8	3,0	154,5	3,2	135,2	-171,3	79,4	487,6	111,2
4-2	3,2	116,4	3,1	118,2	3,2	117,6	-24,3	79,5	-399,4	95,5
4-3	3,7	120,9	3,6	144,4	3,7	128,7	0,3	100,1	-186,8	97,2
4-4	4,1	131,8	3,3	158,9	3,7	140,2	-151,5	85,5	585,9	113,9

Diferencia (F-A) y relación (F/A) entre clima con doble (F) y simple (A) CO₂

Resumen de los resultados del modelo de circulación general UKMO.

Tabla 7.4. Resultados del modelo UKMO para España.

Aunque en su estado de conocimiento actual los MCGA-OA no proporcionan una respuesta suficientemente precisa de los cambios en el sistema climático debidos a una variación en las concentraciones en la atmósfera del CO₂ y otros GEI, no obstante, son las únicas herramientas de que se dispone para obtener patrones de respuesta climática ante diversas acciones exógenas y por esta razón se sigue trabajando en el desarrollo de métodos y procesos cada vez más precisos que puedan incorporarse en ellos. La mayoría de estos modelos resuelven ecuaciones similares, pero entre ellos existen diferencias en cuanto a la resolución temporal, la física de las interconexiones, el tratamiento de las nubes, la representación del océano, etc., lo que explica algunas de las discrepancias en sus resultados.

Para responder a las preguntas sobre el impacto de un posible cambio climático sobre los recursos hídricos de un territorio se requieren resoluciones temporales y espaciales cada vez mayores, así como información sobre un mayor número de variables (evapotranspiración, temperaturas máximas y mínimas, escorrentías, etc.), requerimientos que no parece razonable exigir a los MCGA-OA. Por esta razón se están desarrollando modelos climáticos regionales.

El modelo PROMES (Pronóstico a Mesoescala) es un modelo regional de ecuaciones primitivas, hidrostático y completamente comprensible. PROMES parte de los campos de salida del MCG del Hadley Centre for Climate Prediction and Research conocido como HadCM2.

El objetivo básico del modelo regional de clima PROMES es generar los campos atmosféricos necesarios que sirvan como entrada para los diferentes modelos de simulación de recursos hídricos o en otra área específica. Tanto para las condiciones de clima actual ($1xCO_2$) como para un escenario climático en el que se considere una concentración de dióxido de carbono en la atmósfera del doble de la existente en la actualidad ($2xCO_2$).

La simulación $1xCO_2$ ha tenido una duración de 10 años, lo que es un compromiso entre la conveniencia de simulaciones de 30 años (período temporal considerado idóneo para caracterizar un clima) y los recursos de cálculo disponibles.

La resolución horizontal utilizada es uniforme, teniendo todas las celdas unas dimensiones horizontales de $\Delta_x = \Delta_y = 50$ km. La región de simulación para España se compone de 45×39 celdas, incluyendo las de frontera (figura 7.15).

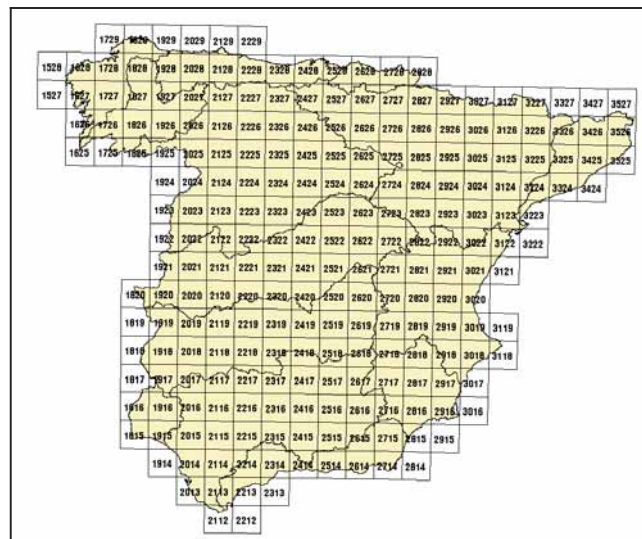


Fig.7.15. Celdas de cálculo del modelo PROMES.

El CEDEX (1998) realizó un estudio para investigar el efecto del cambio climático sobre los recursos hídricos y las demandas de agua en el que se utilizó el modelo PROMES para simular escenarios climáticos. En la figura 7.16 se muestran las temperaturas medias diarias en otoño simuladas con PROMES para los escenarios $1xCO_2$ y $2xCO_2$.

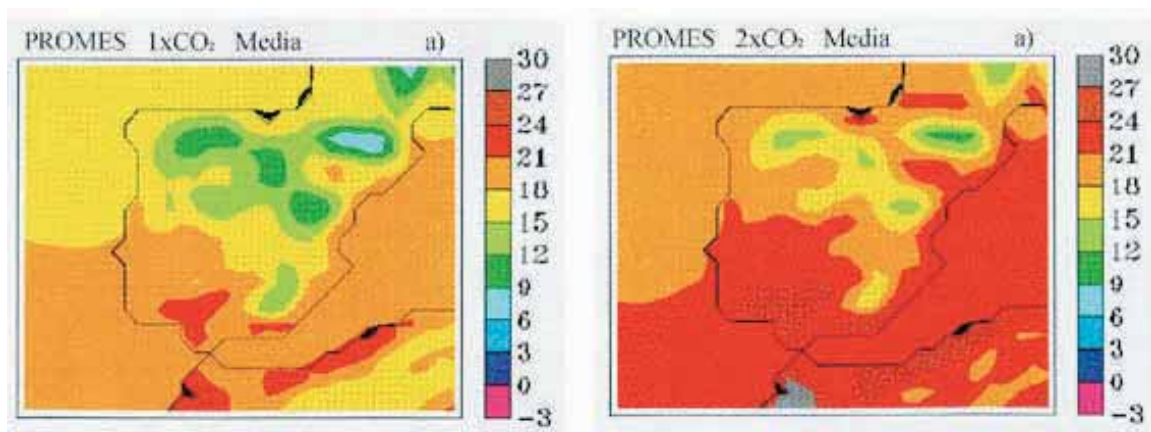


Fig. 7.16. Temperatura media diaria a 2 m en otoño: izquierda) Media de la simulación $1xCO_2$ PROMES, derecha) Media de la simulación $2xCO_2$ PROMES (tomada de CEDEX 1998).

En ese estudio se compararon las simulaciones de clima generados por el modelo PROMES con las correspondientes a la climatología CRU (Climate Research Unit) (Hulme *et al.*, 1995), concluyéndose que los valores de la precipitación en la simulación 1xCO₂ (situación actual) son por lo general mayores que los resultados obtenidos por la unidad climatológica CRU (1998). La diferencia de precipitación es más relevante en las zonas montañosas. En cuanto a la temperatura en el escenario 1xCO₂ las temperaturas en la mayoría de las regiones peninsulares están por encima de los resultados obtenidos por la unidad climatológica CRU (1998) variando desde 1 a 3 grados centígrados.

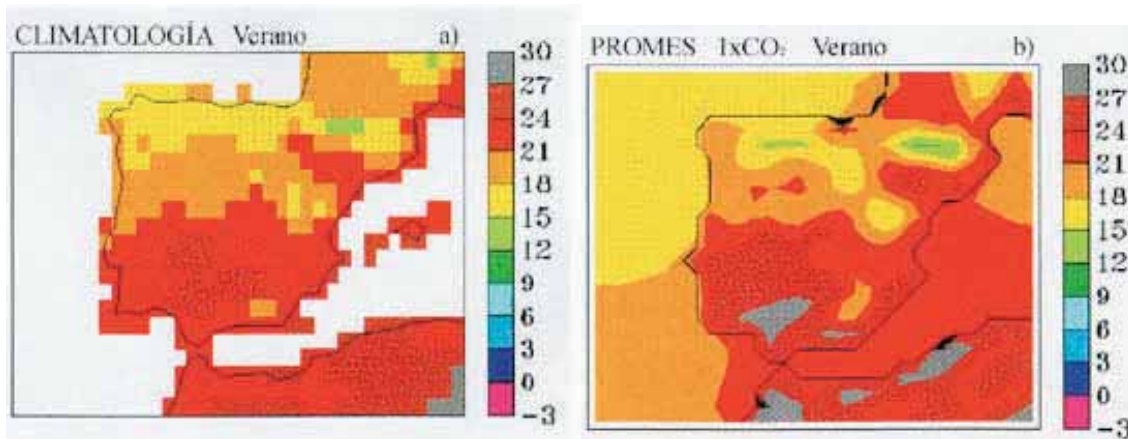


Fig. 7.17. Temperatura media diaria a 2 m de altitud en verano, a) Climatología CRU, b) Simulación 1 x CO₂ PROMES (tomada de CEDEX 1998).

En general, PROMES sobreestima tanto la precipitación como la temperatura en la situación actual y probablemente los valores para la situación futura (2xCO₂) también serán sobreestimados. El resto de las variables utilizadas en los estudios del CEDEX, como son la humedad relativa, viento y radiación, no fueron contrastadas pero hay evidencia que existe una mayor incertidumbre que para la temperatura y la precipitación.

7.3.3. Evaluación del impacto sobre los recursos hídricos en España

7.3.3.1. Introducción

El informe ACACIA de la Comisión Europea sobre los Impactos del Cambio Climático (1999) asume para Europa que:

- Las presiones actuales y futuras sobre los recursos hídricos y su gestión en Europa se verán exacerbadas por el cambio climático (en parte porque el efecto del cambio es incierto). Probablemente aumentará el riesgo de inundaciones, y se prevé un incremento en la escasez de agua especialmente en el sur de Europa. Es probable que el cambio climático exagerará las diferencias en los recursos hídricos entre el norte y sur de Europa.
- En las zonas de litoral, el riesgo de inundaciones, erosión y pérdida de humedales experimentará un aumento sustancial con implicaciones para la colonización humana, la industria, el turismo, la agricultura y los hábitat naturales costeros. El sur de Europa parece ser más vulnerable a estos cambios.
- En las regiones montañosas, las temperaturas más altas darán lugar a que la frontera entre las zonas bióticas y criosféricas ascienda en altura, perturbando el ciclo hidrológico. Habrá una redistribución de especies con riesgo de extinción en algunos casos.

Estas conclusiones del informe ACACIA ponen de relieve la necesidad de cuantificar los efectos de un cambio climático sobre los recursos hídricos en España. La evaluación de esos impactos en nuestro país ha seguido diferentes líneas de trabajo, tanto en la escala espacial y temporal de simulación hidrológica como en el origen de los escenarios climáticos utilizados. Seguidamente se describen las diferentes evaluaciones realizadas ordenadas de menor a mayor complejidad de la modelación realizada.

7.3.3.2. Modelos agregados regionales

Dado que un primer paso es el conocimiento de los valores medios a largo plazo de las principales variables hidrológicas, la aplicación de leyes regionales que relacionen en valores medios anuales la precipitación, la evapotranspiración potencial (función de la temperatura) y la escorrentía total, puede proporcionar una visión general del alcance del problema.

Con este enfoque Ayala e Iglesias (Ayala-Carcedo *et al.*, 2001), emplean un modelo agregado para cada una de las grandes cuencas hidrográficas en que se divide España, basado en la utilización de leyes regionales anuales. Respecto a los escenarios de cambio climático consideran los cambios previstos en cuanto a la precipitación y temperatura medios anuales por el Instituto Nacional de Meteorología en 1995, basados en el modelo Hadley Center (UK) de 1990, donde en el horizonte del 2060 la temperatura media anual subiría 2,5^oC y la precipitación media anual descendería para el territorio peninsular español en un 8%.

Estos autores estiman que el cambio climático produciría una reducción global de los recursos hídricos del 17% junto a un aumento de la variabilidad interanual de los mismos para el año 2060 (horizonte de proyecto medio de las grandes actuaciones hidráulicas) y que estos cambios serán mayores en la mitad Sur de España. Para obtener estos valores aplicaron un modelo hidrológico conceptual agregado, utilizando como base el periodo 1940-85.

