

Figura 152. Volúmenes de reutilización directa actual por ámbitos de planificación

viando los caudales aguas arriba de la ciudad, se tratan los 27 hm³ residuales en la EDAR mediante un terciario de forma que pueden aportarse a los cauces en condiciones aptas para la vida de los peces. Se trata, en definitiva, de una operación de depuración que permite aumentar las disponibilidades globales para abastecimientos y riegos, y mantener el carácter truchero del río Zadorra (López García et al. 1998).

Asimismo, otros ejemplos de experiencias de interés son los de la Costa Brava (Sala y Serra, 1998), la Costa del Sol (Marzo, 1998), Tarragona (Aragonès, 1988), y el sureste peninsular (Rico et al. 1998) (fig. 152).

El mapa de la figura 153 muestra, asimismo, los municipios con instalaciones de reutilización existentes, pudiendo apreciarse claramente la concentración espacial antes apuntada.

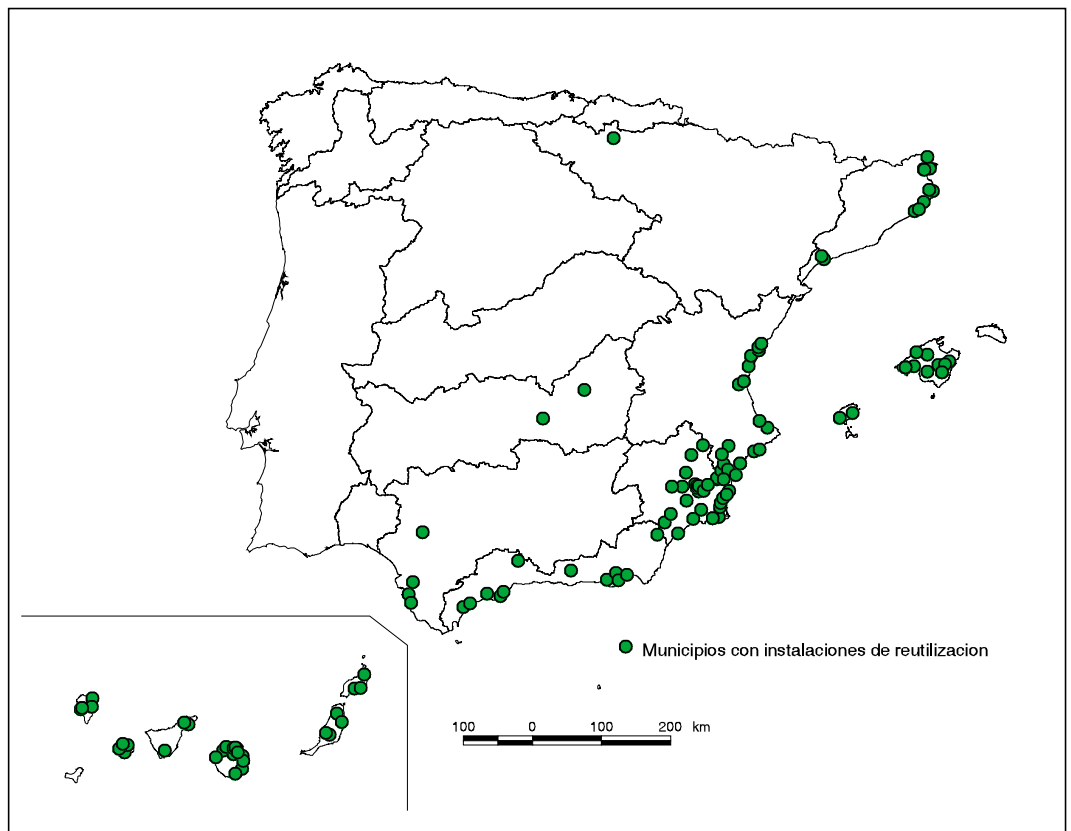


Figura 153. Mapa de municipios con instalaciones de reutilización directa

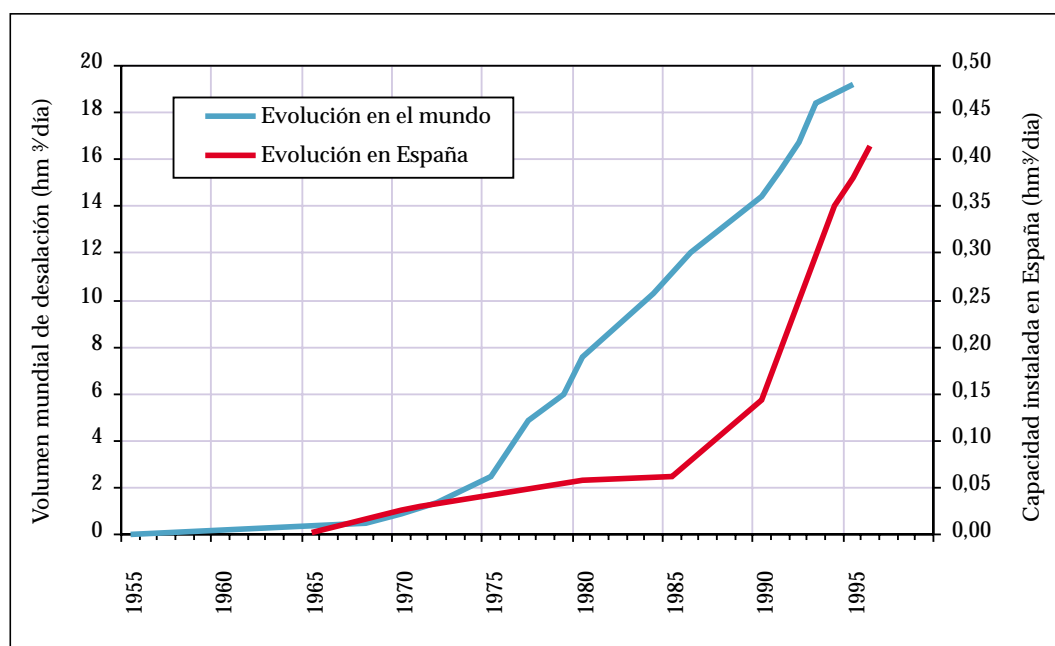


Figura 154. Evolución de la desalación en el mundo y en España

El principal problema que afecta a la reutilización directa de las aguas depuradas, y que constituye un freno a su expansión, es la inexistencia de una normativa específica, sancionada por la autoridad sanitaria, y de aplicación general, que regule los criterios de calidad exigible a dichas aguas y los aspectos relativos a su gestión. Esta situación está provocando cierta desorientación a la hora de su planificación, dispersión de criterios en cuanto a la selección de los tratamientos terciarios precisos y, en ocasiones, la reutilización de los efluentes en condiciones inadecuadas.

Para resolver esta carencia, y en desarrollo tanto de la Ley de Aguas (art. 101) como del Reglamento del Dominio Público Hidráulico (arts. 272 y 273), se redactó un proyecto de Real Decreto que, atendiendo fundamentalmente a los criterios sanitarios del Ministerio de Sanidad y Consumo, fijaba las condiciones básicas para la reutilización directa de las aguas residuales depuradas. Este proyecto de Real Decreto se encuentra actualmente en proceso de análisis, revisión y consulta por las partes afectadas, y a expensas de lo que en su caso se regule en las instancias comunitarias europeas.

De forma paralela, han ido apareciendo algunas regulaciones de ámbito autonómico en las cuales se establecen, fundamentalmente, diversos límites de carácter sanitario para la aplicación de este tipo de aguas en el riego agrícola. Ejemplo de ellas son las establecidas en Cataluña y Baleares.

3.1.5.9. Desalación

Otra técnica de incremento de las disponibilidades tradicionalmente considerada como no convencional es

la de la desalación del agua, consistente, como su nombre indica, en tratar aguas saladas o salobres procedentes del mar o de acuíferos salinos, y, quitándoles las sales, transformarlas en aguas aptas para usos como el de abastecimiento a poblaciones o los riegos.

La idea del uso del agua del mar para el aprovechamiento humano es antiquísima, existiendo ya referencias en Aristóteles, pero no es sino hasta mediados del siglo XX cuando comienza a producirse una utilización masiva e industrial de esta tecnologías.

La figura 154 (Rico et al., 1998) muestra sendas estimaciones de la evolución del volumen mundial de desalación en plantas con capacidad de tratamiento superior a los 100 m³/día, y de la capacidad de desalación instalada en España. Sin perjuicio de que sus valores puntuales puedan verse modificados según la interpretación dada a los conceptos que se representan (tipo y tamaño de plantas, tipo de aguas tratadas, etc.), la figura muestra una inequívoca y continuada tendencia creciente desde los años 60, que en nuestro país se ve acelerada desde la segunda mitad de los 80.

En efecto, en España se ha venido utilizando la desalación de agua de mar desde finales de los 60 para los abastecimientos urbanos de Ceuta, Lanzarote, Fuerteventura y Gran Canaria, que tienen en común la escasa disponibilidad de recursos hídricos. En todos estos casos la desalación se reveló como la mejor solución - y en algunos de ellos como la única - al problema del déficit en el abastecimiento urbano. Otras soluciones estudiadas (transporte de agua en barcos o incremento artificial de precipitaciones) se abandonaron en su momento por considerarse inviables técnica o económicamente.

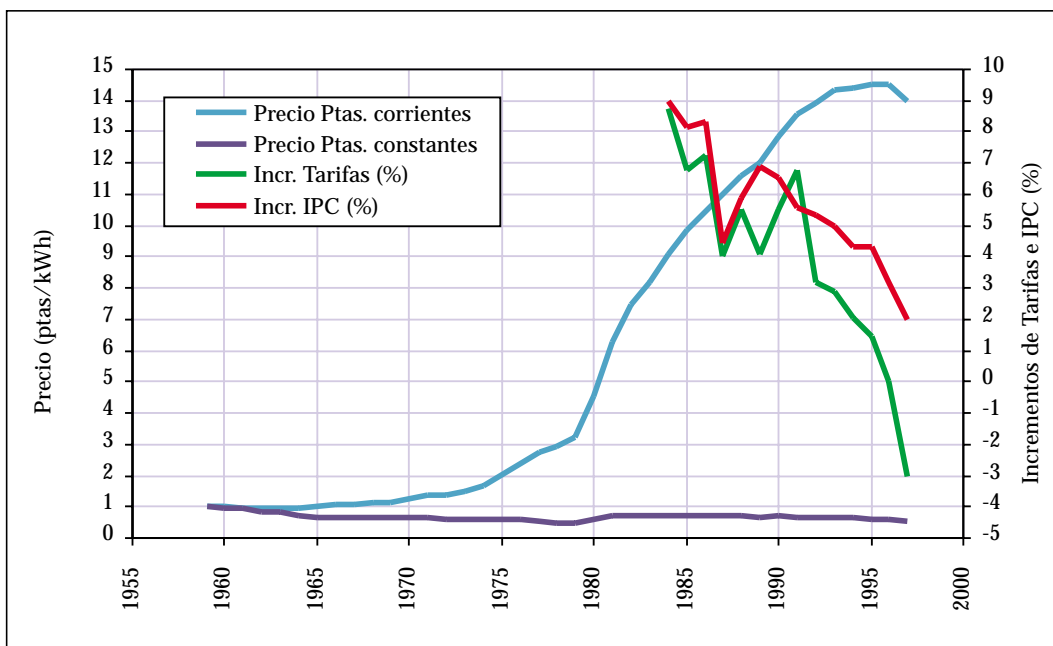


Figura 155. Evolución del precio medio de venta de la energía eléctrica y de los incrementos anuales de la tarifa eléctrica y el IPC.

Las primeras tecnologías que se implantaron fueron las de destilación, en sus variantes de multietapa (MSF) y compresión de vapor (VC), para las que los consumos energéticos eran muy elevados - entre 15 y 18 kWh/m³, siendo ésta la causa principal del muy alto coste del agua desalada, superior a 200 pta/m³. El desarrollo y entrada en el mercado de otras tecnologías más eficientes, como la ósmosis inversa (con un consumo total del orden de 5 kWh/m³ según los últimos proyectos llevados a cabo), junto con el descenso del coste de la energía, han rebajado sensiblemente este coste del agua desalada hasta cifras inferiores a las 100 pta/m³, y en una tendencia reciente claramente favorable.

Como indicador de esta tendencia favorable al efecto de reducción de costes, la figura 155 (elaborada con datos de UNESA, 1998b) muestra la evolución en las últimas décadas del precio medio de venta de la energía eléctrica en España (pta/kWh) - tanto en pesetas corrientes como en pesetas constantes de 1959 -, así como la evolución de los incrementos porcentuales anuales de la tarifa eléctrica y del Índice general de Precios al Consumo. Como puede verse, el precio de la electricidad ha crecido tradicionalmente por debajo del IPC, llevando a que, en términos reales, el precio del kWh haya descendido un 44% entre 1959 y 1997. En los últimos años la tendencia a la moderación de precios eléctricos se ha acentuado notablemente dando lugar, como puede observarse, incluso a incrementos negativos.

Con precios medios (ventas totales divididas por energía consumida) estabilizados en torno a las 14 pts/kWh, y que pasan a ser del orden de la mitad para importantes consumos industriales como los de las

instalaciones de desalación, las perspectivas de empleo de esta tecnología están cambiando aceleradamente, su viabilidad económica se está viendo muy favorecida en los últimos años, y se están quebrando a la baja los costes que tradicionalmente viene teniendo la producción de estas aguas.

Así, cabe citar cómo en las últimas evaluaciones realizadas con motivo de la construcción de nuevas instalaciones, se ha bajado ya de la cifra de 100 pts/m³, incluyendo en ella la parte correspondiente a la amortización íntegra de la inversión a realizar. Son cifras aún muy elevadas, que no permiten su uso exclusivo para el regadío, pero que, en algunos casos de gran escasez o ausencia de fuentes alternativas, podrían asumirse para el abastecimiento a poblaciones.

La figura 156 muestra una estimación de los costes totales actuales de la desalación de agua del mar por ósmosis inversa, en función de la producción de la planta, bajo el supuesto de amortización de la inversión en 15 años al 5% de interés, valor residual nulo, y precio de la energía de 7 pta/kWh.

Como puede verse, la componente fundamental del coste es la de operación y mantenimiento (del orden del doble que la amortización), y de ésta, entre el 50 y el 80% corresponde estrictamente al consumo energético.

Niveles de producción de agua superiores a los máximos ofrecidos en el gráfico (que equivalen a unos 20-25 hm³/año) son también técnicamente factibles, pero comienzan a plantear importantes problemas tanto desde el punto de vista de la captación, si se pretende

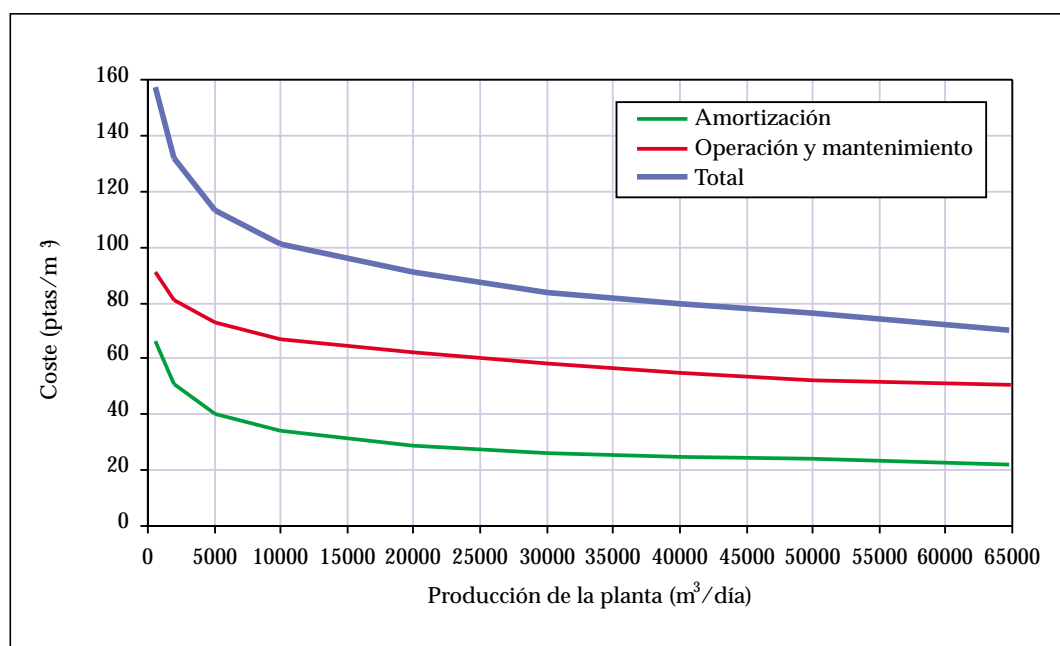


Figura 156. Costes de desalación de agua del mar según la producción de la planta

hacer mediante pozo, como del retorno al mar de las salmueras, ya que se requerirían cada vez más largos y costosos emisarios para diluir, sin afecciones ambientales negativas, un vertido puntual continuo, de gran caudal y altísima concentración salina. Los sobrecostes asociados a estas dificultades hacen que, aunque existan experiencias de plantas mayores, los máximos tamaños actualmente empleados sean, en la práctica, del orden de magnitud mostrado.

Por otra parte, otra componente significativa del coste de producción puede ser la requerida para la evacuación de las salmueras al mar mediante emisarios submarinos de gran longitud. Si existen valores ambientales (como, p.e. praderas de algas) que deben preservarse de una concentración salina excesiva, estos emisarios pueden ser una solución adecuada, aunque introduciendo un mayor coste de producción del agua.

A los indicados costes de producción, a pie de planta, habría que añadir en todo caso los de transporte desde la planta hasta el área de consumo, que serían las balsas de cabecera en el caso de los regadíos, o los depósitos municipales en el caso de abastecimiento a poblaciones. En este último caso, los costes totales (producción y transporte) resultantes serían los equivalentes a la captación de recursos y traída a los depósitos en alta (costes del abastecimiento en alta), por lo que, a efectos del precio final del agua pagado por el usuario, habría que añadir todos los costes en baja de la distribución, mantenimientos y explotación de las redes de suministro municipales, posibles tratamientos e impulsiones, gastos de personal y administración, etc.

Ciñéndonos al transporte del agua desalada desde la planta productora hasta los depósitos en alta, los costes de este transporte han de incluir los correspondientes a la amortización de la inversión de la infraestructura de transporte (tubería, equipo de bombeo, balsa de regulación para incidencias), y los de operación (básicamente consumo de energía para el bombeo) y mantenimiento. Todos estos costes son parametrizables en función de tres variables básicas que son la producción de la planta (indicativa del caudal a transportar y la regulación requerida), la distancia al mar (indicativa de la longitud del transporte), y la cota del punto de consumo (indicativa del equipo de bombeo y del coste energético). Introduciendo estas variables en un modelo cartográfico pueden calcularse especialmente los costes indicados.

En efecto, la figura 157 muestra una estimación - obtenida mediante modelación cartográfica - del coste total de producir y llevar agua desalada a cualquier punto del territorio. El agua procedería de una planta de 10.000 m³/día (consumo correspondiente a una población de unos 30.000 habs) y las condiciones supuestas han sido, como antes se indicó, de amortización en 15 años al 5% de interés, y coste energético de 7 pts/kWh.

Como cabía esperar, el mapa obtenido está fuertemente relacionado con el de las distancias al mar, pero controlado por efectos debidos al relieve. Es evidente que estos resultados son simplificados y meramente indicativos, pero, pese a su simplificación, proporcionan una primera idea aproximada de lo que supondría, en términos económicos, satisfacer las necesidades de una población de tamaño pequeño-medio, mediante agua

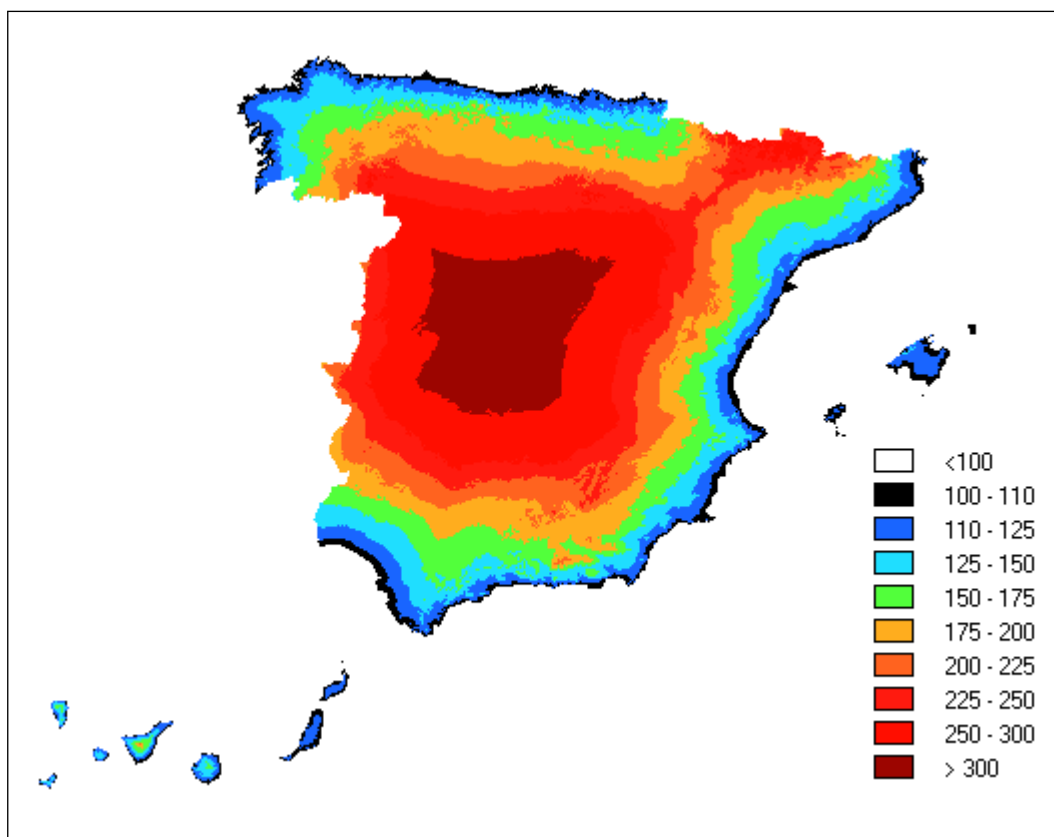


Figura 157. Mapa de costes totales de suministro (producción y transporte) de 10.000 m³/día de agua marina desalada (pta/m³)

del mar desalada. Como se observa, y con carácter general, sólo las poblaciones relativamente próximas a la costa -a menos de unos 50 kms- podrían tener costes inferiores a las 150 pta/m³, mientras que a partir de los 150 kms los costes se elevan, superando las 200 pta/m³.

Para obtener el precio total del agua para abastecimiento, a estos costes en alta habría que añadir, como se indicó, todos los correspondientes a la distribución en baja propiamente dicha, así como, en su caso, los otros conceptos que suelen incluirse en las tarifas del abastecimiento urbano. Considerando que, como se indica en su correspondiente epígrafe, los costes actuales en alta suelen oscilar entre unas 10 y 40 pts/m³, su sustitución por aguas marinas desaladas implicaría aumentar este coste muy sustancialmente, en varios órdenes de magnitud.

La conclusión final es que, como se apuntó, la desalación de agua del mar puede jugar un papel significativo en el suministro urbano de poblaciones costeras, pero de forma puntual y selectiva dado que sus costes actuales, aunque claramente a la baja en los últimos años, aún se encuentran generalmente lejos de los de otras posibles fuentes alternativas convencionales de suministro. Para los regadíos, estas aguas se encuentran claramente a niveles de coste prohibitivos salvo en situaciones puntuales de muy grave escasez, producciones de alta rentabilidad, y disponibilidad de otras aguas a coste inferior para su mezcla.

Por otra parte, la muy alta dependencia del coste de producción con relación al precio de la energía sugiere una cierta prudencia ante la eventual posibilidad de una generación masiva de estas aguas, y aconseja estratégicamente plantear opciones alternativas de forma que el sistema global de suministro tenga una menor dependencia energética.

En lo relativo al agua salobre, los costes de producción y transporte son apreciablemente inferiores, pero presentan los problemas de su posible agotamiento y cambios de características (es decir, del mantenimiento de su disponibilidad cuantitativa y cualitativa), y de la evacuación de las salmueras generadas en el proceso. Por ello, el estudio de su viabilidad y costes requiere análisis pormenorizados en cada caso concreto.

Para estas aguas sólo se emplean tecnologías de membranas, tanto de ósmosis inversa como de electrodiálisis, en función de las características del agua bruta. Los costes de producción son parecidos en ambas tecnologías, si bien la ósmosis, por su mayor versatilidad, ha experimentado una mayor generalización.

En conjunto, la desalación de agua de mar y salobre supone actualmente una aportación al ciclo hidrológico de unos 220 hm³/año, lo que coloca a España en el primer lugar de Europa, con un 30% del conjunto instalado en todo el continente. Esta producción se distribuye por usos como muestra la tabla 38.

Agua de mar	Uso urbano	89 hm ³ /año
	Uso agrícola	5 hm ³ /año
Agua salobre	Uso urbano y turístico	29 hm ³ /año
	Uso industrial	40 hm ³ /año
	Uso agrícola	58 hm ³ /año

Tabla 38. Distribución por usos de las aguas desaladas marinas y salobres

Están en marcha, además, importantes iniciativas (como las dos plantas de agua del mar previstas por la Mancomunidad de Canales del Taibilla, con 40 hm³/año para abastecimientos en las cuencas del Segura y Júcar, o las planta de agua del mar para redotación de riegos en el Campo de Cartagena, con producciones de 20 hm³/año), que, como veremos, incrementarán a corto plazo estas cifras actuales de forma muy significativa.