7.3.3.3. Modelos distribuidos regionales

Posteriormente en el Libro Blanco del Agua en España (MIMAM 2000) se mantiene el enfoque de aplicación de leyes regionales pero utilizando un modelo distribuido en el espacio. De esta manera se alcanza una mejora sustancial en los resultados al introducir la variabilidad espacial tanto de las precipitaciones como de las temperaturas y de las características fisiográficas de la cuenca.

El impacto sobre la escorrentía media anual derivado de distintos escenarios climáticos se estimó en MIMAM(2000) mediante la aplicación de forma distribuida (celdas de 1 km x 1 km) de la ley regional de Budyko (1961), que relaciona la escorrentía (A) con la precipitación (P) y la evapotranspiración potencial (ETP). Esta ley ya había sido utilizada en un análisis experimental realizado en cuencas españolas de distintas características climáticas e hidrológicas (Estrela y otros 1995). Previamente a su aplicación, en MIMAM(2000) se contrastó la adecuación de esta ley a los datos observados en 130 puntos de control distribuidos por toda España (figura 7.18).

Los escenarios climáticos utilizados en el Libro Blanco del Agua en España proceden de los campos climáticos reflejados en el documento Programa Nacional sobre el Clima (MOPTMA 1995), donde se indicaba que:

- Una duplicación de CO₂ podría producir un aumento de temperatura media anual que oscilaría entre 1^oC (análisis de respuesta en transición) y 4^oC (mejor estimación del análisis de respuesta en equilibrio), aunque siendo ligeramente mayores esos aumentos en verano.

- Podrían producirse descensos generales de los valores de la precipitación media anual comprendidos entre el 5% y el 15%, siendo estos descensos más probables en la mitad sur de la península. Se apunta una tendencia hacia una concentración temporal de la precipitación, así como a una mayor variabilidad anual e interanual.

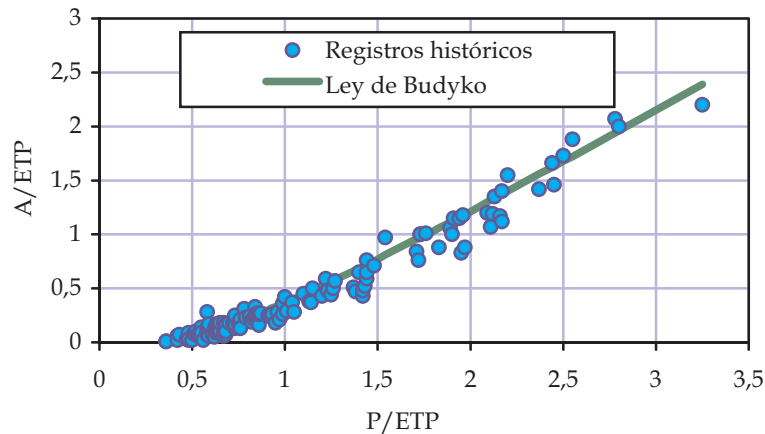


Fig. 7.18. Relaciones entre aportación, precipitación y ETP en los puntos de control (adaptada de MIMAM 2000).

Sin perjuicio de las cautelas e incertidumbres asociadas al problema, la evolución más probable del clima peninsular español, como resultado de esos análisis, se sintetizó en MIMAM(2000) en los siguientes escenarios de temperatura y precipitación, considerados representativos bajo la hipótesis de duplicación de CO₂, prevista para el 2030:

- Escenario 1. Aumento de 1°C en la temperatura media anual.
- Escenario 2. Disminución de un 5% en la precipitación media anual y aumento de 1°C en la temperatura.
- Escenario 3. (escenario extremo poco probable) suponiendo una disminución del 15% de la precipitación media anual y un aumento extremo de 4°C de la temperatura.

Los resultados más recientes sobre precipitación en la Península Ibérica, a partir de modelos globales, producen variaciones de la precipitación muy moderadas, al situar nuestra zona en un área de cambio de signo de la variación esperada de las precipitaciones, es decir, en todos los experimentos la línea de cambio nulo atraviesa la Península Ibérica. Ello podría suponer condiciones hidrológicas más favorables que las anteriormente expuestas.

Del análisis realizado en MIMAM (2000) se puede concluir que las cuencas del Guadiana, Canarias, Segura, Júcar, Guadalquivir, Sur y Baleares (ver figura 7.20), son aquellas donde el impacto sobre los recursos hídricos se manifestaría más severamente. Los escenarios climáticos (1 y 2) implican una disminución media de aportaciones hídricas en España, en régimen natural, entre un 5 y un 14%.

7.3.3.4. Modelos distribuidos de simulación del ciclo hidrológico

Los modelos distribuidos de simulación del ciclo hidrológico, como el modelo SIMPA empleado en el Libro Blanco del Agua en España para la evaluación de recursos hídricos, establecen balances hídricos para los distintos procesos que tienen lugar desde el momento en que llueve hasta que el agua escurre superficial o subterráneamente, y estiman las aportaciones a partir de

datos meteorológicos (precipitación, evapotranspiración potencial, etc.) y de las características físicas del territorio (vegetación, hidrogeología, edafología, etc.). En esta línea de trabajo conviene mencionar los estudios realizados por el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX (1998) o por Fernández (2002).

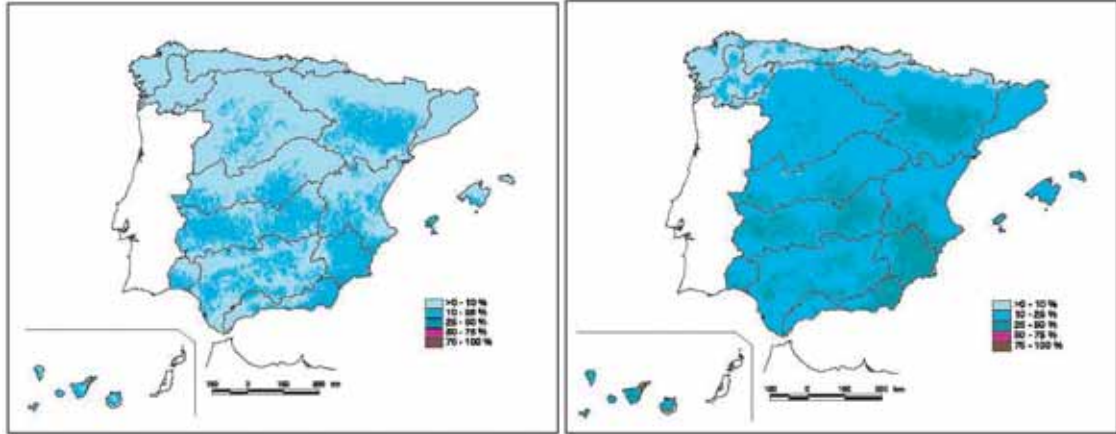


Fig. 7.19. Mapa de disminución porcentual de la escorrentía para el escenario 1 y en el escenario 2.

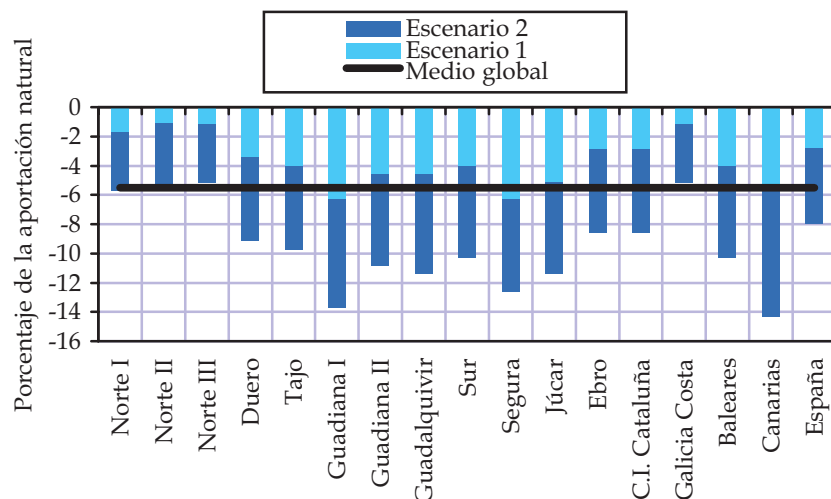


Fig. 7.20. Porcentajes de disminución de la aportación total, para los escenarios climáticos considerados, en el largo plazo de la planificación hidrológica.

En los trabajos desarrollados por el CEDEX en su “Estudio sobre el impacto potencial del cambio climático en los recursos hídricos y demandas de riego en determinadas regiones de España” para el Ministerio del Medio Ambiente (MIMAM 1998), se utilizaron tres grupos de escenarios climáticos para las simulaciones hidrológicas:

- Análisis de sensibilidad a variaciones climáticas:
 - escenario 1. un aumento de 1°C en la temperatura media anual
 - escenario 2. una disminución en un 5% de la precipitación media anual y aumento de 1°C en la temperatura.
- Escenarios climáticos generales. Provenientes de modelos de circulación general, modelo UKMO.

- Escenarios climáticos regionales. Resultados del modelo de clima regional PROMES, considerando aumentos en la temperatura y manteniendo la precipitación igual que la actual.

Utilizando el modelo distribuido lluvia escorrentía SIMPA (Sistema Integrado para la Modelización de la Precipitación-Aportación) obtuvieron los mapas de escorrentía para cada escenario (ver mapa correspondiente a los resultados de PROMES en figura 7.21) y las variaciones porcentuales de la escorrentía respecto a la situación actual.

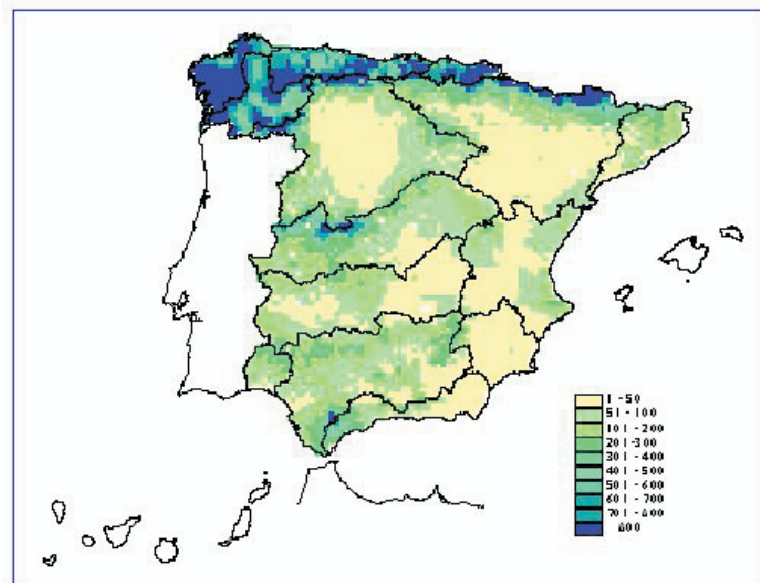


Fig. 7.21. Mapa de aportación total media anual en mm bajo la hipótesis de cambio climático resultado del modelo PROMES.

Del análisis realizado se extrajeron las siguientes conclusiones:

- 1) En España se producirían descensos medios en la aportación total media anual que oscilan entre un 5% para el escenario 1 hasta el 14% para el escenario 2 y el escenario regional 3.
- 2) El sureste peninsular y la España insular son las áreas donde el impacto sobre los recursos hídricos se manifestará más severamente. En el escenario 1 la disminución de la aportación total variaría entre un 2% (Galicia Costa y Norte I) y un 11% (Guadiana y Segura), mientras que en el escenario 2 esos porcentajes crecen hasta un 9% (Galicia Costa y Norte) y algo más de un 25% (Canarias).
- 3) En el escenario regional adoptado la aportación total variaría entre un 5% en Galicia Costa, y un 22% en Guadiana II, con valores similares al escenario 2, salvo en la cuenca del Júcar 15% frente a 20% para el escenario 2, y las C.I. Cataluña 20% frente a 15% para el escenario 2.

En el citado estudio concluyen que los resultados no deben de ser tomados en ningún modo como definitivos, y están siempre sujetos a las hipótesis de partida adoptadas.