La figura 158 muestra los volúmenes de desalación actual por ámbitos de planificación hidrológica.

Asimismo, la figura 159 muestra los municipios con instalaciones actualmente existentes de desalación para abastecimiento urbano.

Aunque el volumen actual de agua desalada es relativamente muy poco importante con respecto a la cifra total de recursos hídricos, hay zonas donde se utiliza en las que significa un alto porcentaje de sus recursos. Así, por ejemplo, en las islas de Lanzarote, Fuerteventura y Gran Canaria, el agua desalada representa el 97, 90 y 16%, respectivamente, de sus consumos urbanos totales.

3.1.6. Transferencias de recursos

3.1.6.1. Introducción

Además de los recursos convencionales y no convencionales que se generan internamente en el ámbito de un determinado territorio, y que se han ido examinando en secciones previas, existen situaciones en que se producen transferencias externas, superficiales o subterráneas, entre distintos territorios, lo que da lugar a modificaciones en sus recursos.

Las transferencias superficiales entre distintas cuencas consiguen incrementar los recursos disponibles y atender las demandas existentes en aquellos sistemas de utilización en que, exclusivamente con sus recursos de origen interno, son incapaces de cumplir dicho objetivo.

Existen muchos ejemplos en España de este tipo de transferencias que trasladan recursos de una cuenca para su utilización en otra. Un caso particular lo constituyen las transferencias entre ámbitos territoriales de distintos Planes Hidrológicos de cuenca, siendo la previsión y las condiciones de estas transferencias uno de los contenidos obligatorios del Plan Hidrológico Nacional, de acuerdo con el artículo 43 de la Ley de Aguas.

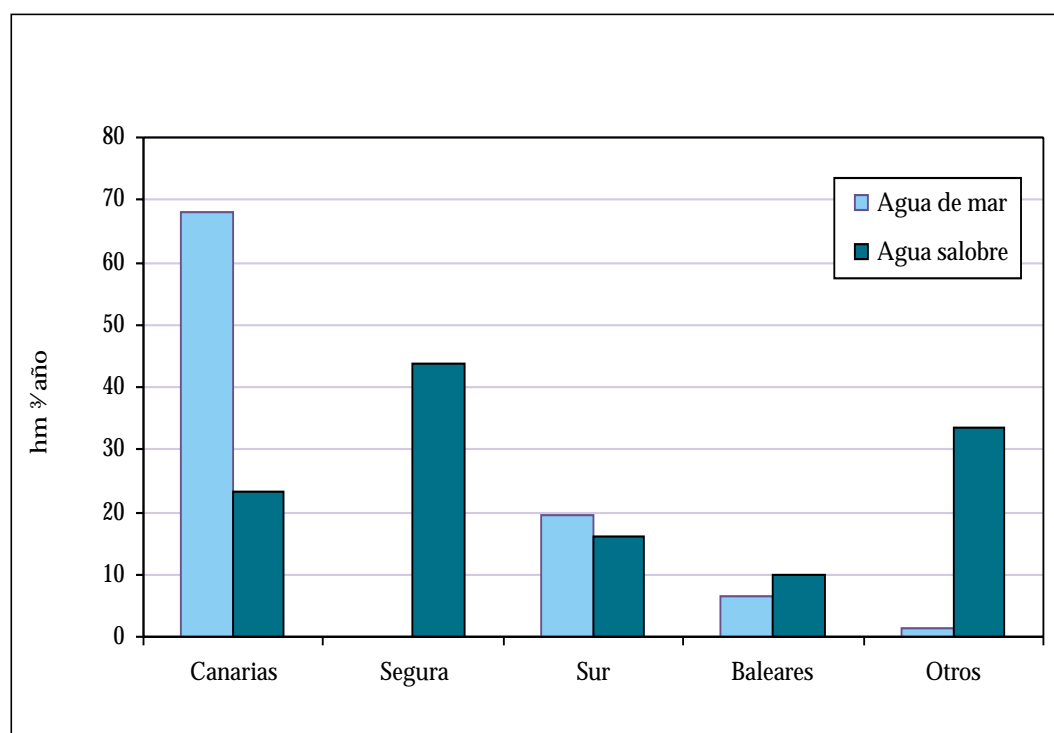


Figura 158. Volúmenes de desalación actual por ámbitos de planificación

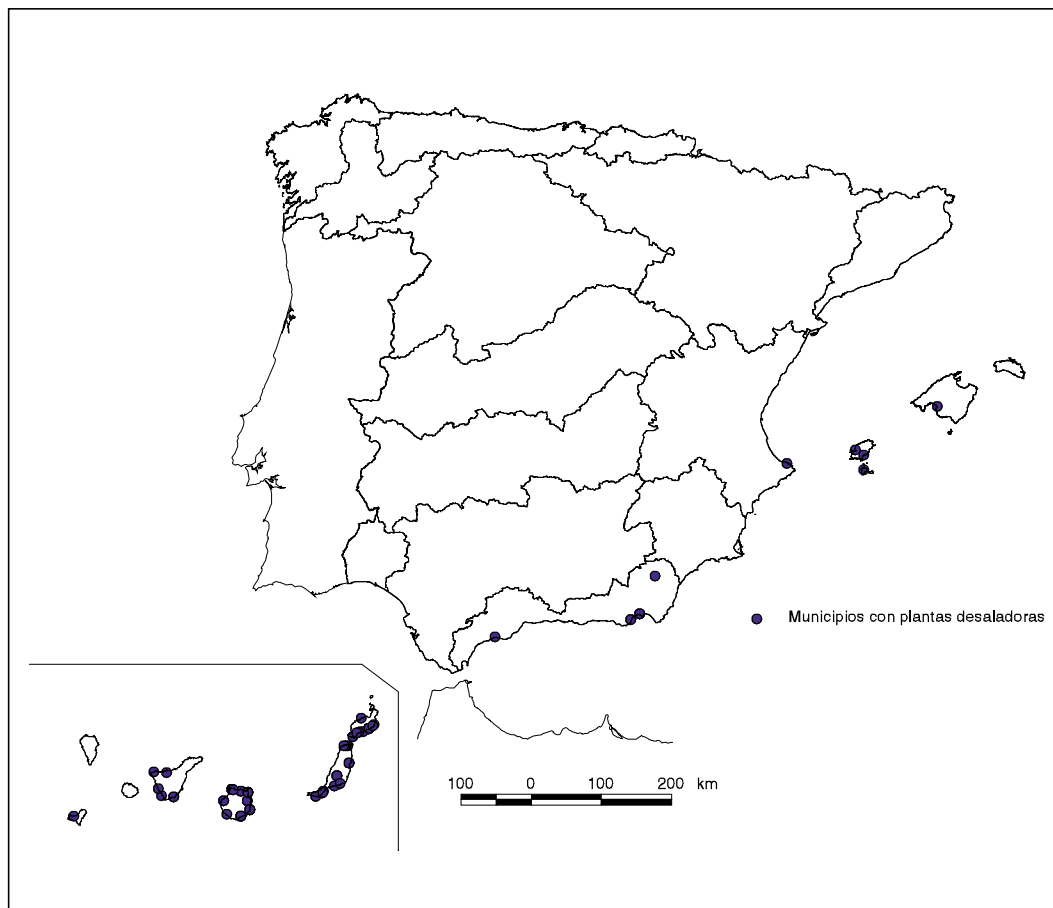


Figura 159. Mapa de municipios con instalaciones de desalación para abastecimiento urbano

Existen, por otra parte, determinados intercambios fluviales con países vecinos, que son también asimilables a una transferencia superficial natural.

Además de las transferencias superficiales, también se presenta el caso de flujos subterráneos que, de modo natural, son transferidos desde algunas unidades hidrogeológicas a otras contiguas, que pueden pertenecer a ámbitos de planificación diferentes y, por tanto, constituir propiamente una transferencia externa. Aunque, obviamente, se trata de procesos bien distintos, y su consideración conjunta resulta inusual, se ha estimado conveniente, a efectos sistemáticos, su inclusión en este apartado.

En los siguientes epígrafes se describen brevemente las principales transferencias superficiales y subterráneas actuales entre los territorios de los distintos Planes Hidrológicos.

3.1.6.2. Transferencias superficiales

Se describirán, en primer lugar, las transferencias naturales, con otros países vecinos, para describir después las artificiales, entre distintos ámbitos de planificación hidrológica.

3.1.6.2.1. Transferencias naturales con otros países

La relación de los ámbitos de planificación que tienen fronteras internacionales y presentan intercambios fluviales es la siguiente.

NORTE I. La frontera con Portugal coincide sensiblemente, bien con divisorias de aguas, bien con cauces, por lo que las transferencias se producen en pocas ocasiones y su cuantía es despreciable si exceptuamos al río Limia que tiene en España una superficie de cuenca del orden de los 1,300 km². Merece destacarse al río Salas, afluente del Río Limia, que en el embalse de su nombre cruza la frontera y a los tres km. vuelve otra vez a España.

NORTE III. Existen dos zonas que pertenecen a las cuencas de los ríos franceses Nive y Nivelles cuyas superficies respectivas son 46.5 km² y 63.9 km².

DUERO. Además del río Duero, con una superficie de cuenca de unos 77,000 km², cruzan la frontera hacia Portugal los ríos Manzanas (438 km²), Sabor (110 km²), Tuela (276 km²), Arzoa (122 km²), Mente (112 km²), San Lorenzo (168 km²) y Tamega (681 km²), todos ellos afluentes de la margen derecha. El río Bubal, afluente del Tamega, nace en Portugal y a su entrada en España

ya tiene una superficie de cuenca apreciable. En la margen izquierda, existen una serie de arroyos que cruzando de Portugal a España conforman la cabecera de la Rivera Azaba, afluente del río Águeda.

TAJO. La frontera coincide prácticamente en la margen izquierda con el río Erjas y en la derecha con el río Sever, por lo que la única transferencia de recursos es la del propio río Tajo, cuya superficie de cuenca de la parte española es de 55,770 km².

GUADIANA. El río Gévora, con su afluente el Gevorete, nacen en Portugal y pasan a España poco antes de su confluencia con una superficie de cuenca de 55 km², vuelve a Portugal después de captar 583 km² de cuenca en España y tras recorrer 14 km por territorio portugués regresa a España. Hay una zona portuguesa de unos 50 km² que drena hacia el Gévora, mas aguas abajo, a través de una serie de arroyos distribuidos a lo largo de 14 km de frontera, hasta que el río Caia, afluente del Guadiana hace de frontera. Desde la entrada del Guadiana en Portugal hasta que el río Chanza forma frontera, todas las transferencias van de España hacia Portugal y fundamentalmente a través de los ríos Alcarrache (379 km²), Godolid (260 km²), Zaos (237 km²), Ardila (1,837 km²) y Múrtigas (745 km²).

EBRO. Las superficies de las zonas españolas que drenan a Francia son: en la cabecera del río Irati 78 km², en la cabecera del Aragón 9 km², y el río Garona, que tiene su origen en España y al cruzar la frontera ya cuenta con una superficie vertiente de 547 km². Por el contrario, la parte francesa drenada por el Ebro es: la cabecera del Irati con 49 km² y la cabecera del Segre con unos 500 km².

3.1.6.2.2. Transferencias artificiales entre ámbitos de planificación

La transferencia más importante es la que se lleva a cabo mediante el Acueducto Tajo-Segura (ATS), regulado en las Leyes 21/1971 y 52/1980. Permite trasvasar aguas de la cuenca alta del Tajo a las cuencas del Guadiana, Sur, Segura y Júcar. Los volúmenes a trasvasar en una primera fase se fijaron en un máximo de 650 hm³/año, y en una segunda en 1.000 hm³/año. Los recursos trasvasados desde 1979, año en que comienzan los envíos, hasta el año 1996/97, alcanzan una media anual de 263 hm³ (287 si se prescinde de los dos primeros años), con un máximo de 452 hm³ en el año 1996/97. De los recursos trasvasados, 25 hm³ se destinan a los Riegos de Levante Margen Izquierda, 30 hm³ al abastecimiento a poblaciones en la cuenca del Júcar y unos 7 hm³ a la del Sur (la cuantía máxima establecida legalmente es de 15 hm³/año). El resto se utiliza en la cuenca del Segura para abastecimiento de pobla-

ción y regadíos. A efectos de la contabilidad de estas transferencias que se presenta en figuras y tablas posteriores, los Riegos de Levante Margen Izquierda se incluyen en la cuenca del Júcar, ámbito territorial en el que están parcialmente situados, aunque el Plan Hidrológico de esta cuenca no los incorpora por tener sus tomas en la cuenca del Segura.

Además de estas transferencias, y tras la promulgación de la Ley 13/1987, mediante el ATS se transfieren recursos a la cuenca del Guadiana con el fin de proporcionar agua a las Tablas de Daimiel. Los primeros trasvases se realizaron con carácter experimental durante un periodo de tres años, en el que se aportó un máximo de 60 hm³. En 1990 fue prorrogada la vigencia de la Ley por otros tres años y en la misma cuantía de recursos, con una nueva prórroga hasta 1996 (Reales Decretos-leyes 6/1990 y 5/1993). Posteriormente, mediante el Real Decreto-Ley 8/1995, que deroga las disposiciones anteriores, se autoriza una derivación de recursos del ATS para abastecimiento de la cuenca alta del Guadiana con una cuantía media anual, calculada sobre un periodo máximo de diez años, no superior a 50 hm³. Este volumen incluye las dotaciones previstas en las disposiciones citadas para el Parque Natural de las Tablas de Daimiel, que pasan a tener carácter permanente. En el periodo comprendido entre 1987 y 1993 el volumen medio anual transferido ha sido del orden de 10 hm³/año. Asimismo, se reservan 3 hm³/año para abastecimiento de los núcleos de población inmediatos al trazado del ATS en las cuencas de los ríos Guadiana y Júcar.

Entre los ámbitos del Ebro y Norte III existen tres transferencias. La más importante es el trasvase Zadorra-Arratia, para aprovechamiento hidroeléctrico (central de Barazar) y abastecimiento al Consorcio de Aguas del Gran Bilbao. La concesión es de 9 m³/s y durante el periodo 1985/86-1994/95 el volumen medio trasvasado ha sido de unos 180 hm³/año. El trasvase Cerneja-Ordunte transfiere unos 9 hm³/año para el abastecimiento de Bilbao y mediante el trasvase Alzania-Oria se trasvasa algo más de 1 hm³ para aprovechamiento hidroeléctrico.

Entre los ámbitos del Ebro y Norte II se produce asimismo una transferencia de recursos mediante el trasvase Ebro-Besaya, concebido para completar los recursos del río Saja con volúmenes regulados en el embalse del Ebro, que son restituidos en épocas de aguas altas, manteniendo un saldo interanual nulo. Desde 1986 hasta la fecha los volúmenes transferidos en ambos sentidos han sido de unos 4 hm³/año

Existen otras dos transferencias desde el Ebro a las Cuencas Internas de Cataluña. El trasvase Ebro-Campo de Tarragona tiene por objeto el abastecimien-

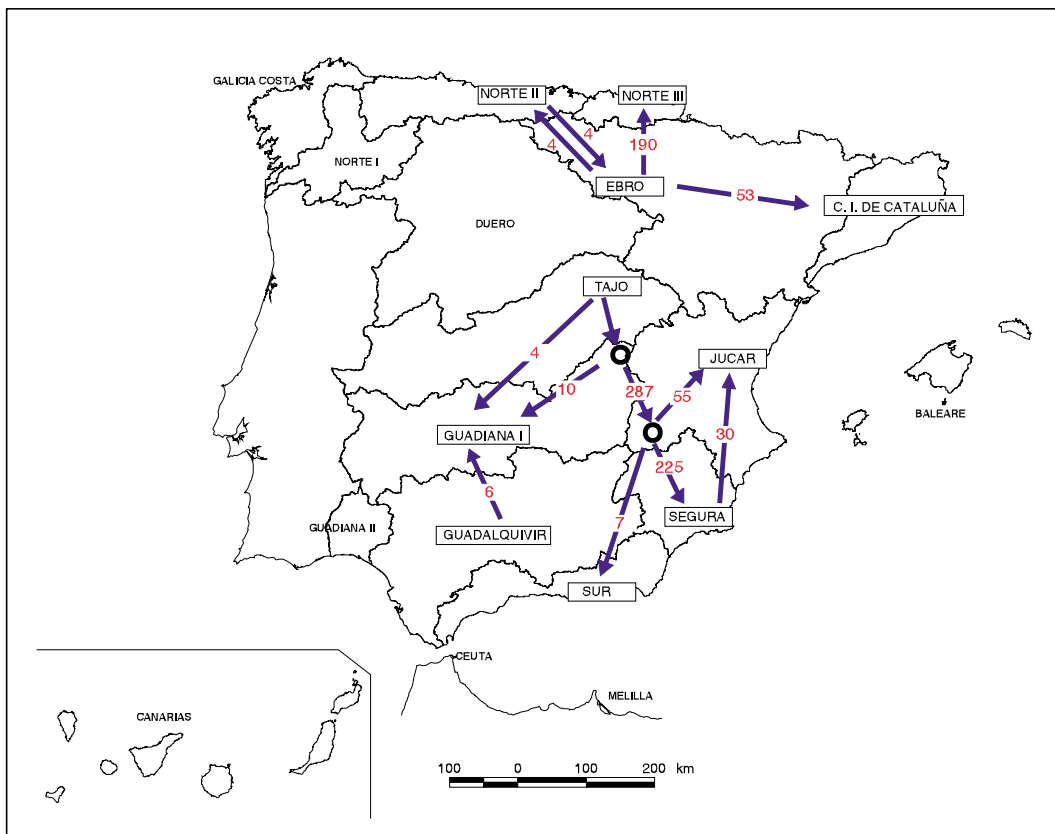


Figura 160. Mapa con los esquemas de las principales transferencias superficiales actuales

to urbano e industrial de la zona del Campo de Tarragona. La concesión actual es de 90 hm³/año, y durante el periodo 1993-1996 se trasvasaron unos 46 hm³/año en valor medio. El trasvase Ciurana-Riudecañas se utiliza para regadíos y abastecimiento de población en la comarca de Reus, y puede cifrarse en unos 7 hm³/año.

Desde la cuenca del Segura se transfieren también 30 hm³/año de recursos propios a la cuenca del Júcar: 15 para Riegos de Levante Margen Izquierda, y otros 15 para el abastecimiento de poblaciones.

La cuenca del Guadiana recibe unos 4 hm³/año de la cuenca del Tajo para abastecimiento a la Mancomunidad del Algodor y otros 6 hm³/año desde el Guadalquivir para abastecimiento de Valdepeñas, Santa Cruz de Mudela y Mancomunidad de Sierra Boyera

Existen otros trasvases de menor entidad desde el Tajo al Guadiana para abastecimiento de la Mancomunidad del Alcuéscar, y desde el Guadiana al Guadalquivir para abastecimiento de las mancomunidades de Llerena y Tentudía. Con carácter excepcional se ha enviado mediante barco una media de 5 hm³/año a Baleares (Bahía de Palma) desde el Delta del Ebro (Consortio de Aguas de Tarragona) durante los años 1995-97.

En la figura 160 se representan esquemáticamente las principales transferencias superficiales actuales, con indicación de sus valores medios realmente transferidos en los últimos años.

3.1.6.3. Transferencias subterráneas

En España existen numerosísimos ejemplos de flujos subterráneos que de modo natural son transferidos desde algunas unidades hidrogeológicas, en general de naturaleza carbonatada, a otras contiguas. Pueden citarse las del acuífero de Vildé a la cubeta de Almazán, que afloran al Duero en Gormaz, la conexión subterránea entre las cuencas del Carrión y del Pisuerga por el vaso del embalse de Camporredondo, la alimentación de la Sierra de Altomira y del Campo de Montiel a la Llanura Manchega, los aportes que recibe la vega de Granada de los macizos circundantes, los flujos perimetrales de entrada a la Plana de Valencia, del Cardó al delta del Ebro... etc. Tal como ya se indicó en un epígrafe anterior se evalúa aproximadamente en unos 1.200 hm³/año el agua total que se transfiere entre unidades hidrogeológicas en España.

Hay asimismo diversos casos de transferencias subterráneas entre ámbitos de distintos planes, que tienen lugar en las unidades hidrogeológicas compartidas. Los flujos transferidos son de pequeña entidad, pero tiene interés indicar algunos de los más significativos, que se muestran en la tabla 39.

Las transferencias subterráneas mostradas en la tabla anterior no son todas las existentes sino algunas de las más importantes. Por ejemplo, estimaciones de mayor detalle realizadas en acuíferos como el de Araviana-Moncayo (Sanz Pérez, 1987) muestran unas transfe-

Cuenca cedente	Cuenca receptora	Unidad hidrogeológica	Transferencia (hm ³ /año)
Duero	Ebro	Araviana-Moncayo	10
Guadalquivir	Sur	Sierra de Libar	5
Guadalquivir	Sur	Setenil-Ronda	3
Sur	Guadalquivir	Sierra Gorda-Zafarraya	30
Guadalquivir	Sur	Sierra de Padul	10
Ebro	C.I.Cataluña	Cardó-Perelló	20
Tajo	Ebro	Albarracín-Cella-Molina de Aragón	20
Júcar	Ebro	Albarracín-Cella-Molina de Aragón	10

Tabla 39. Transferencias subterráneas entre ámbitos de planificación

rencias (20 hm³/año) mayores que las reflejadas en la mencionada tabla. Es también digna de mención la transferencia de unos 15 hm³/año del río Ebro a la cabecera del río Arlanza en la cuenca del Duero.

3.1.6.4. Transferencias totales

De acuerdo con lo expuesto en los epígrafes anteriores, las transferencias entre ámbitos de distintos Planes Hidrológicos, tanto superficiales como subterráneas, son las que se resumen en la tabla 40.

Como ya se ha indicado, estos valores corresponden a transferencias reales representativas de lo sucedido en los últimos años, y no a los volúmenes que legalmente podrían ser transferidos conforme a las disposiciones reguladoras de las distintas transferencias.

3.1.7. Disponibilidades totales

En secciones anteriores se han examinado las disponibilidades reguladas mediante los embalses de superfi-

cie, la situación de explotación de las aguas subterráneas, el uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas, la recarga artificial, la reutilización, la desalación y las transferencias superficiales y subterráneas.

Los recursos internos disponibles en cada cuenca, convencionales y no convencionales, junto con las transferencias que le afectan, configuran la oferta de recursos disponibles totales con que atender las diferentes necesidades de agua.

En la tabla 41 se resume parte de la información obtenida y presentada en los epígrafes precedentes. El volumen regulado en embalses corresponde al caso tipo representativo de modulación variable de la demanda, déficit admisibles del 50, 75 y 100% de la demanda anual y retornos del 20% de la demanda atendida, con una disminución del 5% de la capacidad de los embalses para tener en cuenta el efecto de los resguardos destinados al control de avenidas. Debe asimismo tenerse en cuenta el efecto de sobreestimación por grandes embalses de cola en algunas cuencas, al que se hizo referencia en epígrafes anteriores.

Ámbito	Transferencias de otros ámbitos (hm ³ /año)			Transferencias a otros ámbitos (hm ³ /año)		
	Superficial	Subterránea	Total	Superficial	Subterránea	Total
Norte I						
Norte II	4		4	4		4
Norte III	190		190			
Duero					10	10
Tajo				301	20	321
Guadiana I	20		20			
Guadiana II						
Guadalquivir		30	30	6	18	24
Sur	7	18	25		30	30
Segura	225		225	30		30
Júcar	85		85		10	10
Ebro	4	40	44	247	20	267
C.I. Cataluña	53	20	73			
Galicia Costa						
Baleares						
Canarias						
Total	588	108	696	588	108	696

Tabla 40. Transferencias totales de recursos entre ámbitos de planificación

	Volumen regulado en embalses (hm ³ /año)	Bombeo actual de aguas subterráneas.	Reutilización directa (hm ³ /año)	Desalación de agua de mar (hm ³ /año)	Transferenc. superficiales (hm ³ /año)	Indicador de cota máxima actual total (hm ³ /año)
Galicia Costa	1.223					1.223
Norte I	3.937					3.937
Norte II	1.870	19			+4-4	1.889
Norte III	353	33			+190	576
Norte	7.383	52			+194-4	7.625
Duero	6.095	371				6.466
Tajo	5.845	164			-301	5.708
Guadiana I	1.922	738			+20	2.680
Guadiana II	228	76				304
Guadiana	2.150	814	5		+60	2.984
Guadalquivir	2.819	507	12		-6	3.332
Sur	359	420	19	20	+7	825
Segura	626	478	56		+225-30	1.355
Júcar	2.095	1.425	83		+85	3.688
Ebro	11.012	198	6		+4-247	10.973
C.I. Cataluña	791	424	6		+53	1.274
Total Península	39.175	4.853	187	20		44.230
Baleares		284	26	6		316
Canarias		395	20	68		483
Total España	39.175	5.532	233	94	+588-588	45.029

Tabla 41. Síntesis de disponibilidades hídricas teóricas

El aprovechamiento de aguas subterráneas se refiere a los actuales valores de bombeo. Lo mismo sucede en el caso de la reutilización directa y la desalación. En este último caso sólo se ha incluido la procedente de agua de mar, pues el bombeo total incluye al de aguas salobres.

Asimismo, los valores de las transferencias corresponden, como se indicó, a un promedio representativo de los volúmenes reales transferidos en los últimos años.