Fernández (2002), desarrolla un procedimiento metodológico para evaluar el impacto sobre los recursos en España mediante una modelización hidrológica distribuida a escala mensual, junto con la utilización de campos climáticos originados por modelos regionales de cambio climático. Este procedimiento lo aplica a 19 cuencas distribuidas a través del territorio español.

Los escenarios climáticos futuros adoptados se obtuvieron modificando la precipitación y la temperatura mensual del periodo comprendido entre 1945 y 1995 con la diferencia de resultados en precipitación y temperatura obtenidas por el modelo climático PROMES en las simulaciones 1xCO₂ y 2xCO₂ para los valores medios del periodo 2040 a 2049.

En este trabajo también se consideraron otras simulaciones correspondientes a distintos escenarios climáticos, como las mencionadas en MIMAM(2000) y otras que consideraron de interés. Se realizaron un total de 15 simulaciones hidrológicas, que se presentaron en dos grupos principales:

- a) Nueve simulaciones anuales utilizando la ley regional de Budyko (Schreiber *et al.* 1978) a escala anual.
- b) Seis simulaciones mensuales mediante el modelo hidrológico distribuido SIMPA.

Para la simulación a escala anual se utilizaron tanto campos climáticos (escenarios sintéticos obtenidos disminuyendo la precipitación en una proporción fija y aumentando la temperatura en uno o varios grados con respecto a la del periodo base) como escenarios generados por el modelo PROMES. En las simulaciones a escala mensual se utilizaron campos climáticos generados por el modelo climático global UKMO y por el modelo climático regional PROMES.

Una de las conclusiones importantes de este estudio son las significativas diferencias que se obtienen entre las aportaciones anuales simuladas con un modelo que simula series hidrológicas mensuales durante largos periodos de tiempo, como SIMPA y mediante la utilización de leyes regionales que únicamente consideran datos anuales o medios interanuales, como la de Budyko. Esta discrepancia demuestra claramente que las simulaciones a escala anual no son adecuadas para describir la variación de las aportaciones producidas por los cambios en la temperatura y precipitación, ya que no tienen en cuenta su distribución a lo largo del año, factor que se ha revelado, en los escenarios PROMES utilizados, fundamental para evaluar el impacto del cambio climático sobre los recursos hídricos.

7.3.3.5. El impacto del cambio climático sobre los recursos en la planificación hidrológica

Los estudios de evaluación del impacto climático sobre los recursos hídricos no se tuvieron en cuenta, de forma específica, en los planes hidrológicos de cuenca aprobados en España en el año 1998. La primera vez que se contemplaron este tipo de estudios con un cierto detalle fue en la elaboración de la Documentación Técnica del Plan Hidrológico Nacional (PHN). La compleja cuestión de los trasvases entre cuencas requería evaluar la posible disminución de los recursos hídricos debida al cambio climático en las cuencas candidatas a ceder recursos.

El PHN consideró las distintas horquillas de reducción en las aportaciones obtenidas en el Libro Blanco del Agua (MIMAM 2000) para las distintas cuencas, incrementándose, para mayor seguridad, el valor global recomendado, e introduciendo simultáneamente un efecto de mayor irregularidad en los valores de las series mensuales empleadas. Esto se realizó para las posibles cuencas cedentes, las del Duero, Tajo y Ebro.

En el caso de la cuenca del Ebro, la horquilla correspondiente a los dos escenarios, según el LBAE, está entre el 3 y el 9% de disminución de aportaciones.

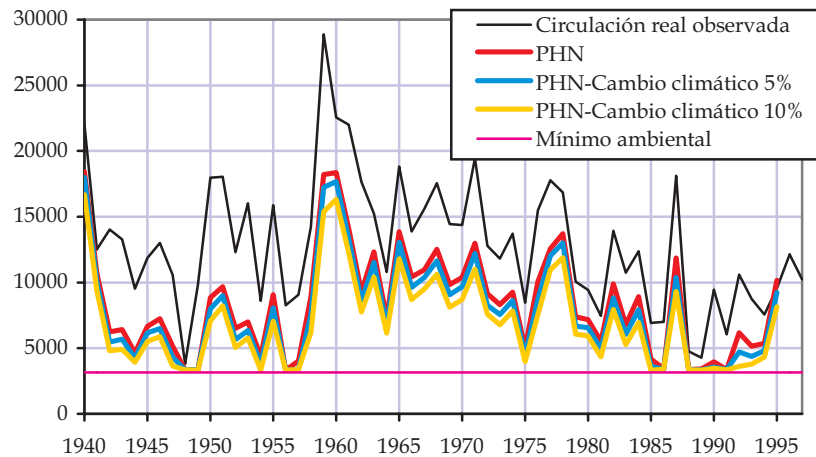


Fig. 7.22. Circulación de caudales anuales (hm³) en el tramo final del Ebro bajo supuestos de cambio climático. Hipótesis de reducción del 5 y 10%. (tomada de la DT del PHN).

Con ese fundamento, el documento de análisis del sistema del Ebro, elaborado en el PHN, evaluó los caudales anuales circulantes en el curso bajo del río bajo los supuestos de reducciones del 5 y 10% de las aportaciones hídricas de toda la cuenca.

Como resultado de esta evaluación, la figura 7.22, tomada del documento de *Análisis de Sistemas* del PHN, muestra la circulación de caudales anuales realmente observada en el tramo final del río Ebro, junto con la serie de circulaciones de diseño, adoptada en el PHN, y las circulaciones resultantes tras una disminución generalizada de aportaciones naturales del 5 y el 10%.

7.3.4. Evaluación integrada de los impactos del cambio climático en los sistemas de recursos hídricos complejos

El proceso metodológico para la evaluación integrada de los impactos del cambio climático en los sistemas de recursos hídricos complejos, requiere del empleo de diversos modelos de simulación anidados de forma secuencial. Esto se debe al elevado nivel de complejidad y de interacción de los distintos elementos que conforman los sistemas de recursos hídricos tanto en sus aspectos cuantitativos como en los aspectos de calidad química y ecológica del agua y en sus repercusiones socio-económicas.

El proceso secuencial parte de la selección de los resultados de los diversos escenarios climatológicos existentes para España, tanto los proporcionados por los Modelos de Circulación General Acoplados Océano-Atmósfera (MCGA-OA) como por los modelos climatológicos regionales que permiten disponer de dichos resultados con mayor grado de detalle espacial. Las variables climatológicas resultado de los modelos son las variaciones previstas de temperatura y de precipitación.

Parte importante en la evaluación de los impactos del cambio climático en los sistemas de recursos hídricos es la selección de escenarios. Se pueden elegir o proponer diferentes tipos de escenarios, entre los cuales están los incrementales o sintéticos, los cuales pueden ofrecer una valiosa asistencia sobre la sensibilidad del sistema al clima futuro. Algunas veces los incrementos de estos escenarios pueden hacerse tomando como guía los resultados de las salidas de los Modelos de Circulación General propuestos por el IPCC en su apartado de regionalización mundial, eligiendo los correspondientes a España. Otra manera de evaluar los recursos hídricos es utilizar los escenarios de los modelos regionales ya sea el HadCM2SUL, UKMO o PROMES,

de tal manera que se cuente con un amplio abanico de escenarios que permitan, en su momento valorar los resultados de cada uno de ellos y analizar los resultados para los diversos periodos estacionales con el objetivo de conocer tanto las afecciones globales como las debidas a las variaciones estacionales de la lluvia y de la temperatura y sus posibles efectos en los recursos hídricos.

Seleccionados el conjunto de escenarios, el siguiente paso metodológico lo constituiría la simulación del ciclo hidrológico mediante un modelo distribuido lluvia escorrentía, el cual abarcara la totalidad de la cuenca hidrográfica y fuese de escala temporal mensual. Este modelo lluvia-escorrentía permitiría conocer en que proporción y lugar se verían reducidos los recursos hídricos y analizar como afectaría a las distintas componentes y almacenamientos de agua, como por ejemplo a los niveles piezométricos de los acuíferos o a la humedad del suelo en las capas superiores (íntimamente relacionado con la agricultura de secano). Por otra parte si estos modelos incluyen el transporte de algunas componentes químicas disueltas en el agua sería posible evaluar las variaciones en la calidad química del agua debido al cambio climático.

Analizadas las repercusiones cuantitativas y con algo de detalle las cualitativas en las cuencas hidrográficas, el siguiente proceso consistiría en la simulación u optimización de la gestión de los sistemas de recursos hídricos mediante los modelos disponibles en la actualidad, como SIMGES u OPTGES (Andreu *et al.* 1996). Estos modelos permiten reproducir la gestión en los sistemas de recursos hídricos y evaluar las garantías y fallos que se producen en las demandas urbanas y agrícolas, y en los caudales ecológicos y reservas ambientales establecidas en dichos sistemas. De esta manera pueden conocerse las repercusiones futuras que tendría la disminución de los recursos hídricos en el sistema de explotación. En la figura 7.23 se muestra el modelo de simulación de la gestión para el sistema Júcar.

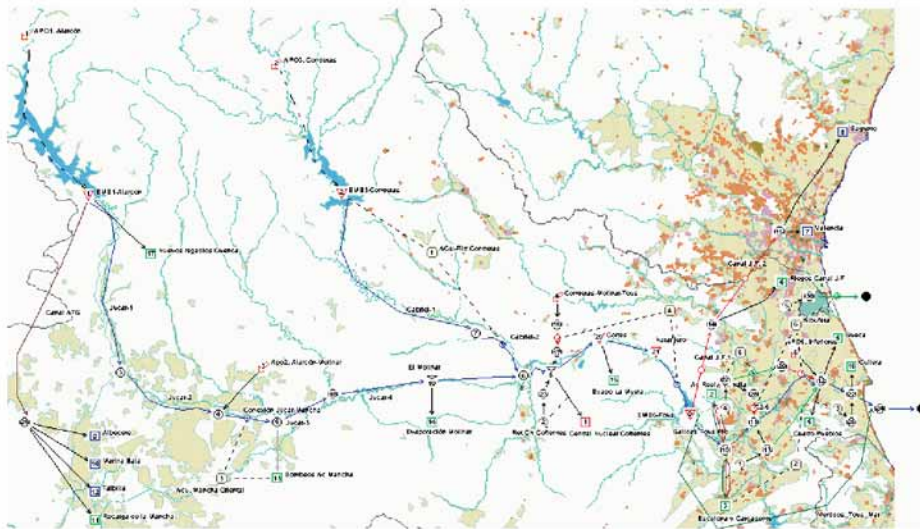


Fig. 7.23 . Modelo de simulación de la gestión del sistema Júcar.

Adicionalmente estos modelos también incorporan un módulo de evaluación económica y un módulo de gestión de la calidad química y ecológica, donde se incluyen la modelación del oxígeno disuelto, de la materia orgánica, de los contaminantes conservativos y de los contaminantes con descomposición de primer orden. Mediante estos modelos es posible conocer las repercusiones económicas y las variaciones en la calidad de las aguas asociadas a las distintas políticas de gestión.

La evaluación integrada y cuantificación detallada de los impactos producidos por el cambio climático requiere de la utilización secuencial de diversos modelos de simulación, los cuales han sido validados en los últimos años por su utilización cotidiana tanto en los ámbitos de planificación como de gestión de cuencas hidrográficas. Sin el empleo de estas herramientas se hace difícil alcanzar resultados de detalle que sean objetivos, debido principalmente a que el elevado número de simplificaciones necesarias para abordar el problema sino se utilizan estos modelos puede llevar a conclusiones no reales.

Garrote *et al.* (1999) realizaron una evaluación de los incrementos de capacidad de embalses necesarios debido a los impactos producidos por el cambio climático. En este estudio se calculó el incremento de la capacidad de embalses que sería necesario para mantener los sistemas de explotación en el mismo nivel de disponibilidad actual (1999), asumiendo escenarios con reducción en las series de aportaciones debidas al cambio climático.