Las cifras de la tabla solo pretenden dar un marco de referencia en cuanto a las actuales disponibilidades de agua, y no son aditivas (no pueden sumarse de forma directa), siendo éste uno de los errores que se han cometido en ocasiones al intentar homogeneizar y presentar la información sobre los recursos hídricos.

En efecto, los volúmenes regulados en embalses se han evaluado, como se dijo, en un supuesto teórico de utilización apropiatoria y exclusiva de las aportaciones superficiales totales. El aprovechamiento de las aguas subterráneas podría lógicamente afectar a estos volúmenes, por lo que no pueden sumarse directamente. Tampoco se han considerado en la tabla toda la reutilización indirecta posible, ni los retornos procedentes de la desalación de agua de mar o de los trasvases, que incrementarían la disponibilidad.

Por estas razones se ha titulado la suma de la última columna no como las *disponibilidades totales*, sino

como un *indicador de la cota máxima* actual de estas disponibilidades totales.

Así, y ciñéndonos a los recursos convencionales, una primera estimación de las disponibilidades convencionales totales reguladas actuales sería la suma de la regulación en embalses más los bombeos de aguas subterráneas, ya que toda la explotación subterránea es obviamente regulada (los bombeos se activan cuando se desea).

Esta estimación simple no es enteramente rigurosa, pues parte de la regulación por bombeos podría quedar embebida en la ofrecida por los embalses, aunque es improbable que ésto suceda dada la diferencia de precios del agua en ambos casos. Además, estos bombeos podrían disminuir las aportaciones entrantes a los embalses si se sitúan en acuíferos que drenan hacia ellos, y, en consecuencia, mermar la cifra de regulación superficial.

En cualquier caso, la suma de los dos conceptos es una buena estimación no de las disponibilidades convencionales, sino de una *cota superior* de las mismas, y como tal debe interpretarse. La adición de los recursos no convencionales opera en general en el mismo sentido, aunque algunos efectos no cuantificados podrían incluso incrementar este indicador (p.e. los retornos de las transferencias o el uso conjunto).

Las cifras obtenidas pueden servir para acotar el nivel de los recursos totales actualmente disponibles, y su

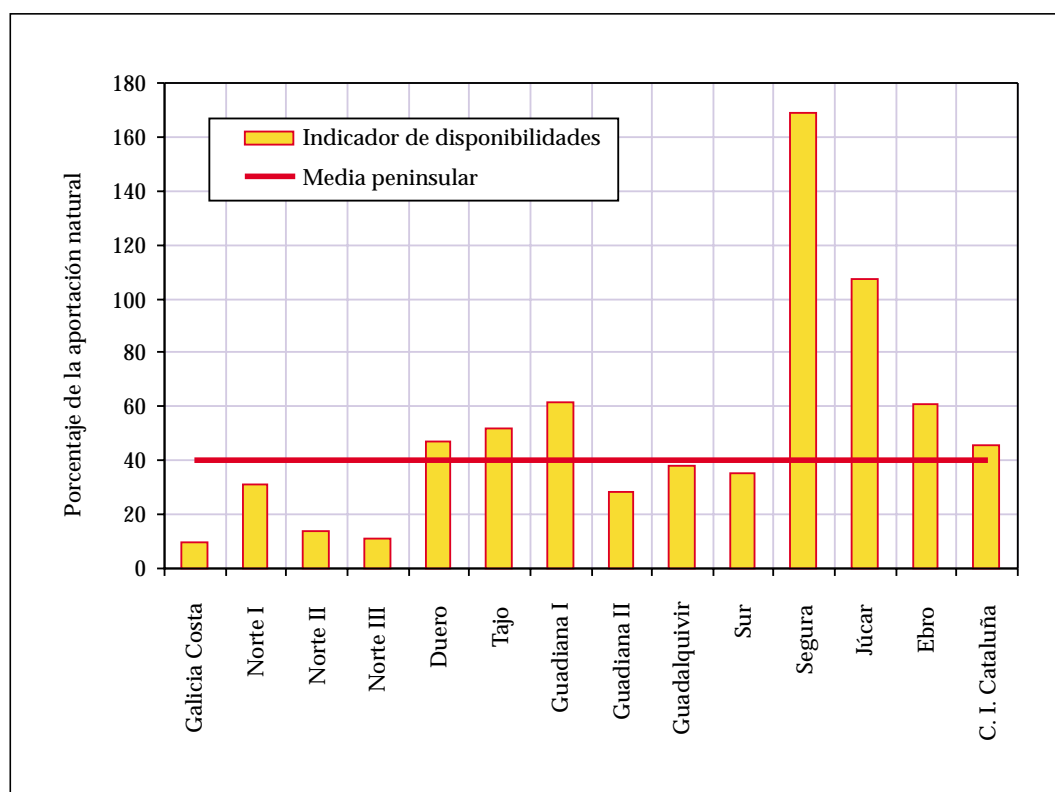


Figura 161. Relación entre los indicadores de cotas máximas de disponibilidades hídricas, y los recursos totales en régimen natural, por ámbitos de planificación

comparación con los recursos naturales de cada ámbito proporciona una idea muy encajada del grado de desarrollo relativo de las distintas cuencas desde el punto de vista de sus posibilidades de oferta hídrica.

Así, la figura 161 muestra la relación entre las cotas máximas de disponibilidades obtenidas y los recursos totales en régimen natural, y puede considerarse como un paso más sobre la anteriormente ofrecida de regulación en la situación teórica analizada, en la que se consideraba únicamente la acción de los embalses de superficie.

Como puede verse, las disponibilidades medias peninsulares son similares a las anteriores (del orden de un 40%), pero las diferencias entre cuencas aparecen ahora mucho más marcadas.

Destacan muy especialmente las cuencas del Segura y Júcar, donde existen unas disponibilidades máximas teóricas similares o superiores a sus recursos naturales, lo que resulta explicable considerando las transferencias externas y el intenso desarrollo de los recursos subterráneos y no convencionales. Puede afirmarse que, en principio y con carácter general, estas cuencas están bien desarrolladas en lo que a grandes equipamientos de regulación y bombeo de aguas subterráneas se refiere, hacen un uso muy intensivo de sus recursos, y no precisarán de nuevas grandes presas ni aumento de captaciones subterráneas para incrementar significativamente sus disponibilidades, pues éstas no admiten ya prácticamente ningún incremento por la

vía convencional, y solo las fuentes no convencionales podrían incrementarlas marginalmente.

Las cuencas del Ebro, Guadiana, Tajo, Duero y C.I. de Cataluña se encuentran a continuación en cuanto a nivel de disponibilidades, con valores del orden del 50% de sus recursos naturales, y superiores a la media peninsular, por lo que, pese a su buen nivel actual de disponibilidad, presentan aún márgenes importantes para posibles desarrollos futuros o reservas ambientales. Hay que hacer notar, no obstante, que en el caso de los grandes ríos internacionales (Duero, Tajo y Guadiana) existen unos requerimientos especiales, por su carácter transfronterizo, que matizan esta posibilidad.

En el otro extremo, Galicia Costa, Norte II y Norte III son los ámbitos que presentan un nivel de disponibilidades menor en relación a su aportación natural, lo que resulta explicable considerando el gran volumen de recursos medios de estas cuencas frente a sus relativamente reducidas necesidades actuales.

Todo lo dicho ha de considerarse, obviamente, como una aproximación de carácter indicativo, y en modo alguno como resultados firmes y concluyentes. No obstante, la homogeneidad y rigor de las determinaciones y la unidad de tratamiento que se ha dado permite, aún con tal carácter indicativo, hacerse una cabal idea de la actual situación relativa de las diferentes cuencas desde el punto de vista del desarrollo de sus disponibilidades hídricas.

Es importante notar que estos *indicadores de disponibilidad* se han obtenido exclusivamente del análisis de los recursos hídricos, que es el que se ha realizado hasta ahora, y sin considerar la situación de las demandas de agua en las cuencas. El análisis realizado y los resultados obtenidos no deben confundirse, pues, con el de los posibles balances hídricos de estas cuencas, cuestión que será abordada en otras secciones del Libro.

En efecto, puede darse el caso de ámbitos con indicador de disponibilidades muy elevado, y que sin embargo presenten situaciones de déficit, por superar sus demandas incluso a estas elevadas disponibilidades. Por contra, puede haber ámbitos con indicador de disponibilidades muy bajo, y en los que haya abundancia y superávit de recursos, si las demandas existentes se satisfacen ampliamente con este nivel de disponibilidad e incluso con niveles inferiores.

El sistemático análisis de disponibilidades realizado apunta sólo, como se indicó, a mostrar el grado relativo de su desarrollo en las distintas cuencas, y a señalar aquellas en las que, razonablemente y a escala global, no caben mayores expansiones significativas de la *oferta* de recursos mediante elementos de regulación y captación de aguas subterráneas en el futuro. Sí podrían requerirse, por contra, elementos internos de redistribución y reequilibrio orientados a proporcionar redundancias y mejorar las garantías de servicio, o, en su caso, fuentes no convencionales de nuevos recursos (como la desalación o transferencias externas) si se detectasen situaciones de déficit, pero éste análisis es, como se mostró, de distinta naturaleza al hasta ahora ofrecido.

3.1.8. Las Incertidumbres del futuro

Entre las distintas incertidumbres que se ciernen sobre el futuro de los recursos hídricos en nuestro país, se comentarán brevemente las consecuencias de la variabilidad natural del registro hidrológico, y de los posibles efectos de un cambio climático de origen antropogénico.

3.1.8.1. La variabilidad hidrológica natural

Como se ha visto y reiterado en secciones anteriores, los registros hidrológicos presentan una importante variabilidad tanto espacial como temporal. En esas secciones se estudió con detalle la estructura espacio-temporal de las aportaciones naturales totales anuales a escala global, y en los distintos ámbitos territoriales de la planificación hidrológica, así como las rachas secas y húmedas observadas en las distintas regiones. Este análisis se extendió al periodo de 56 años comprendido entre los años hidrológicos 1940/41-1995/96.

En este epígrafe, se mostrará la incertidumbre existente asociada a la variabilidad hidrológica natural, y la longitud de tales muestras hidrológicas. Para ello se analizará, en primer lugar, la influencia del tamaño muestral sobre la estimación de los recursos medios, en el periodo con abundancia de datos disponibles (periodo estándar, con series desde el año 1940/41). Tras ello, se extenderá el análisis a periodos más largos pero con menor número de datos disponibles, estudiando las rachas de series largas existentes de precipitación y aportaciones naturales.

3.1.8.1.1. Incertidumbres asociadas a la longitud de los registros disponibles

Centrando nuestra atención en las aportaciones totales en régimen natural, es importante retener que su variabilidad aleatoria natural constituye *una fuente de incertidumbre intrínseca*, debida a la longitud de las series empleadas y la necesidad de inferir propiedades poblacionales a partir de muestras reducidas.

Para acotar cuantitativamente este efecto con un ejemplo significativo, y considerando los datos estándar, desde el año 1940/41, la figura 162 muestra la evolución de la estimación de la media de las aportaciones totales en régimen natural en la España peninsular, y de la incertidumbre en la estimación de esa media, según el año en que se hubiese llevado a cabo tal estimación. Esta incertidumbre se expresa mediante los límites de confianza del 95%, obtenidos a partir del error estándar de la media.

Como puede verse, la estimación de los recursos medios habría evolucionado, admitiendo la serie de partida, desde 120 hasta 105 km³/año, y desde finales de los 70 hubiese sido decreciente año a año hasta 1995, en que aumenta ligeramente hasta alcanzar los 110 actuales. Asimismo, esta estimación actual de 110 km³/año tiene incluso, como puede verse, un margen de incertidumbre estadística del orden de +/- 10 km³/año para el 95% de nivel de confianza, pues el error estándar de la media es actualmente del orden de 5 km³/año, es decir, algo inferior al 5%.

Si el mismo análisis se realiza a la escala de los ámbitos de planificación hidrológica, se comprueba que los errores estándar de la estimación de sus recursos medios oscilan entre el 3% de las cuencas del Norte y el 12% del Guadiana II.

En definitiva, existe una imprecisión intrínseca del conocimiento de los recursos, debida a la ventana temporal de observación (muestras disponibles) de los registros hidrológicos, que, aunque no modifica las cuantías de la actual evaluación de los mismos, infor-

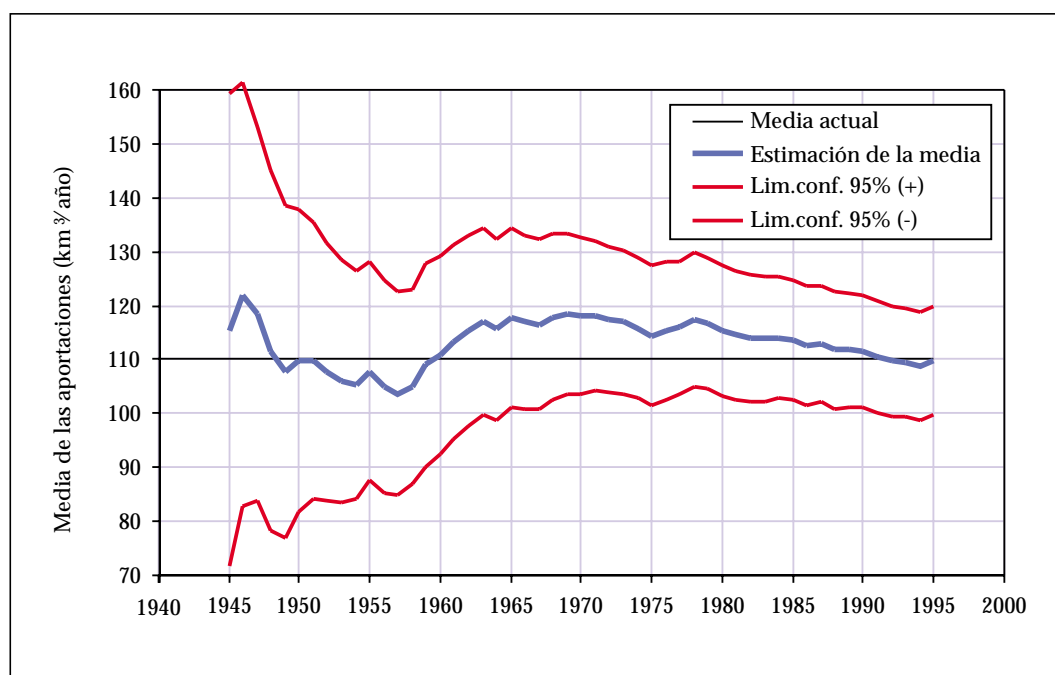


Figura 162. Evolución de la estimación de la media de aportaciones totales anuales en régimen natural en la España peninsular y su incertidumbre asociada

ma sobre la magnitud de su incertidumbre, y alerta sobre la necesaria prudencia y ponderación de juicio en el análisis de los sistemas hídricos.

Tal variabilidad natural no incorpora obviamente efectos "no naturales" como serían los debidos al hipotético cambio climático de origen antropogénico, que será estudiado en siguientes secciones.

3.1.8.1.2. Incertidumbres asociadas a la variabilidad a largo plazo

Además de esta indeterminación por la ventana temporal de observación, se ha comprobado la existencia en el pasado -sin cambio climático antrópico- de variaciones multi-decadales, con diferencias apreciables entre tales periodos, aunque el análisis estadístico de esta variabilidad, en las muestras disponibles, no permita rechazar nítidamente la hipótesis de estacionariedad de las series hidroclimáticas. El estudio histórico y paleoclimático, antes de la era de mediciones instrumentales, muestra asimismo grandes oscilaciones del clima en el pasado, con continuas alternancias de periodos fríos y cálidos, secos y lluviosos. Una interesante descripción de estas oscilaciones climáticas en España es la ofrecida por Font Tullot (1988).

Desde un punto de vista científico, acaso los procesos de ruidos fraccionales, de memoria infinita, o la variación caótica de los niveles de humedad y atmosféricos medios a escala multianual (Rodríguez-Iturbe, 1991), puedan describir o aportar alguna explicación sobre estos fenómenos naturales. Los viejos efectos bíblicos de Noé (valores inesperadamente altos de lluvias con-

tinuas durante cuarenta días y cuarenta noches), y de José (rachas alternas muy largas - 7 años - de plagas y vacas flacas, y de vacas gordas), vuelven a nuestra memoria, como expresiones clásicas de esta variabilidad natural, treinta años después de que fuesen brillantemente formulados en la moderna literatura hidrológica (Mandelbrot y Wallis, 1968).

Para intentar acotar las incertidumbres debidas a la ventana temporal estándar, es necesario analizar, siquiera someramente, la posibilidad de extender esta ventana con las series más largas disponibles. Ello implicará una cierta pérdida de representatividad espacial, al tratarse de un conjunto de registros notablemente inferior al del periodo estándar, pero, admitiendo esta pérdida, es de interés su estudio, pues permitirá comprobar efectos de no homogeneidad de los registros (saltos o tendencias), y matizar, en su caso, nuestra estimación actual estándar, al alza o a la baja, comparando los valores medios relativos de los distintos periodos.

Sin considerar indicadores proxy (como registros sedimentarios, anillos de los árboles u otros testigos biofísicos), y centrándonos exclusivamente en los datos hidrometeorológicos registrados disponibles, se estudiará, en primer lugar, el registro pluviométrico, para abordar después el de caudales fluviales.

3.1.8.1.2.1. Variabilidad de las lluvias

En las secciones dedicadas al análisis de las redes meteorológicas se mostraron unos gráficos con la evolución del número de estaciones pluviométricas existentes en

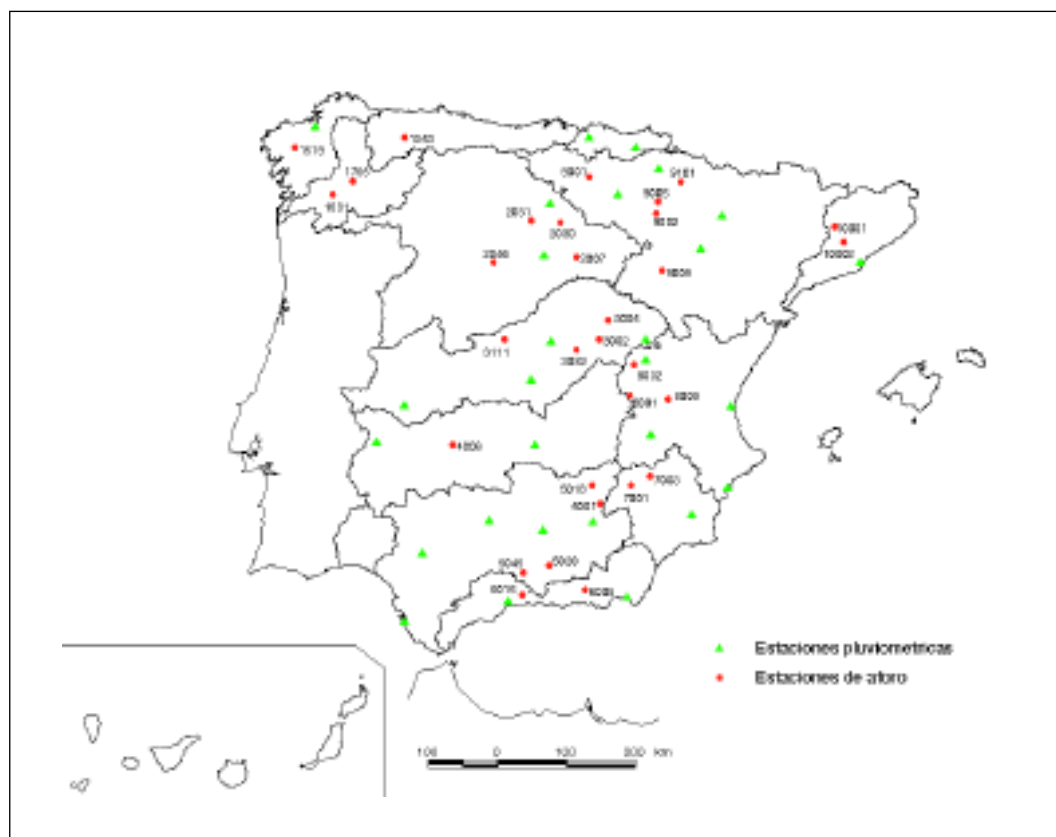


Figura 163. Mapa de estaciones con series largas seleccionadas

España a lo largo del siglo XIX y del siglo XX. En el gráfico del XIX puede observarse que desde 1840 existían 2 estaciones operativas, desde 1862 existían 21 estaciones, y desde 1910 existían 44 estaciones. El examen de estas series antiguas, recopiladas por el INM y completadas y homogeneizadas por este Organismo (INM, 1996), nos ha permitido seleccionar un conjunto de 27 series pluviométricas muy completas y de suficiente calidad, con datos desde 1910. De ellas, un subconjunto de 14 series tiene datos muy completos desde 1868, y de ellas, una (San Fernando) tiene datos muy completos desde 1839.

El mapa de la figura 163 muestra la situación de las 27 estaciones pluviométricas seleccionadas, y permite apreciar su buena distribución espacial, lo que permite considerarlas razonablemente representativas de todo el territorio. Se han incluido asimismo otras estaciones foronómicas que se comentarán más adelante.

Para analizar el comportamiento de estas series largas, la figura 164 muestra las desviaciones unitarias acumuladas de los 4 conjuntos de datos: serie única de San Fernando, serie media de las 14 (M 14), serie media de las 27 (M 27), y serie media del total peninsular areal en el periodo estándar (1940/41-1995/96), mostrada en secciones anteriores. Dada la distribución espacial de las estaciones, tal simple media aritmética es un estimador razonable del valor promedio areal peninsular.

Como puede observarse, y pese a la variabilidad perceptible a distintas escalas, los 4 conjuntos de series parecen seguir patrones similares en los periodos temporales en que son coexistentes, lo que reafirma su representatividad. Puede verse, asimismo, que el periodo seco desde el año 1940 hasta mediados de los 50, que ya se había detectado en el análisis de rachas de la serie estándar, parece ser la culminación de un ciclo mucho más largo, estable o ligeramente seco, que arrancaría a principios del siglo, con una ligera recuperación húmeda en la década de los 30. Los últimos 20 años del siglo XIX pueden considerarse húmedos, con un comportamiento similar a la reciente racha desde mediados de los 50 hasta finales de los 70. Los diez años anteriores (1870-1880) fueron, a su vez, una racha seca, y es aventurado realizar ninguna hipótesis del periodo anterior, dado que solo se dispone de datos de una estación.

En síntesis, el registro histórico de los últimos 130 años de datos pluviométricos parece mostrar importantes oscilaciones a escalas decadales, similares o incluso mayores que las de nuestro periodo estándar de análisis. Además, el valor medio de serie de lluvias anuales en los últimos 130 años (serie M 14) es del orden de un 2.5% superior al de la misma serie en ventana temporal ordinaria de los planes hidrológicos de cuenca (1940-1985), y un 1.3% superior al de la misma serie en la ventana temporal estándar de este

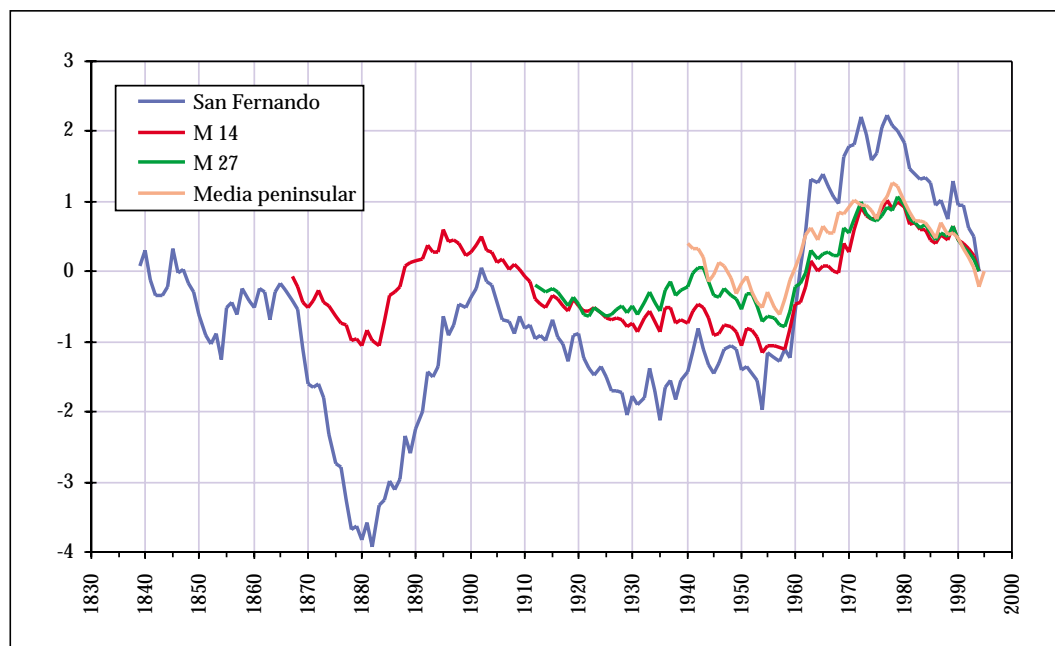


Figura 164. Rachas de la precipitación media anual en España con series largas, a partir de las desviaciones unitarias acumuladas

Libro Blanco (1940-1995). Estos valores se reducen al 1.8 y 0.5% respectivamente con la ventana de 83 años proporcionada por la serie M 27. Empleando como ventana de comparación la del periodo 1961-90 (últimos 30 años climáticos de referencia CLINO, según los treintenios estándar recomendados por la OMM), esta ventana resulta ser un 4.1 (3.3)% más húmeda que la M 14 (M 27).