Estos autores emplearon los escenarios climáticos y la evaluación de recursos hídricos realizada en el Libro Blanco del Agua en España. Los escenarios climáticos utilizados correspondían a un aumento de temperatura media anual entre 1°C y 4°C y unos descensos generales de los valores de la precipitación media anual comprendidos entre el 5% y el 15%.

El análisis del incremento necesario en la capacidad de regulación en España la realizaron mediante el empleo del modelo de optimización de cada una de las cuencas de los ámbitos de planificación del territorio peninsular utilizando para ello el programa OPTIGES. Este modelo se empleo para estimar la máxima demanda que se puede atender en cada nudo cumpliendo el criterio de garantía siguiente, según el cual se considera fallo cuando se cumple una de las tres condiciones siguientes:

1. Déficit anual superior al 50% de la demanda anual.
2. Déficit en dos años consecutivos superior al 75% de la demanda anual.
3. Déficit en 10 años consecutivos superior al 100% de la demanda anual.

En el escenario de cambio climático moderado, la reducción de las aportaciones en la España peninsular es de un 5%, lo que supone una reducción del 4% del recurso disponible. En el caso concreto de la cuenca del Segura esta disminución alcanza 9%.

En el escenario del cambio más severo, la reducción conjunta de las aportaciones es del 14% con una reducción del recurso disponible del 11%. Por ámbitos, Guadiana I experimenta la mayor disminución de las aportaciones con un 24%. Sin embargo en la cuenca del Segura se produce una disminución de aportaciones del 22% lo que supone la mayor disminución en el recurso disponible con un 18%.

7.3.5. Impactos sobre el medio ambiente, social y económico relacionado con los recursos hídricos

Muchos de los sistemas de la Tierra que sostienen a las sociedades humanas son sensibles al clima y a los recursos hídricos y sufrirán los impactos debidos a cambios en ellos. Se pueden esperar impactos en la circulación de los océanos, el nivel del mar, el ciclo del agua, los ciclos del carbono y los nutrientes, la productividad de los ecosistemas naturales, la productividad de la agricultura, los pastizales y los bosques, el comportamiento, la abundancia y la supervivencia de especies de plantas y animales, etc.

Los cambios en estos sistemas en respuesta a la variación en los recursos hídricos afectarán al bienestar humano, tanto positiva como negativamente. Los impactos sobre el bienestar humano se sentirán a través de cambios en la oferta y en la demanda de agua, cambios en las oportunidades para utilizar el medio ambiente con fines de recreación y turismo distintos del

consumo, cambios en el valor de la “no utilización” del medio ambiente hídrico como valor cultural y valor de preservación, cambios en la pérdida de bienes y vidas a causa de fenómenos hidrológicos extremos, y cambios en la salud humana.

Los impactos del cambio climático sobre los recursos hídricos influirán en las perspectivas del desarrollo sostenible en diferentes partes del mundo y puede que den lugar a la ampliación de las desigualdades existentes, ya que como regla general los países más áridos se verán más afectados por estos cambios.

En algunos entornos, los impactos del cambio climático pueden causar disturbios sociales, declinación económica y desplazamientos de población que podrían afectar a la salud humana. Los impactos sobre la salud relacionados con los desplazamientos de población resultantes de procesos de desertificación, desastres naturales o de la degradación del medio ambiente son sustanciales.

En general, los impactos negativos del cambio climático en la salud serán mayores en poblaciones vulnerables de menores ingresos, predominantemente en los países tropicales y subtropicales.

Hay muchas técnicas convencionales y avanzadas específicas que pueden contribuir a mejorar la ordenación y planificación del medio ambiente hídrico, incluidos los instrumentos basados en el mercado para combatir la contaminación, la gestión de la demanda, la evaluación de los impactos ambientales, los planes ambientales estratégicos, los procedimientos de auditoría ambiental y los informes sobre el estado del medio ambiente.

Un aumento en la frecuencia y magnitud de los sucesos extremos podría tener efectos adversos en todos los sectores y las regiones. La agricultura y los recursos hídricos pueden ser particularmente vulnerables a los cambios en los extremos hidrológicos y a cambios en las temperaturas. Las crecidas pueden dar lugar a la difusión de enfermedades transmitidas por el agua y por vectores, en particular en países en desarrollo. Muchos de los daños y perjuicios monetarios de los sucesos extremos tendrán repercusiones sobre una amplia gama de instituciones financieras, desde aseguradores y reaseguradores hasta inversionistas, bancos y fondos para el socorro en caso de desastre. Los cambios en las estadísticas de los sucesos extremos tienen consecuencias para los criterios de diseño de las aplicaciones técnicas, que se basan en estimaciones probabilísticas.

El cambio climático puede reducir la disponibilidad de agua en algunas regiones con estrés hídrico y aumentarla en otras. En los sectores municipal e industrial, es probable que algunos factores que no dependen del clima sigan teniendo efectos muy sustanciales sobre la demanda de agua. El regadío, sin embargo, está más determinado por el clima, y su aumento o disminución en una zona determinada depende del cambio en las precipitaciones. Si las temperaturas son más altas mayor será la demanda de los cultivos causada por la evapotranspiración.

7.4. ZONAS MÁS VULNERABLES

7.4.1. Concepto y criterios de vulnerabilidad

La vulnerabilidad de un territorio a las variaciones en los recursos hídricos está estrechamente relacionada con los usos que tienen lugar sobre el mismo. Un mismo espacio geográfico es más vulnerable cuanto mayores son sus necesidades de agua y mayores son las garantías que precisa. Evidentemente, a igualdad de volumen de demanda de agua será mucho más vulnerable un territorio si ese volumen se destina al abastecimiento urbano que si es para el regadío, ya que en este último caso las garantías de suministro son menos exigentes.

Con carácter general los territorios con mayor estrés hídrico deberían ser considerados los más vulnerables a posibles variaciones en los recursos hídricos.

Existen muchos indicadores de estrés hídrico, la mayoría de ellos relacionan demandas de agua y los recursos hídricos renovables. En el siguiente apartado se muestran dos indicadores de estrés hídrico para el conjunto del territorio español: los déficit entre demandas consuntivas y los recursos potenciales y el denominado índice consumo, que se obtiene como el cociente entre la demanda consuntiva y el recurso potencial.

7.4.2. Vulnerabilidad frente a variaciones en los recursos hídricos en España

Un indicador de la vulnerabilidad de los distintos territorios en España puede obtenerse estableciendo el balance entre los mapas de recursos potenciales y demandas consuntivas.

Se entiende por recurso potencial la fracción no reservada de los recursos naturales más los recursos procedentes de la desalación de agua mar y por las transferencias existentes.

El mapa de demandas consuntivas puede obtenerse aplicando a la demanda de riego un 80% y para la demanda urbana e industrial un 90% en la franja costera peninsular de 10 km, un 80% en la misma franja costera insular y un 20% en el resto del territorio, reflejando de esta forma las distintas posibilidades de reutilización directa o indirecta de los recursos.

Estos criterios fueron aplicados en la elaboración del Libro Blanco del Agua en España (MIMAM 2000), obteniéndose un mapa con los balances en cada uno de los sistemas de explotación de recursos definidos en las cuencas españolas. El balance agregado por sistemas de explotación presupone la completa utilización de los recursos potenciales generados en todo el territorio del sistema, además, en su caso, de los recursos procedentes de la desalación de agua de mar y de las transferencias de otros sistemas. Esto representa una cota máxima de aprovechamiento que requeriría disponer del conjunto de infraestructuras necesarias y contar con las necesarias condiciones de calidad. En la figura 7.24 se muestran los sistemas de explotación con déficit.

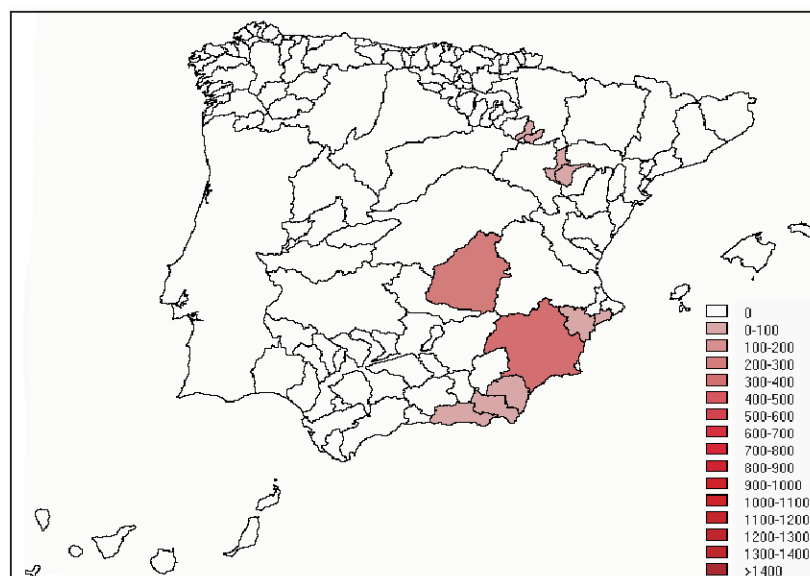


Fig. 7.24. Mapa de déficit ($hm^3/año$) en los sistemas de explotación (tomado de MIMAM 2000).

El mapa anterior muestra que los déficit se localizan fundamentalmente en el Segura, cabecera del Guadiana, Vinalopó-Alacantí y Marina Baja en el Júcar, zona oriental de la cuenca del Sur, junto con otros sistemas de menor extensión en la margen derecha del Ebro. Ahora bien, a pesar de que todos estos sistemas son deficitarios, la magnitud de los problemas es, obviamente, muy distinta, y no es comparable el déficit de los sistemas de la margen derecha del Ebro, de mucha importancia local, con el de la cabecera del Guadiana o el del conjunto formado por los sistemas meridionales del Júcar, el Segura y los sistemas orientales del Sur, con un impacto territorial y dimensión notablemente superior (MIMAM 2000).

Este mapa puede dar lugar sin embargo a interpretaciones erróneas, pues al tratarse de cifras absolutas están condicionadas por el tamaño de los sistemas, que varía mucho de unos casos a otros. Para evitarlo en MIMAM (2000) se elaboró el denominado índice de consumo, que relaciona la demanda consuntiva con los recursos potenciales. Este índice da lugar al mapa de riesgo de escasez que se muestra a continuación y que podría entenderse como un buen indicador del grado de vulnerabilidad de los distintos sistemas de explotación de recursos hídricos en España a las variaciones en los recursos hídricos. Los más vulnerables son aquellos clasificados como de escasez estructural, siguiéndoles en un menor grado los clasificados como de escasez coyuntural.

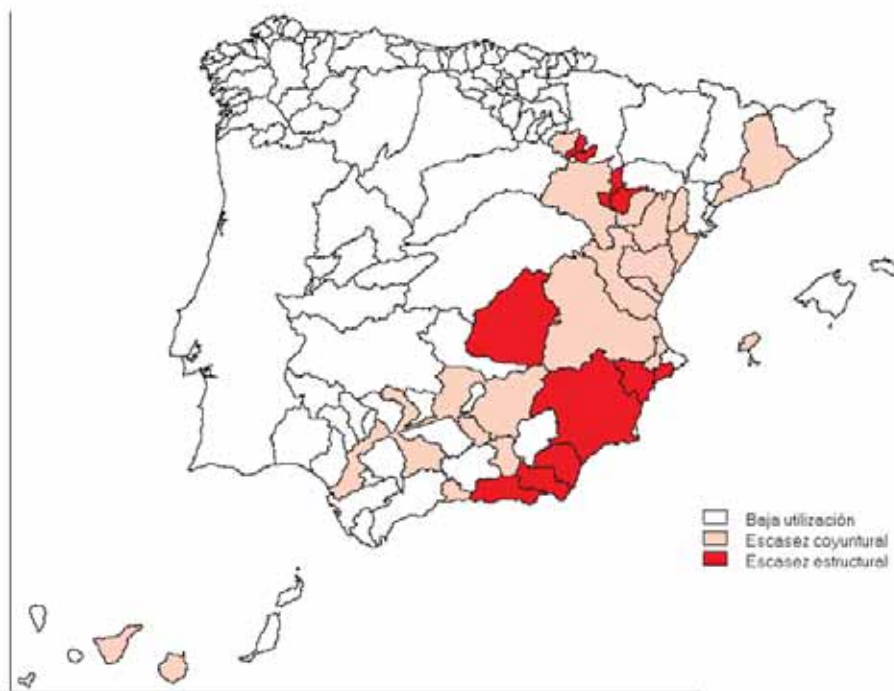


Fig. 7.25. Mapa de riesgo de escasez en los sistemas de explotación (tomada de MIMAM 2000).