No es descartable, en suma, que las oscilaciones pluviométricas seculares observadas hayan inducido en la respuesta hidrológica una sensible variabilidad hiperanual, superior a la perceptible en las ventanas estándar, o que tales ventanas empleadas en la planificación arrojen resultados inseguros, superiores en media a los del periodo largo completo. En ambos casos subyace, en definitiva, el problema de una posible falta de representatividad de las series hidrológicas.

A analizar tal posibilidad, relevante para nuestra planificación hidrológica, se destina el epígrafe siguiente.

3.1.8.1.2.2. Variabilidad de los caudales

Es esperable que las rachas secas y húmedas de las aportaciones naturales, a escala peninsular, presenten patrones multianuales de comportamiento similares a los de las precipitaciones que las generan, aunque con diferencias a menor escala temporal debido a los efectos de no linealidad de la respuesta hidrológica.

Una vez estudiado el comportamiento general de las series largas de lluvias, se realizará un análisis similar para las aportaciones en régimen natural. Para ello, se han seleccionado las estaciones foronómicas

con datos disponibles, no afectadas (al menos hasta tiempos recientes), y con registros relativamente completos, cuya evolución de número es la mostrada en la figura 165.

Se observa que empieza a haber algunas estaciones en 1912, y hasta los años 40 no aumenta sensiblemente su disponibilidad. De todas ellas, existen 2 con series anuales con más de 75 años completos desde el año 12, mientras que hay 7 con 65 años completos. El mapa anteriormente mostrado permite ver la situación de las 30 estaciones inicialmente seleccionadas. Sin refinar más el análisis, y limitándonos a obtener una primera impresión de su comportamiento, se han representado en la figura 166 las series de desviaciones unitarias acumuladas correspondientes al conjunto de 2 (M 2), al conjunto de 7 (M 7) y al conjunto de todas las disponibles. En los tres casos, y para obviar los problemas de escala, se ofrecen las medias de los datos específicos (aportación/superficie drenada) y de los datos unitarios (divididos por la media) de las estaciones. Se ha representado, también, la aportación total peninsular obtenida con el modelo distribuido para el periodo estándar, ofrecida en epígrafes anteriores.

Puede verse que, pese a lo simplificado e imperfecto de este análisis, los patrones multianuales son plenamente coincidentes en todos los casos, y las rachas de aportaciones secas y húmedas son, como era de esperar, básicamente las mismas que las de las precipitaciones medias. En el periodo anterior a 1940 no hay un patrón claramente marcado, observándose cierto estancamiento hasta 1935, en que hay una corta racha húmeda. Los efectos de la ventana de referencia de los

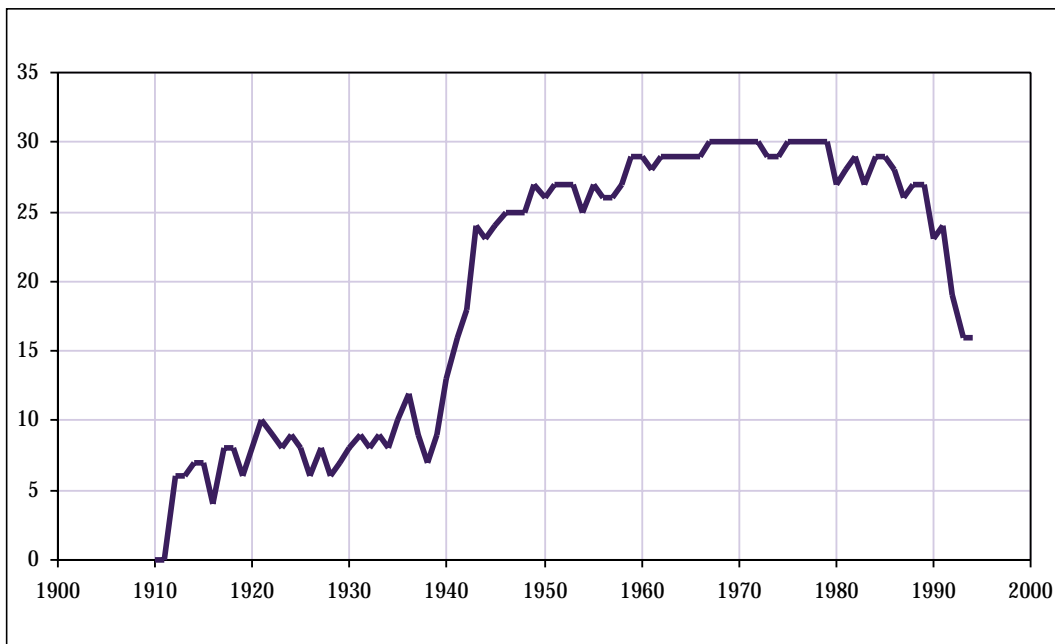


Figura 165. Evolución del número de estaciones foronómicas disponibles con series relativamente completas y no afectadas

Planes (1940-1985) no parecen ser importantes, pues la media de los contrastes de aportaciones específicas de las 7 estaciones más largas resulta ser sólo del 2% (y con apreciable variabilidad entre estaciones), lo que no puede considerarse significativo, y no es posible retrotraerse más en el tiempo por inexistencia de datos.

En definitiva, a la escala global, y con el primer análisis simplificado realizado, no es posible extraer conclusiones respecto a la falta de representatividad de la ventana temporal empleada en los Planes Hidrológicos. El valor global de un 2% por encima del registro largo no resulta significativo, aunque, considerándolo conjuntamente con el 1.8-2.5% de las lluvias, permite inferir que, en efecto, puede tra-

tarse de una ventana ligeramente húmeda con respecto a la total disponible del periodo instrumental.

La ventana estándar de este Libro Blanco resulta ya más parecida a la total, por incluir el efecto de la reciente sequía.

3.1.8.2. Las incertidumbres del cambio climático

3.1.8.2.1. Introducción

Lejos de tratarse de una novedad, la discusión sobre posibles cambios climáticos viene produciéndose

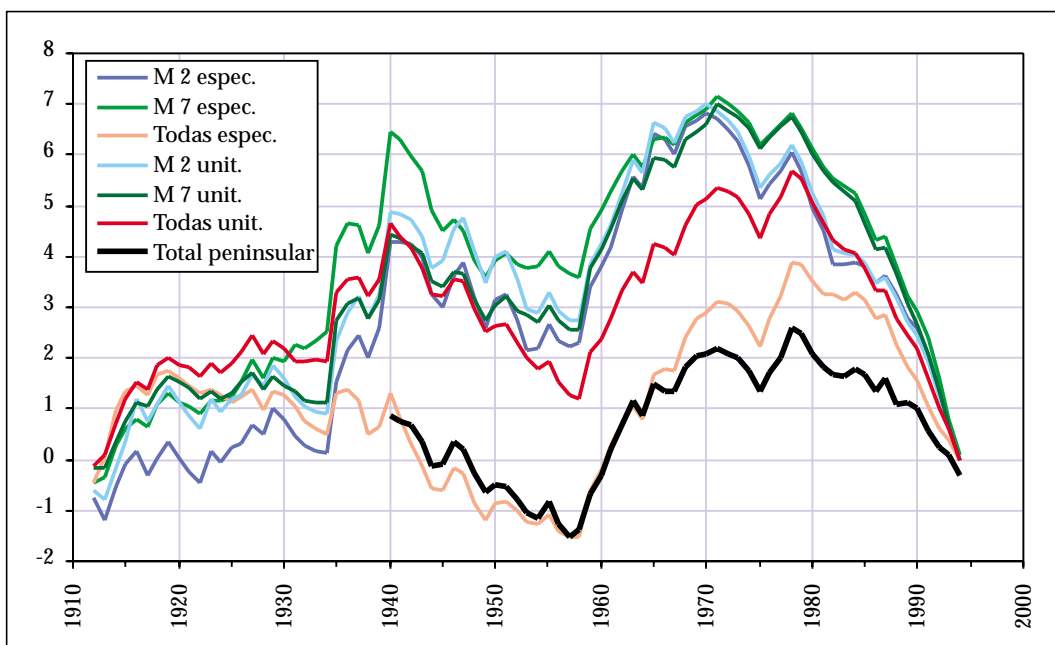


Figura 166. Rachas de aportaciones naturales anuales en España con series largas, a partir de las desviaciones unitarias acumuladas

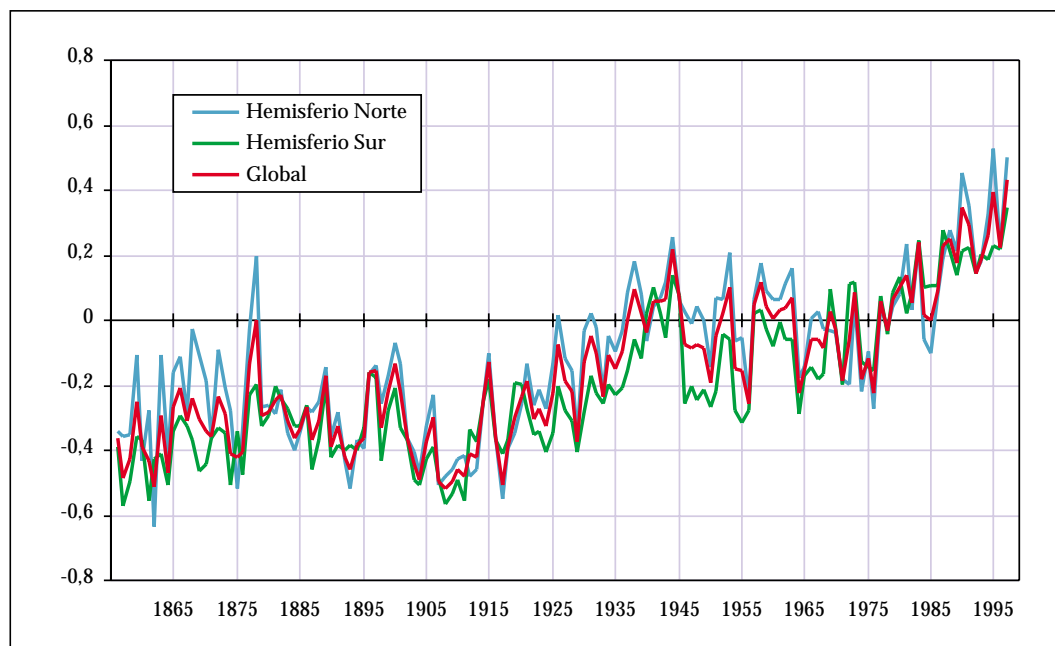


Figura 167. Evolución desde 1855 de la variación de la temperatura media global de la Tierra respecto a la media de la serie (°C)

desde muy antiguo. En España, por ejemplo, fue una polémica de moda a mediados del XIX, tal y como muestran los clásicos trabajos de Rico Sinobas (Font Tullot [1988] p.33). Sin embargo, no es hasta fechas recientes que esta cuestión ha alcanzado un lugar principal en la discusión sobre el futuro de nuestros recursos naturales y la sostenibilidad de su empleo.

Así, en los últimos años se ha producido una gran preocupación científico-social acerca del posible cambio climático inducido por el aumento del contenido del dióxido de carbono (CO₂) y de otros gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera. Esta preocupación ha dado lugar a importantes iniciativas internacionales como la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, ratificada por España en 1993 (MIMAM, 1998e).

El fundamento del problema es la probable intensificación del efecto de invernadero natural que tendría como consecuencia un aumento de la temperatura media mundial de la superficie de la Tierra, conocido como calentamiento global, y los complejos procesos atmosféricos relacionados (Linés Escardó, 1990).

La gravedad potencial del problema es creciente al observar que los ritmos de cambio de las tasas de emisión de los GEI han aumentado, en la mayor parte de los casos. En realidad, el aumento de los GEI en la atmósfera y las variaciones de otros factores como son la energía solar entrante, las erupciones volcánicas o las modificaciones del albedo planetario (parte de la energía entrante reflejada hacia el espacio) se cuantifican mediante los denominados "forzamientos radiativos" o alteraciones del flujo neto de energía en

la tropopausa. Los forzamientos asociados a los incrementos de los GEI atmosféricos son positivos y mucho mayores que los asociados a los otros fenómenos, lo que fundamenta la preocupación social existente. Sin embargo, también existen forzamientos negativos. Entre ellos, el más importante y capaz de contrarrestar parcialmente el de los GEI, es el debido a la presencia de aerosoles atmosféricos sulfurosos. Es previsible que su contribución relativa disminuya con el tiempo al estar limitado su ritmo de aumento. Por otra parte, su distribución poco homogénea, localizada geográficamente sobre los grandes focos de contaminación mundial, introduce un factor de incertidumbre.

Los registros climáticos disponibles indican una tendencia hacia un calentamiento global durante el último siglo, con un calentamiento anterior a 1940, un ligero enfriamiento durante el periodo 1940-70 y un calentamiento posterior especialmente notable durante la última década. La figura 167 (elaborada con datos de la Climatic Research Unit de la Universidad de East Anglia) muestra claramente estas tendencias térmicas.