En la figura 7.25, puede apreciarse que los sistemas deficitarios padecen una escasez de tipo estructural, es decir, el recurso potencial, incluyendo reutilización, desalación y transferencias, es sistemáticamente inferior al nivel de consumo que se pretende alcanzar. Pero existe, además, un conjunto de sistemas que, aun presentando superávit, corren el riesgo de sufrir una escasez de carácter coyuntural, debido a que sus niveles de consumo se hallan relativamente próximos al recurso potencial. En tales condiciones, secuencias hidrológicas adversas podrían dar lugar a problemas de suministro por insuficiencia de recursos.

Como puede apreciarse, una parte importante de los sistemas de explotación de la mitad suroriental de la península, junto con algunos sistemas de la margen derecha del Ebro, parte de Cataluña y algunas islas, estarían sometidos, aun en el hipotético caso de máximo aprovechamiento de los recursos potenciales, incluyendo desalación y transferencias, y máximo grado de reutilización, a una escasez de recursos de carácter estructural o coyuntural.

7.5. PRINCIPALES OPCIONES ADAPTATIVAS

7.5.1. Conceptos y clasificación de los efectos paliativos de la disminución de recursos hídricos

De los apartados anteriores se desprenden tres principales impactos del cambio climático sobre los sistemas hidrológicos: 1) el calentamiento global producirá un aumento de la demanda de agua por parte de los ecosistemas terrestres y de los sistemas agrícolas 2) el cambio climático representará muy probablemente una reducción de los recursos hídricos disponibles en la mayor parte de las cuencas, y 3) es muy presumible que se acentúen las situaciones extremas: sequías y avenidas.

Frente a este aumento de presión sobre los sistemas de recursos hídricos, que ya están por encima del nivel de sobreexplotación en la mayor parte de las cuencas, se pueden proponer tres tipos de opciones adaptativas (véase, por ejemplo, MMA 1998): aumento de la oferta, gestión de la demanda, y mejora de la gestión de los sistemas.

La primera se basa tanto en acciones tradicionales (aumento de los volúmenes embalsados, trasvases) como en alternativas todavía no suficientemente desarrolladas (recursos subterráneos) y en el desarrollo de recursos no convencionales (cosecha de agua, desalación, reutilización). La segunda se basa en reducir los consumos mediante diversos procedimientos, como políticas tarifarias o de subsidios, y en mejoras técnicas (canalizaciones, regadíos). La tercera se basa en mejorar los conocimientos sobre los sistemas climático e hidrológico y perfeccionar y aplicar métodos e instrumentos para la gestión de los recursos, especialmente en condiciones extremas (sequías).

En cualquier caso, es necesario que las acciones emprendidas no atenten la sostenibilidad del sistema, y, en particular, que sean compatibles con la Directiva Marco del Agua (DMA). Las opciones propuestas deberían aplicarse independientemente del cambio climático a fin de disminuir los niveles de sobreexplotación, aumentar la robustez de los sistemas frente a situaciones extremas, y facilitar la recuperación del buen estado ecológico. El cambio climático, como indica una de las conclusiones principales del proyecto ACACIA (Parry 2000), representa un serio reto para el establecimiento de una gestión sostenible de los recursos hídricos.

Ante las evidentes limitaciones del presente documento, se intentará realizar una revisión sintética, poniendo más énfasis en las ventajas e inconvenientes de cada una de ellas que en detalles de tipo técnico.

7.5.2. Opciones de aumento de recursos

El aumento de los recursos disponibles puede obtenerse mediante opciones muy diversas, desde las basadas en técnicas de la antigüedad (cosecha de agua), pasando por las más características de mediados del siglo XX (embalses), aprovechamiento de aguas de tormentas, hasta las técnicas que utilizan los últimos adelantos técnicos (desalación). A continuación se enumeran los principales tipos juntamente con su análisis crítico.

Reforestación

Tradicionalmente se ha considerado que el aumento de la extensión y densidad de la superficie forestal i) reduce la erosión de los suelos, ii) disminuye la frecuencia e intensidad de las crecidas, iii) mejora los recursos superficiales y subterráneos, e incluso iv) aumenta la precipitación. Sin embargo, las experiencias acumuladas durante el siglo XX en todo el mundo, en distintos ambientes y a distintas escalas, han desmentido o matizado estas presunciones (véase un resumen en Gallart y Llorens 2003): i) la mejora de la cubierta vegetal reduce la erosión, pero en muchas ocasiones la destrucción de la vegetación preexistente, los trabajos con medios mecánicos y la abertura de caminos contrarresta este efecto; ii) la cubierta forestal reduce apreciablemente las crecidas de poca o mediana magnitud en cuencas pequeñas, pero no afecta las grandes avenidas en cuencas medianas o grandes; iii) el establecimiento de una cubierta forestal en una cuenca con vegetación de bajo porte determina una disminución de los recursos superficiales y subterráneos. El problema es muy complejo, la desaparición de los árboles hace aumentar los primeros 2 o 3 años las aportaciones. Por un lado aumenta la interceptación foliar, pero por otro mejora la capacidad de almacenamiento del suelo y disminuye la evaporación del suelo; iv) el aumento de la cubierta forestal determina un aumento de la evapotranspiración real, de modo que puede representar un aumento de la precipitación, pero este efecto no compensa el aumento de la evapotranspiración y solamente se produce a escala continental.

No cabe duda de que existen muchas áreas en España que por diversas causas (abandono de actividades rurales, sobre pastoreo, incendios...) han sufrido una degradación de la cubierta vegetal y requieren actuaciones de regeneración. Por otra parte, algunas de las estrategias de mitigación del cambio climático se basan en la reforestación como una medida de secuestro de carbono, lo que se contempla en el acuerdo de Kyoto. Sin embargo, en el diseño de estas actuaciones, debe considerarse que las ventajas ambientales tienen como contrapartida un coste hidrológico.

Por el otro lado, cabe la posibilidad de recomendar el mantenimiento de cubiertas vegetales escasas en zonas limitadas donde los inconvenientes ambientales como el riesgo de erosión sean muy bajos en relación con el interés en minimizar la evapotranspiración (zonas de recarga de acuíferos de importancia estratégica, zonas de recepción para la cosecha de agua).

Cosecha de agua de lluvia o rocío

Desde la Antigüedad se han utilizado sistemas de captación de agua de lluvia mediante diversos sistemas para pequeñas explotaciones agrícolas o el suministro a viviendas aisladas o pequeñas comunidades. La mayor parte de estos dispositivos han caído en desuso en España por diversas razones técnicas, económicas y culturales. Sin embargo en los últimos años se está produciendo en distintos lugares del mundo una renovación de estas tecnologías por sus ventajas de bajos costes económico y ambiental y su fácil implementación en lugares remotos. En 1991 se creó la *International Rainwater Catchment Systems Association* (<http://www.ircsa.org/>), una asociación internacional para su desarrollo científico, técnico y educacional. El PNUMA también está apoyando intensamente estas tecnologías (UNEP 1998).

La principal limitación de estas técnicas es la escasa seguridad del suministro, pero pueden ser de utilidad para mejorar las técnicas de reforestación, favorecer la recarga de acuíferos, y utilizarse alternativamente con recursos subterráneos para favorecer la recuperación de los acuíferos durante períodos húmedos.

Aumento de la capacidad de embalse, trasvases entre cuencas

Una de las opciones tradicionales ante una previsible disminución de los recursos y aumento de su variabilidad temporal es el incremento de la capacidad de embalse o el trasvase de recursos entre cuencas. Sin embargo se ha demostrado en los últimos decenios que los elevados costes económicos sociales y ambientales de estas estructuras raramente son compensados por sus beneficios (MMA, 1998; WCD 2000). En España, además, ya existe un número récord de presas y la mayor parte de los ríos ya están sobrerregulados. Desde la adopción de la DMA, los requerimientos legales y ambientales para la construcción de nuevas presas son muy restrictivos en Europa (Barreira 2004).

Aguas subterráneas

Las aguas subterráneas tienen un papel muy importante en España. En la actualidad, las aguas subterráneas riegan aproximadamente un tercio de la superficie de regadío, pero producen más de la mitad de los ingresos. El agua subterránea es la fuente principal para el abastecimiento de las pequeñas localidades y es un recurso estratégico en casos de sequía prolongada.

Hasta 1985 las aguas subterráneas no estaban reguladas, lo que facilitó un rápido desarrollo de su explotación por particulares pero originó muchos casos de sobreexplotación. Actualmente, más del 20% de las unidades hidrogeológicas están sobreexplotadas (bombeo similar o mayor que la recarga). La contaminación por nitratos y por intrusión de la cuña salina marina son los principales problemas de calidad de las aguas subterráneas. Desde 1985, con la promulgación de la Ley de Aguas, las aguas subterráneas son de dominio público, pero la Administración, por falta de medios financieros, humanos y técnicos, no ha sido capaz desde esta fecha, salvo en algunos casos, de ordenar la excesiva explotación de los acuíferos ni de establecer una gestión conjunta suficiente de las aguas superficiales y subterráneas.

Algunas opciones de explotación de las aguas subterráneas pueden ser de gran interés ante el Cambio Climático. En particular, la *utilización alternativa* (utilización de recursos superficiales en períodos húmedos y subterráneos durante los secos), la recarga artificial durante períodos húmedos o la sobreexplotación temporal de algunos acuíferos, sobre todo litorales, durante períodos de sequía se apuntan como algunas de las opciones (MMA 1998).

Desalación

La desalación tiene ya una larga tradición en España, ya que se implantó por primera vez en Canarias en 1969. Las técnicas de desalación han experimentado grandes avances técnicos en los últimos años, especialmente desde el punto de vista de los costes económicos. En la actualidad estas tecnologías permiten obtener recursos hídricos a partir de aguas marinas o de baja calidad a un precio que permite incluso su utilización para algunos tipos de regadíos de elevado rendimiento. Los principales inconvenientes son el elevado coste energético y la eliminación de las salmueras resultantes. Una opción sostenible es utilizar energías renovables como apoyo a la desalación. En Canarias hay varias experiencias de desalación a gran escala donde se utiliza la energía eólica con el objeto de reducir el coste energético. El Instituto Tecnológico de Canarias (ITC) ha desarrollado varias aplicaciones para la realización de este tipo de estudios y algunas experiencias a pequeña escala de sistemas totalmente autónomos con energía eólica o solar.

Reutilización

Se entiende por reutilización directa el aprovechamiento directo de efluentes depurados, con un mayor o menor grado de tratamiento previo, mediante su transporte al segundo punto de aprovechamiento a través de una conducción específica, sin vertido intermedio a un cauce público.

Las posibilidades de reutilización están condicionadas por las disponibilidades de efluentes tratados, por la calidad de estos efluentes, y por los requerimientos de calidad para el segundo uso. La mayor parte del agua reutilizada se emplea para regadío, y, en mucha menor proporción, para usos recreativos y campos de golf, usos municipales, ambientales e industriales. El uso para agua potable está prohibido por la Ley.

Las directrices para regular la reutilización del agua no solamente consideran unos parámetros de calidad mínimos para cada uso, sino también metodologías y criterios de control de la calidad de los análisis, sistemas de vigilancia y algunas normas de seguridad para reducir los riesgos, como limitaciones al riego por aspersión y almacenamiento y etiquetaje de las aguas no potables. Urge disponer de normas y directrices a escala Europea y Española.

Los principales problemas son la incertidumbre sobre el riesgo potencial para la salud pública (en particular a largo plazo en la recarga de acuíferos), el coste elevado de los procesos de depuración más intensos, y el hecho de que el agua depurada no se restituye a los cauces naturales, siendo necesario establecer caudales ecológicos para evitar una seria agresión ambiental en las zonas secas (AEMA 2002).

7.5.3. Opciones de optimización del uso. Gestión de la demanda

La necesidad de reducir la presión sobre los sistemas hidrológicos para no comprometer su sostenibilidad y la creciente limitación del aumento de la disponibilidad de agua de calidad suficiente está llevando a que la planificación del agua se centre cada vez más en las posibilidades de reducir la demanda. A continuación se resumen algunas de las opciones de gestión de la demanda (MMA 1998; AEMA 2002).

La información a los ciudadanos y el uso de sencillas técnicas de ahorro, como los de la descarga de las cisternas de los inodoros, puede llevar a reducciones hasta del orden del 40% del consumo urbano. Sin embargo, en muchas ciudades el suministro de agua está en manos de empresas privadas, siendo el ahorro del agua contrario a sus intereses.

Los sistemas de medición del agua, incluso sin considerar la recaudación, pueden producir un descenso del 10% al 25% del consumo. Las pérdidas en las redes de distribución suelen ser muy considerables (media del 28% con casos extremos del 50% en España) y dependen de la antigüedad de la red. La reducción de las pérdidas es un proceso costoso y tiene un límite técnico de entre el 10% y el 15%.

Las políticas de tarificación son también un mecanismo para controlar la demanda, sobre todo cuando se penaliza el consumo excesivo. Aunque los precios varíen mucho según los usuarios (domésticos, industriales, agrarios), la experiencia demuestra que el aumento del precio del agua reduce el consumo.

El principal consumidor de agua en España es el regadío. El consumo actual es insostenible, ya que ha llevado a la sobreexplotación de la mayor parte de las cuencas y de un creciente número de acuíferos, así como a la degradación de la calidad de las aguas superficiales y subterráneas principalmente por nitratos y sales procedentes del lavado de los suelos. Las previsiones del PHN, del Plan nacional de Regadíos y de los diversos Planes de Cuenca son

cifras políticas sin ninguna base realista con criterios de sostenibilidad, y todavía menos ante el CC. Será por lo tanto necesario revisar a la baja las previsiones de crecimiento e incluso la extensión actual de los regadíos. También será necesaria la sustitución en algunas zonas de cultivos de elevado coste hidrológico (arroz, maíz) por otros de menor coste y el cese de irrigación de suelos inadecuados. Debe asegurarse que las políticas de subvención de las actividades agrícolas sean favorables a la sostenibilidad hidrológica. La mejora de las técnicas de riego y de la eficiencia de las conducciones pueden llevar a un ahorro significativo, aunque los costes económicos son elevados y algunas de las técnicas de elevada eficacia hidrológica son insostenibles por causar la salinización de los suelos.

En el sector industrial se requieren políticas adecuadas de tarificación y disposiciones legales que favorezcan las tecnologías limpias y de poco consumo de agua. Es necesario el control eficaz de tomas directas, sobre todo de aguas subterráneas, y de vertidos.

7.5.4. Opciones de mejora del sistema de recursos hidráulicos y de su gestión.

Se trata de actuaciones encaminadas a disponer de una mayor información sobre los sistemas de recursos hídricos y a obtener herramientas para facilitar su gestión más eficaz.

Las redes de medida de precipitación, meteorología, manto nival, caudales y niveles piezométricos deberían mejorarse para obtener una información adecuada sobre el ciclo hidrológico. En particular, la precipitación y meteorología se observa principalmente en poblaciones en lugar de las áreas de cabecera más relevantes para la generación de los recursos, y la red foronómica en cuencas de régimen natural es claramente insuficiente.

Los modelos de simulación de las aportaciones en régimen natural deben ser mejorados para reproducir el balance de agua del modo más físico posible, considerando el agua del suelo y diferenciando entre la evaporación del agua interceptada y el agua transpirada por la vegetación. El paso de tiempo debería ser diario, y se debe considerar explícitamente la incertidumbre de las predicciones. Los modelos de simulación y optimización de los sistemas de explotación deberían integrarse en Sistemas de Apoyo a la Decisión utilizables por usuarios poco especializados.

Las bases de datos sobre recursos, demandas y sistemas de explotación deben ser actualizadas en plazos breves y estar disponibles utilizando las nuevas tecnologías.

La constitución de los Centros de Intercambio de Derechos de Uso del Agua, previstos en la Ley de Aguas, puede mejorar la gestión de las aguas especialmente en condiciones de escasez, al favorecer la percepción del agua por parte de los usuarios como un bien escaso y facilitar la implantación de la recuperación de costes prevista en la DMA (Moral *et al.* 2003).

La gestión de los recursos durante períodos de sequía requiere una mención especial. En primer lugar, es necesario desarrollar métodos mejorados para la detección temprana, para lo cual se requiere información actualizada sobre datos de precipitación, clima, humedad del suelo, caudales, niveles piezométricos en los acuíferos y reservas en embalses. La utilización de predicciones meteorológicas a largo plazo así como la posible correlación de los períodos de sequía con indicadores globales como las oscilaciones del Atlántico Norte o del Niño en el pacífico deben ser estudiadas e implementadas en el sistema de detección. En segundo lugar, es necesario establecer planes de actuación que establezcan con claridad las reglas de explotación de los sistemas, en particular los recursos subterráneos, para diversos niveles de riesgo o severidad de la sequía.

Por último, la gestión sostenible de las cuencas requiere una gestión integrada de las aguas y del territorio. Cualquier decisión sobre el territorio representa una decisión sobre la cantidad y calidad del agua (Falkenmark 2000).

7.6. REPERCUSIONES SOBRE OTROS SECTORES O ÁREAS

7.6.1. Sectores de influencia en la variación de recursos hídricos por el cambio climático

La variación en los recursos hídricos a consecuencia del posible cambio climático, está condicionada por la influencia de otros sectores también afectados por el cambio climático.

En principio hay tres sectores que inciden, o pueden incidir, en los recursos hídricos y por tanto, las alteraciones en estos sectores pueden condicionar alteraciones en los recursos hídricos en cantidad y calidad.

Todos los sectores que estén relacionados con el suelo y la cobertura vegetal pueden ser de influencia en la generación de escorrentías, pudiendo citarse:

Sector forestal

El aumento de masas forestales disminuye la intensidad de las crecidas y consigue niveles de mayor regularidad temporal en la generación de escorrentías.

Recursos edáficos

La generación o destrucción de suelos, condiciona la capacidad de retención de estos y por tanto las cantidades de agua que quedan pendientes de un proceso de evapotranspiración. Además influyen igualmente en la intensidad y regularidad temporal de las avenidas.

Biodiversidad vegetal

Las especies vegetales, con su específica profundidad radicular, sus necesidades de agua y las características de los suelos donde se asientan, condicionan el balance de agua y la generación de aportaciones.

7.6.2. Repercusiones de la variación de los recursos hídricos en otros sectores

A su vez, los cambios que se producen en los recursos hídricos afectan a otros muchos sectores de una forma importante. En los once sectores que se citan a continuación la influencia de los recursos hídricos es clara y notable.

Ecosistemas terrestres

Flora, fauna y en general todo ser vivo, tiene condicionada su existencia a la disponibilidad de agua de la calidad requerida en cada caso. La variación en cantidad y calidad de recursos hídricos y su distribución en tiempo y espacio pueden condicionar la existencia y desarrollo de ecosistemas terrestres.

Ecosistemas acuáticos continentales

Las zonas húmedas y muy especialmente en España, albergan una fauna rica y variada en comparación con su entorno. Dependen de las masas de agua que las constituyen y de las

fuentes naturales de suministro de estas aguas. La variabilidad espacial de la aportación puede jugar también un papel de importancia en atención a los movimientos de aves migratorias.

Biodiversidad vegetal

La biodiversidad vegetal está sujeta a la presencia del agua necesaria para el desarrollo de las diversas especies vegetales y las variaciones en la aportación pueden condicionar la desaparición de especies o la sustitución por otras de mejor adaptación. Al mismo tiempo, este sector se manifiesta como de incidencia en la generación de recursos hídricos.

Biodiversidad animal

De una manera análoga la biodiversidad animal está sujeta a la presencia del agua necesaria para la vida de las diversas especies animales y las variaciones en la aportación pueden condicionar la desaparición o migración de especies.

Sector agrícola

En España este sector es crítico. Se riegan más de 3 millones de ha 2 con aguas superficiales y 1 con aguas subterráneas. El regadío es posible gracias a un proceso de regulación generalizada con embalses y acuíferos. La disminución de precipitaciones ocasionará aumento del déficit de agua para riego; es decir la garantía de uso se verá disminuida. Mejorar la regulación no será suficiente, dado que ya es muy alta y no son posibles grandes mejoras.

Sector forestal

Es otro de los sectores de doble entrada, afectado por la cantidad y distribución espacial de la aportación y al mismo tiempo condicionante en el proceso de generación de recursos hídricos y muy especialmente de la cantidad e intensidad de las avenidas.

Riesgos naturales de origen climático

La distribución espacial de la aportación previsiblemente más heterogénea a consecuencia del cambio climático e incluso con el incremento en número e intensidad de sucesos extremos es previsible que haga más crítico el problema de las avenidas y aumenten en frecuencia e intensidad los deslizamientos de ladera. Es un fenómeno que aún con grandes incertidumbres se presenta de especial estudio en España habida cuenta de lo secular de los riesgos de vidas humanas en avenidas y deslizamientos.

Sector energético

El sector energético está condicionado por la existencia de agua suficiente, principalmente en producción de energía hidroeléctrica pero también para cubrir necesidades de refrigeración en térmicas y nucleares. A pesar de la gran regulación existente, el sector hidroeléctrico se verá afectado ante la previsible disminución de aportaciones consecuentes al cambio climático. Además de este planteamiento de carácter general debe tenerse en cuenta que la disminución de recursos hará que la agricultura demande un tipo de regulación mas adaptado a sus necesidades con desembalse más irregular y ello influirá en la producción hidroeléctrica de demanda más regularizada.

Sector turístico

El sector turístico condiciona un tipo de demanda muy heterogénea en el tiempo, como ocurre con la agricultura. La disminución de recursos y aún más su peor distribución a lo largo del año será un factor de incidencia en el sector turístico. Es precisamente las áreas mediterráneas, con escasas o nulas lluvias de estío, las de mayor demanda turística y son estas zonas aquellas en que los recursos hídricos pueden sufrir mayores disminuciones porcentuales ante el previsto cambio climático.

Salud humana

La disminución de caudales, mucho más acusada en los meses de estío, puede condicionar parámetros de la calidad del agua con incidencia en la salud humana.

7.7. PRINCIPALES INCERTIDUMBRES Y DESCONOCIMIENTOS**7.7.1. Análisis de incertidumbres y su importancia relativa**

En lo referente a la estimación de recursos hídricos a consecuencia del posible cambio climático se deben considerar tanto las incertidumbres inherentes a la estimación por simulación del aumento de temperaturas y disminución de precipitación (para el caso de España), como las incertidumbres que se presentan en el proceso de generación de recursos; en el cual influye el suelo y la cobertura vegetal de una parte y el sistema de recursos hidráulicos y el modo de gestionarlo, de otra.

De estos dos grandes grupos de incertidumbres; los datos de base y el proceso de generación de escorrentías, tienen los primeros una mayor importancia relativa. Esta afirmación se basa en que en los cálculos sobre la generación de recursos existen muchos métodos que permiten adecuados contrastes de los resultados.

7.7.2. La incidencia de los datos de base. Escenarios

Las incertidumbres básicas de mayor relevancia, se refieren a la proyección de la precipitación y la temperatura para los horizontes de este siglo. Son los datos de base y cualquier cálculo o estimación de escorrentías parte de estos parámetros climáticos. Se ha visto además, que no hacen falta grandes variaciones de precipitación o temperatura para ocasionar variaciones importantes en la disminución de las escorrentías, especialmente con el tipo de clima semiárido, desgraciadamente frecuente en España.

Los cálculos de aportaciones se llevan a cabo con estudios hidrológicos suficientemente afinados, al menos en España, estimándose por la mayoría de los especialistas que los errores admisibles, en un buen estudio, son del 15%. Sin embargo para ello se requieren datos fiables a nivel mensual series homogéneas y representativas y una adecuada distribución de la información a nivel espacial. Por ello la fiabilidad de las evaluaciones de recursos frente al previsible cambio climático aumentará a medida que los escenarios sean más reales y den mejor información sobre la distribución temporal de la precipitación y de la temperatura.

Incertidumbres en los datos de base

El aumento del valor real de la temperatura

La disminución de la precipitación

La distribución de ambos en el espacio con la adecuada discretización

7.7.3. Distribución espacial y temporal de la precipitación y la temperatura

Los modelos de simulación son demasiado groseros en su discretización espacial para dar respuesta a cálculos suficientemente afinados que cubran las necesidades de información precisas en España. Uno de los errores más frecuentes y convenientemente detectados en muchos estudios hidrológicos en España consiste en evaluar la disminución de aportaciones debidas al posible cambio climático con estudios a nivel de cuenca (Ayala e Iglesias 2000) mientras que los cálculos extendidos a subcuencas o unidades más pequeñas (Fernández Carrasco 2002) suelen tener un mayor grado de fiabilidad. Esta afirmación es válida no sola para los estudios de cambio climático sino para la mayor parte de los estudios hidrológicos en España.

La distribución temporal de los parámetros climáticos a lo largo del año, como se ha visto en el punto 1, condiciona completamente la generación de escorrentías. Precipitaciones importantes en épocas muy cálidas no generan aportaciones que si se generarían con precipitaciones muy inferiores en los meses de invierno.

Esta es una incertidumbre especialmente crítica pues puede tener aún mas influencia que el valor de aumento de la temperatura a nivel anual.

De otra parte se tiene la incertidumbre de cómo variarían las series no dentro del año, sino a nivel interanual. Esta información no es conocida ni hasta estimada, conociéndose un solo caso de tanteo en Ayala e Iglesias (2000) donde se definieron unas series anuales que tenían de media la media de la serie media deducida y la desviación típica era coincidente con las de las series actuales. Se tendrán que mejorar los mecanismos de generación de series para corregir en lo posible esta incertidumbre.

Incertidumbres en la distribución espacial y temporal de precipitación y temperatura

La distribución mensual a lo largo del año de precipitación y temperatura
La distribución interanual de precipitación y temperatura (series)
La evaluación a nivel de subcuencas y pequeñas cuencas

7.7.4. Comportamiento del suelo y recarga de acuíferos

Las incertidumbres sobre el comportamiento del suelo y los factores reales que condicionan la recarga son muy variadas y alcanzan desde incertidumbres en los métodos de cálculo de la evapotranspiración potencial, la intercepción foliar o el balance de agua en el suelo hasta los parámetros que inducen a que la parte de la lluvia útil que pasa a recargar los acuíferos sea mayor o menor. Hay métodos empíricos que se han validado para determinadas zonas con topografías dadas y antes valores climáticos dados, pero que no se tiene validada su utilidad frente a unos valores diferentes inherentes al cambio climático.

En lo referente a la infiltración que va a pasar a formar parte de la recarga de los acuíferos, se sabe que esta no puede producirse mientras el suelo no tenga excedentes. Es decir; cuando el suelo una vez saturado sigue recibiendo agua de precipitación, aparecen excedentes que son la lluvia útil de la cual una parte se infiltra para constituirse en recarga de acuíferos. No se conocen los parámetros que inciden en definir cuantitativamente esta división y es, sin embargo importante conocerlos dado que si como parece, o se plantea a nivel de hipótesis depende del tiempo que el suelo permanece saturado cada año y de los valores de permeabilidad del subsuelo, pudiera ocurrir que el cambio climático podría no afectar a las aguas subterráneas, o afectarlas intensamente en sentido positivo o negativo; la realidad dependería de cada caso.

Incertidumbres del suelo y recarga de acuíferos

Métodos adecuados para estimar la posible evaporación y evapotranspiración
 Los fenómenos específicos de la recarga de acuíferos
 Cálculos de lluvia útil en las nuevas circunstancias climáticas

7.7.5. Limitaciones de los modelos de simulación

Los modelos de simulación numérica y los analíticos basados en expresiones empíricas han sido usados tradicionalmente con buenos resultados, pero pueden hacerse algunos comentarios aclaratorios. En principio un modelo es tan bueno como los datos que se le suministre, sin embargo los realizados y en realización tienen un proceso de ajuste o calibración que les da una validez especial a la hora de su explotación. Los modelos para la evaluación de aportaciones frente a las circunstancias específicas que arrastra el cambio climático y que se plasman en unos escenarios determinados no pueden ser calibrados dado que tales series no han ocurrido en la realidad y no es posible en consecuencia comparar lo real acontecido con lo calculado por un modelo.

Los modelos de simulación tendrán que validarse con otras series actuales a las que se tendrá que suponer armonizadas con otras que se derivarán del cambio. Estas son algunas de las limitaciones básicas del proceso de modelado que tendrá que sufrir desarrollos y mejoras para eliminar en parte sus limitaciones y a su utilización fiable en estudios del cambio climático.

7.8. DETECCIÓN DEL CAMBIO**7.8.1. Evaluación continua de recursos hídricos**

El cambio que experimentan los recursos hídricos a consecuencia de los cambios de clima esperables es detectable con el hábito de medida y cuantificación que está establecido en España. Los cambios en los recursos hídricos, se detectan con un plan de medidas de caudales en río, piezometría de aguas subterráneas toma de muestras y análisis de aguas de cauces superficiales y tomas de muestras y análisis de muestras de aguas de captaciones de aguas subterráneas. Todo ello formalizado con la adecuada distribución espacial y frecuencia en la toma de medidas para seguir la evolución de los recursos y su calidad con la fiabilidad necesaria.

En España, existe una buena red foronómica que podría ser mejorada y de hecho suele tener mejoras continuadas. También se tiene una red de calidad de agua de ríos y entre ambas se puede seguir un control continuo en tiempo y espacio de la evolución de aportaciones superficiales en cantidad y calidad.

Han existido también redes razonablemente completas de control de acuíferos, piezometría y calidad y una red muy precaria e insuficiente de control de descargas de fuentes. Estas redes han ido empeorando en la calidad y frecuencia de sus medidas, aunque en el momento actual hay planes para su mejora.

El inconveniente de los datos de medida de caudales, es que no reflejan las aportaciones naturales sino que dan valores de aportaciones excedentarias. La diferencia entre unas y otras es básicamente las detracciones efectuadas para dejar satisfechos los usos del agua. Por ello, junto con las redes de control citadas se requiere una red de medida de usos del agua y está, como tal, no está desarrollada en la actualidad y es recomendable que sea cuidadosamente

diseñada e implementada. Asimismo estas redes deben completarse con redes de control de extracciones de aguas subterráneas.

7.8.2 Sistemas de control de cantidad y calidad. Aguas superficiales y subterráneas

En síntesis los sistemas de control para la evaluación continua de recursos hídricos serían los siguientes.

Aguas superficiales

- Redes de aforos de control de caudales y aportaciones
- Redes de control de avenidas
- Redes de control de la calidad química y bacteriológica en cauces de ríos
- Redes de control de calidad en lagos y embalses
- Redes de control de los usos del agua y derivaciones

Aguas subterráneas

- Redes de control piezométrico en sondeos y piezómetros
- Redes generales de control de la calidad
- Redes específicas de control de la calidad (intrusión marina, nitratos, etc.)
- Redes de control de aforos en fuentes y surgencias y aforos diferenciales en ríos
- Redes de control de bombeo de acuíferos

Estos sistemas de control o están en unos casos bien implantados o en vía de mejora y en otros se requiere y se recomienda su implantación más generalizada. Entre estos últimos se debe mencionar la conveniencia de diseñar e implantar o mejorar claramente la implantación de las redes de control de usos del agua, superficiales y subterráneas y la red de medidas de caudales en fuentes y surgencias.

7.9. IMPLICACIONES PARA LAS POLÍTICAS

La disminución de recursos hídricos incide, como se ha visto, en un gran número de sectores. Dado que la regulación, de estos sectores se lleva a cabo mediante la definición de políticas concretas, el cambio climático afectando a los recursos hídricos implicará necesariamente a la remodelación y redefinición de nuevas políticas.

Política científica y tecnológica

La política científica y tecnológica, se verá implicada con la disminución de recursos hídricos, por el incremento de inversiones y cambios en criterios de priorización que tendrán que presupuestarse cara a los nuevos núcleos de investigación que podrán presentarse tanto en métodos de generación de recursos (desalación) como métodos de lucha contra la contaminación, depuración de aguas y optimización del uso.

Política hidráulica

El cambio climático, con su afección a las disponibilidades de agua, va a deparar en el futuro debates en política hidráulica, seguramente más intensos y de mayor calado que los actuales. Pocas políticas se van a ver tan afectadas y tan de continuo como la política hidráulica.

Uno de los mecanismos de restauración de los impactos en los recursos hídricos causados por el cambio climático, consiste prioritariamente en utilizar un mejor y más adaptado sistema de

recursos hidráulicos y manejarlo de acuerdo a unas reglas de gestión perfiladas hacia el mundo real del binomio recursos – demandas.

La política hidráulica tendrá implicaciones de entidad con la variación de recursos. Los elementos de regulación, suministro, transporte, distribución y protección de la calidad de los recursos hídricos, su interdependencia y sus normas de gestión deberán adaptarse a las directrices políticas en las que se tendrán que priorizar usos y llegar a nuevos y más sólidos compromisos de solidaridad interregional.

Política energética

Es otra de las políticas en las que la previsible disminución de recursos tendrá una incidencia notable. La política energética, se verá incidida en tres aspectos fundamentales; disminuciones de producción de energía de origen hidráulico inherente a la disminución de recursos, aumento del consumo energético por incremento de las operaciones de desalación y bombeos en trasvase y de agua subterránea para paliar los nuevos déficit hídricos.

Se presentarán nuevas disminuciones de recursos por cambio en la distribución temporal de los desembalses para poder atender a otros usos prioritarios, principalmente agrícolas, antes que a la energía hidroeléctrica. Todo esto, tendrá que contemplarse y asumirse en las políticas hidráulicas que sucesivamente se vayan formulando.

Política agrícola

La política agrícola se verá implicada con redefiniciones motivadas por disminución de aguas disponibles para riego. Se fomentará métodos de riego para ahorrar agua y cultivos que requieran menor cantidad de agua consumida. Es posible que se acepten garantías de regadío más relajadas, e incluso que algunas ocasiones se subroque el uso del agua de riego frente a otros usos más prioritarios como el abastecimiento humano o la ganadería. En la política agrícola se contemplará cada vez más la reutilización de aguas principalmente de origen urbano.

Política medioambiental

El agua se mueve con una doble faceta que propicia su incidencia en la política medioambiental. De una parte es el elemento transmisor, por excelencia, de contaminantes en la geoesfera y de otra el elemento prioritario de dilución de contaminantes.

La política medioambiental se verá afectada teniendo que redefinir los vertidos y sus niveles contaminantes ante posibles reducciones de caudales ecológicos.

Planificación del territorio

Los usos del agua y de la tierra tendrán que planificarse teniendo en cuenta la posible disminución de recursos hidráulicos debida al cambio climático.

La planificación del territorio tendrá que amoldarse a definiciones de uso del suelo más ajustadas a las posibilidades reales de recursos. Es incluso esperable, en ciertos casos, cambios de usos del suelo con usos muy consuntivos de agua a otros usos más ligeros.

7.10. PRINCIPALES NECESIDADES DE INVESTIGACIÓN

7.10.1. Análisis y enumeración de los parámetros de incidencia

En la generación de escorrentías y posteriormente en la generación de recursos hídricos inciden un gran número de factores, que son los que hacen muy compleja la evaluación del impacto del cambio climático sobre ellos. Se enumeran los que se consideran más significativos de estos parámetros aunque, como ya se ha visto, no todos tienen el mismo nivel de incidencia.

- Disminución de la precipitación
- Aumento de la temperatura
- Distribución en espacios discretos de precipitación y temperatura (con discretización espacial suficientemente baja)
- Distribución temporal a lo largo del año de precipitación y temperatura
- Tipo de tratamiento que se da a estos datos y como se generan las series que intervienen en los cálculos
- Valores de EV y su variabilidad con parámetros climáticos y topográficos
- Valores de ETP y su variabilidad con parámetros climáticos, topográficos y la latitud del lugar
- Intercepción foliar
- Retención del suelo
- Reserva agua utilizable por las plantas
- Gestión de excedentes
- Infiltración de aguas subterráneas
- Sistema de recursos hidráulicos superficial y subterráneo
- Reglas de gestión del sistema
- Métodos de regadío
- Usos del agua

Los parámetros de incidencia se dividen en tres grupos principales; los que dependen del cambio climático y su distribución espacial y temporal, que es la incógnita por excelencia, y la manera de tratarlos, los relativos a la generación de escorrentías en si, en los que entran en juego los procesos en el suelo y, por último, los parámetros de incidencia que se derivan del sistema de recursos hidráulicos disponible y su modo de manejarlo.

7.10.2. Evaluación cuantitativa de niveles de confianza

Evaluar cuantitativamente el nivel de confianza que se tiene en los datos y procesos de la generación de recursos hídricos, empezando por el origen de todo, que es el esperable cambio climático, es una tarea que está dentro del mundo de la hipótesis y no dentro de las afirmaciones validadas como se exige en ciencia. Por ello debe asumirse que lo único que puede darse en lo relativo a niveles de confianza son ideas que variarán con el tiempo y, sobre todo, con la óptica con que se enfoque el análisis.

En lo referente a los datos de base que actualmente se dispone para iniciar los cálculos sobre previsiones de disminución de recursos hídricos, temperaturas y precipitaciones previsibles y su distribución espacial, el nivel de confianza puede considerarse *Baja* (**). Los datos de base presentan variaciones muy elevadas en las estimaciones a medio y largo plazo teniéndose que realizar lo cual implica el uso de escenarios que difieren mucho unos de otros y que diversifican demasiado los rangos de resultados en las previsiones de escorrentías.

El segundo grupo de parámetros de incidencia, se refiere al conocimiento disponible sobre el proceso de generación de escorrentías y sobre si el proceso conocido actualmente es

convenientemente adecuado para aplicar ante variabilidades importantes de los parámetros climáticos. Debe matizarse que en este proceso se ha tenido hasta hoy un nivel de confianza Alta (****), pero ello era motivado por existir la posibilidad de contrastar los métodos empíricos con la integración del hidrograma obtenido de medidas reales en los ríos. El no poder tener contrastes efectivos, de los recursos que se estimen por métodos basados en el juego del agua en el suelo, hace perder cuando menos un nivel de confianza y por ello se considera el nivel de confianza en los parámetros de incidencia incluidos dentro del grupo del proceso de generación de escurrimientos como *Mediana* (***). Dentro de este grupo hay aspectos de mayor nivel de confianza comparados con otros pero la calificación se extiende al grupo entero como media.

Por último, los niveles de confianza que se tienen el sistema de recursos hidráulicos y su manera de manejarlo debe considerarse *Alta* (****). En este grupo de incidencia, lo que se valora es la confianza en el cálculo de recursos hídricos partiendo de escurrimientos ya conocidas y de un sistema de recursos hidráulicos existente o diseñable incluidas sus reglas de gestión. Este conocimiento en España es significativamente alto y se dispone de notable experiencia, tanto en el desarrollo de sistemas como en el manejo de modelos numéricos de gestión para apoyo en la adopción de normas de uso de dichos sistemas.

7.10.3 Definición de las necesidades de investigación

Las necesidades de investigación son grandes como seguramente ocurre en casi todos los sectores de influencia del cambio climático, pero siguiendo el orden establecido en los parámetros de incidencia pueden citarse como importantes las siguientes:

Investigaciones tendentes a mejorar y afianzar las estimaciones sobre los valores esperables de precipitación y temperatura con su adecuada distribución espacial y temporal para los diversos horizontes del presente siglo.

Investigaciones tendentes a definir métodos de generación de series de datos climáticos basadas en los escenarios planteados.

Investigaciones para evaluación de evaporación y evapotranspiración en función de topografía, latitud y parámetros climáticos distribuida en tiempo y espacio.

Investigaciones sobre el juego del agua en el suelo, interceptación, reserva de agua utilizable por las plantas, etc., que permita mejorar los métodos empíricos de cálculo de la lluvia útil.

Investigaciones tendentes a estudiar y conocer con mayor fiabilidad los fenómenos de recarga de acuíferos desde el suelo, que en la actualidad solo se estiman por descomposición de la curva de agotamiento del hidrograma.

Investigaciones tendentes al desarrollo de un modelo numérico estándar o análisis y adaptación de entre los existentes que automatice el cálculo de aportaciones superficiales y subterráneas y que se use como modelo de comparación ante diversas hipótesis en los sucesivos estudios. (El modelo diseñado o seleccionado, debería incluir todos los parámetros de incidencia y los índices físicos representativos de la cuenca).

Por último, se debería seguir investigando y diseñando métodos y modelos para apoyo en las decisiones sobre el diseño de sistemas de recursos hidráulicos y su modo de manejarlos.

7.11. BIBLIOGRAFÍA

- ACACIA. 1999. Valoración de los efectos potenciales del cambio climático en Europa. Informe ACACIA. Parry M., Parry C. y Livermore M. (eds.).
- AEMA. 2002. Uso sostenible del agua en Europa. Gestión de la demanda. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid. 94 pgs.
- Andreu J., Capilla J. y Sanchis E. 1996. AQUATOOL, A Generalized Decision-Support System for Water-Resources Planning and Operational Management. *Journal of Hydrology* 177 : 269-291.
- Ayala-Carcedo F.J. y Iglesias López A. 2001. Impactos del Cambio Climático sobre los recursos hídricos, el diseño y la planificación hidrológica en la España peninsular. Instituto Tecnológico y Geominero de España.
- Ayala-Carcedo F.J. y Iglesias López A. 1996. Impactos del Cambio Climático sobre los recursos hídricos, el diseño y la planificación hidrológica en la España peninsular. Instituto Tecnológico y Geominero de España.
- Balairon Ruiz L. 1998. Escenarios Climáticos. Energía y cambio climático. Ministerio de Medio Ambiente.
- Barreira A. 2004. Dams in Europe, The Water Framework Directive and the World Commission on Dams Recommendations: A Legal and Policy Analysis. WWF. http://www.panda.org/news_facts/publications/freshwater/index.cfm?uPage=2
- BBVA. 2000. El cambio climático. El campo de las ciencias y las artes. Servicio de estudios nº 137.
- Beguería S. 2003. Identificación y características de las fuentes de sedimento en áreas de montaña: erosión y transferencia de sedimento en la cuenca alta del río Aragón. Tesis Doctoral, Universidad de Zaragoza.
- Bosch J.M. y Hewlett J.D. 1982. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *Journal of Hydrology* 55: 3-23.
- Budyko M.I. y Zubenok 1961. The determination of evaporation from the lands surface. *Izv. Akad. Nauk SSSR, Ser. Geogr.* 6: 3-17.
- CEDEX 1998. Estudio Sobre el Impacto Potencial del Cambio Climático en los Recursos Hídricos y Demandas de Agua de Riego en Determinadas Regiones de España. Informe técnico para el Ministerio de medio Ambiente de España. Madrid.
- CRU 1998. Representing twentieth century space-time climate variability. II Development of 1901-96 monthly grids of terrestrial surface climate. En: New M., Hulme M. y Jones P. Climate Research Unit. School of Environmental Sciences, University of East Anglia. Norwich, NR4 7TJ. Reino Unido.
- Estrela T. y Quintas L. 1996. El sistema integrado de modelización precipitación-aportación SIMPA. *Revista de Ingeniería Civil*, no. 104. CEDEX-Ministerio de Fomento.
- Estrela T., Ferrer M. y Ardiles L. 1995. Estimación of pre-cipitation-runoff regional laws and runoff maps in Spain using a Geographical Information System. International Hydrological Programme (IHP). UNESCO FRIEND AMHY. Thessaloniki, Greece.
- Falkenmark M. 2000. No Freshwater Security Without Major Shift in Thinking. Ten-Year Message from the Stockholm Water Symposia. Stockholm International Water Institute, Stockholm.
- Falkenmark M. y Lindh G. 1976. *Water for a Starving World*. Westview Press, Boulder, CO.
- Fernández Carrasco P. 2002. Estudio del Impacto del Cambio Climático Sobre los Recursos Hídricos. Aplicación en diecinueve cuencas en España. Tesis Doctoral. E.T.S de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid.
- Flores-Montoya F., Garrote L.M. y Martín-Carrasco F.J. 2003. The hydrologic regime of the Tagus river in the last 60 years. XI World Water Congress, IWRA, CEDEX, Madrid (CD).
- Frisk T., Bilaletdin Ä., Kallio K. y Saura M. 1997. Modelling the effects of climatic change on lake eutrophication. *Boreal Environment Research* 2 : 53-67.
- Gallart F. y Llorens P. 2003. Catchment management under Environmental Change: Impact of Land Cover Change on Water Resources. *Water International* 28(3): 334-340.

- García-Vera M.A., Coch-Flotats A., Gallart F., Llorens P. y Pintor M.C. 2003. Evaluación preliminar de los efectos de la forestación sobre la escorrentía del Ebro. XI World Water Congress, IWRA, CEDEX, Madrid (CD).
- Garrote L., Rodríguez I.C. y Estrada F. 1999. Una evaluación de la capacidad de regulación de las cuencas de la España peninsular. VI Jornadas Españolas de Presas. Vol.2, Málaga. Pgs. 645-656.
- Iglesias López A. 1985. Usos y aplicaciones del agua en España. Boletín Geológico y Minero T XCVI-V : (512-540). Pgs. 44-72.
- IPCC. 2001. Working Group II. The Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Impacts, Adaptation, and Vulnerability. WMO.UNEP.
- IPCC. 2003. Future climate in world regions: and intercomparison of model-based projections for the new IPCC emissions scenarios.
- MIMAM. 1998. El Libro Blanco del Agua en España. Ministerio del Medio Ambiente.
- MOPTMA. 1995. Programa Nacional del Clima.
- MOPTMA- MINER. 1994. Libro Blanco de las Aguas Subterráneas.
- Moral L. del, Werff P. van der, Bakker K. y Handmer J. 2003. Global trends and water policy in Spain. *Water International* 28(3): 358-366.
- Moreno Torres A. 1982. Los usos del agua. Ponencia al curso monográfico sobre conservación del patrimonio hídrico. Madrid.
- Parry M.L. (ed.). 2000. Assessment of Potential Effects and Adaptations for Climate Change in Europe: Summary and Conclusions. Jackson Environment Institute, University of East Anglia, Norwich, UK. 24 pgs.
- Pilgrim J.M., Fang X., Stefan H.G. 1998. Stream temperature correlations with air temperatures in Minnesota: implications for climate warming. *Journal of the American Water Resources Association* 34: 1109–1121.
- Prieto C. 1996. La evolución de los recursos hídricos en España. 2ª Conferencia Internacional de Hidrología Mediterránea. Los recursos hídricos en los países Mediterráneos. Iberdrola Instituto Tecnológico, Bilbao. Pgs. 257-288.
- WWW. 1999. Escenarios de Cambio Climático para la Península Ibérica. WWW.
- UNEP. 1998. Sourcebook of Alternative Technologies for Freshwater Augmentation in Africa. UNEP, Technical Publication Series, 8. (<http://www.unep.or.jp/ietc/Publications/TechPublications/TechPub-8a/index.asp>).
- WCD. 2000. Represas y Desarrollo. El reporte final de la comisión mundial de represas. Un nuevo marco para la toma de decisiones. Comisión Mundial de Represas, http://www.dams.org/docs/report/wcd_sp.pdf.