Como se observa, las temperaturas medias del hemisferio norte, del hemisferio sur, y global de la superficie de la Tierra han aumentado entre 0,3 y 0,6 °C, aproximadamente, desde finales del siglo pasado hasta la actualidad. Aunque existe bastante incertidumbre sobre si la tendencia observada es producto de una variación natural del clima, similar a las existentes en el pasado, o si debiera atribuirse, en su mayor parte, al aumento de GEI atmosféricos durante los últimos 200 años, la mayoría de estudios llevados a cabo reflejan que el ori-

gen de la tendencia que muestra el calentamiento observado es poco probable que sea completamente natural. La capacidad para cuantificar la influencia humana sobre el clima mundial es, en la actualidad, limitada, debido a que la señal detectada es una señal que empieza a emerger del ruido de la variabilidad natural (Labajo, 1996), y no resulta aún claramente discernible de ese ruido. Sin embargo, según el Panel Intergubernamental de Expertos para el cambio climático (IPCC), las pruebas y estudios realizados sugieren en conjunto la existencia de una influencia humana detectable sobre el clima global (IPCC, 1995).

Las herramientas utilizadas para investigar todos estos efectos son los Modelos de Circulación General Acoplados Océano-Atmósfera (MCGA-OA). En la mayoría de estos modelos existe un cierto acuerdo sobre las tendencias de algunas variables climáticas, como la temperatura y la precipitación, aunque con una mayor incertidumbre en el caso de esta última.

Una modificación de la temperatura o de la precipitación repercutiría sobre los recursos hídricos de un territorio, pues, a largo plazo, su escorrentía es igual a la diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración. Según los informes de evaluación científica realizados por el IPCC, un incremento de temperatura de uno a dos grados centígrados, unido a una disminución del 10% en las precipitaciones, podría llegar a producir en zonas semiáridas una reducción del 40% al 70% en la escorrentía anual (IPCC, 1995).

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

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, modificando la estacionalidad de los flujos.

Si ocurre un cambio climático estos impactos potenciales probablemente tendrán lugar de forma gradual. Aunque la incertidumbre es grande y se necesitará tiempo para confirmar los cambios, ello no impide señalar que la amenaza existe y que es lo suficientemente importante como para que sea tenida en cuenta dentro del marco de la planificación hidrológica.

3.1.8.2.2. Escenarios de precipitación y temperatura

Aunque para evaluar el efecto sobre el clima inducido por el aumento de las concentraciones de CO₂ y otros gases efecto invernadero se han venido utilizando los

MCGA-OA, esto no significa que en su estado de conocimiento puedan proporcionar la distribución espacial y la evolución temporal precisa de la respuesta del sistema climático a una variación en las concentraciones en la atmósfera del CO₂ y otros GEI. No obstante, los MCGA-OA son actualmente las únicas herramientas de que se dispone para obtener los patrones de respuesta climática ante diversas acciones exógenas. 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 que la posibilidad de un cambio climático plantea 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.). Por esta razón se están desarrollando modelos climáticos regionales. Hoy en día se encuentran en sus comienzos y los resultados que proporcionan aún no son suficientemente fiables para utilizarlos como escenarios futuros. En la actualidad sólo se dispone de escenarios regionales obtenidos a partir de los resultados de uno o varios MCGA-OA, con todas las limitaciones y cautelas que ello supone.

Tradicionalmente, esos escenarios climáticos futuros se han generado mediante la técnica de composición de resultados de los MCGA-OA. Así se hace en el documento *Programa Nacional sobre el Clima*. (MOPTMA, 1995c), elaborado por la Comisión Nacional del Clima, donde se analizan los resultados que proporcionan distintas composiciones de modelos.

Con estas composiciones se evalúa el efecto que tendría una duplicación de CO₂ mediante distintos tipos de análisis: de respuesta *en estado de equilibrio*, de respuesta *en transición* hasta alcanzar ese nuevo valor de CO₂, y como respuesta *dependiente del tiempo*. Se prevé que esa duplicación de CO₂ podría tener lugar aproximadamente en el año 2030.

Sin perjuicio de las cautelas e incertidumbres asociadas al problema, la evolución más probable del clima peninsular español, como resultado de esos análisis, se sintetiza en los siguientes escenarios de temperatura y precipitación:

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

- Se estima que podrían producirse descensos generales de los valores de la precipitación media anual comprendidos entre el 5% y el 15%, siendo 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. Esta tendencia implicaría un aumento de los períodos secos y una mayor torrencialidad de las precipitaciones. Los MCGA-OA no proporcionan todavía respuestas que cuantifiquen estos efectos.

Científicamente, estos resultados están expuestos, además, a las incertidumbres que existen sobre la función de las nubes y los aerosoles en el sistema climático, que pueden reducir el calentamiento debido a la intensificación del efecto invernadero, especialmente en las latitudes medias del hemisferio Norte.

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.

Las incertidumbres existentes en los resultados que proporcionan los MCGM obligan a trabajar con escenarios y no con predicciones. Las conclusiones obtenidas como resultado de los estudios de impactos sectoriales deberían, por tanto, estar más orientadas a poner de manifiesto las debilidades de los sistemas que a modificar sus criterios de diseño o funcionamiento.

3.1.8.2.3. Impacto sobre los recursos hídricos

La identificación de impactos sobre los recursos hídricos vinculados a posibles cambios climáticos se ha producido en nuestro país desde antiguo. Así, y a título de ejemplo, existen referencias de comienzos de siglo a la merma de caudales del Segura y sus acusados estiajes, como consecuencia de la deforestación de su cuenca y posibles cambios de clima (Díaz Cassou, 1900), cambios de los que se venía hablando, como dijimos, desde mediados del XIX. Ya entonces Díaz Cassou concluyó la explicación natural de los cambios observados, sosteniendo lo que hoy denominaríamos la *hipótesis de estacionariedad* de los registros hidrológicos.

Existen asimismo indicios de posibles cambios en el régimen hidrológico de España en siglos pasados. Es probable, por ejemplo, que los recursos hídricos del país en el siglo XVIII hayan sido, en su conjunto, superiores a los de la inmediatamente anterior

Pequeña Edad Glacial (1550-1700), circunstancia que puede haber sido coadyuvante para que Carlos III emprendiese el gran programa de obras hidráulicas de la Ilustración (Font Tullot [1988] p.106).

Ya en los albores del siglo XXI, y dado el interés que modernamente despierta la hipótesis de cambio climático, y los cada vez mayores indicios de su existencia, es conveniente comenzar a hacer estudios en España sobre la sensibilidad de los sistemas de explotación de recursos hídricos a las posibles variaciones de las condiciones climáticas del futuro. Las incertidumbres existentes, de toda índole, no permiten por el momento atribuir a estos estudios más que un carácter indicativo, pero, aún admitiendo este carácter, el esfuerzo de indagación y de análisis resulta inexcusable.

A diferencia de otras políticas sectoriales que abordan el cambio climático desde criterios limitativos, como agentes productores del mismo que deben autoregularse para minimizar sus efectos (caso de las emisiones industriales de gases atmosféricos), afrontar el problema del cambio climático desde la perspectiva de la planificación hidrológica requiere adoptar una posición adaptativa. El fenómeno se supone externo al sistema de utilización del agua, para el que deben buscarse, en su caso, estrategias de adaptación que permitan mitigar las consecuencias adversas.

La influencia del cambio climático sobre los sistemas de explotación de recursos hídricos opera en dos fases sucesivas. En primer lugar, la modificación de las condiciones atmosféricas induce una modificación del ciclo hidrológico natural - de los recursos hídricos naturales - que supondrá cambios en la magnitud y estacionalidad de los flujos de agua y de su calidad. En segunda instancia, esta modificación hidrológica puede afectar a los distintos requerimientos hídricos, e influir sobre la utilización del agua a través de los sistemas de explotación, sus infraestructuras y sus reglas de gestión.

El impacto final real requiere, pues, una identificación de estas dos fases distintas. Dada la diversidad de sistemas existentes (diferentes vulnerabilidades, garantías, resiliencias, fragilidad de ecosistemas, etc.), no resulta posible generalizar resultados más allá de los estrictamente hidrológicos, debiendo, en su caso, realizarse tal análisis posterior para cada sistema, de forma singularizada. En consecuencia, analizaremos aquí el posible impacto sobre los recursos hídricos, dejando para otras secciones el posible impacto sobre las demandas sectoriales de agua.

Para abordar el problema hidrológico, una posible opción es partir de las hipótesis de escenarios previsi-

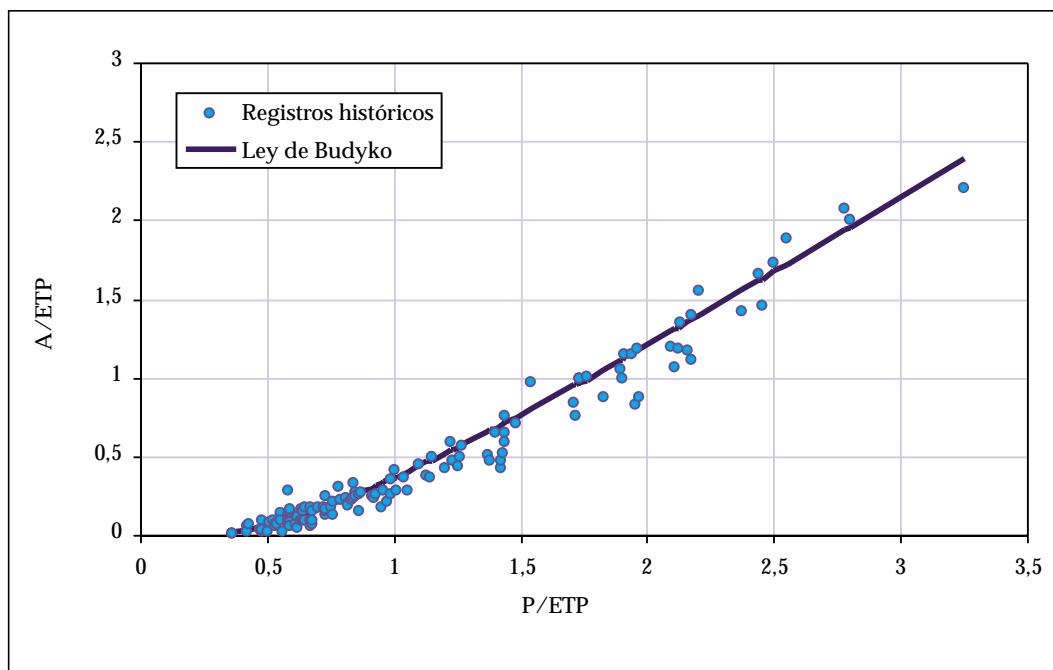


Figura 168. Relaciones entre aportación (A), precipitación (P) y evapotranspiración potencial (ETP) en los puntos de control

bles de cambio climático para España. Un primer análisis lo constituye el estudio de cómo pueden repercutir esas variaciones climáticas en la escorrentía media anual en régimen natural en los distintos ámbitos territoriales de la planificación hidrológica. La estimación de este impacto permitiría adoptar supuestos razonables sobre las series de aportaciones naturales o recursos hídricos totales de los ríos, y obtener así unas series de diseño que, introducidas en los modelos de los sistemas de explotación, permitirían evaluar el impacto del cambio climático supuesto sobre nuestros sistemas hídricos. Como ya se ha indicado, y conviene reiterar, tales análisis son, en buena medida, puramente teóricos, y están sometidos a grandes márgenes de incertidumbre, pero parece conveniente abordarlos con objeto de obtener alguna cuantificación inicial, por dudosa e incierta que ésta resulte.

Así, el empleo de técnicas de modelización matemática que simulen dinámicamente la fase terrestre del ciclo hidrológico permitiría realizar una estimación del impacto del cambio climático sobre las series de aportaciones mensuales en los ríos. Los modelos de este tipo, como el empleado en este Libro, 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 la actualidad no existe información sobre escenarios climáticos lo suficientemente detallada que justifique la

aplicación de este tipo de modelos a escala nacional. Sin embargo, y 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.

Para estimar espacialmente el impacto sobre la escorrentía media anual derivado de distintos escenarios climáticos, se ha utilizado una ley regional, la de Budyko (1961), que relaciona la escorrentía (A) con la precipitación (P) y la evapotranspiración potencial (ETP). Esta ley ya fue utilizada en un análisis experimental realizado en cuencas españolas de distintas características climáticas e hidrológicas (Estrela et al., 1995). Aquí también se ha contrastado con los puntos de control en régimen natural seleccionados para calibrar el modelo de simulación de aportaciones mensuales. Como se observa en la figura 168, el ajuste es aceptable y justifica la utilización de esta sencilla ley regional.

En el análisis se han supuesto los siguientes escenarios climáticos, considerados representativos de lo que podría suceder en nuestro país en el futuro inmediato bajo la hipótesis de duplicación del 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.

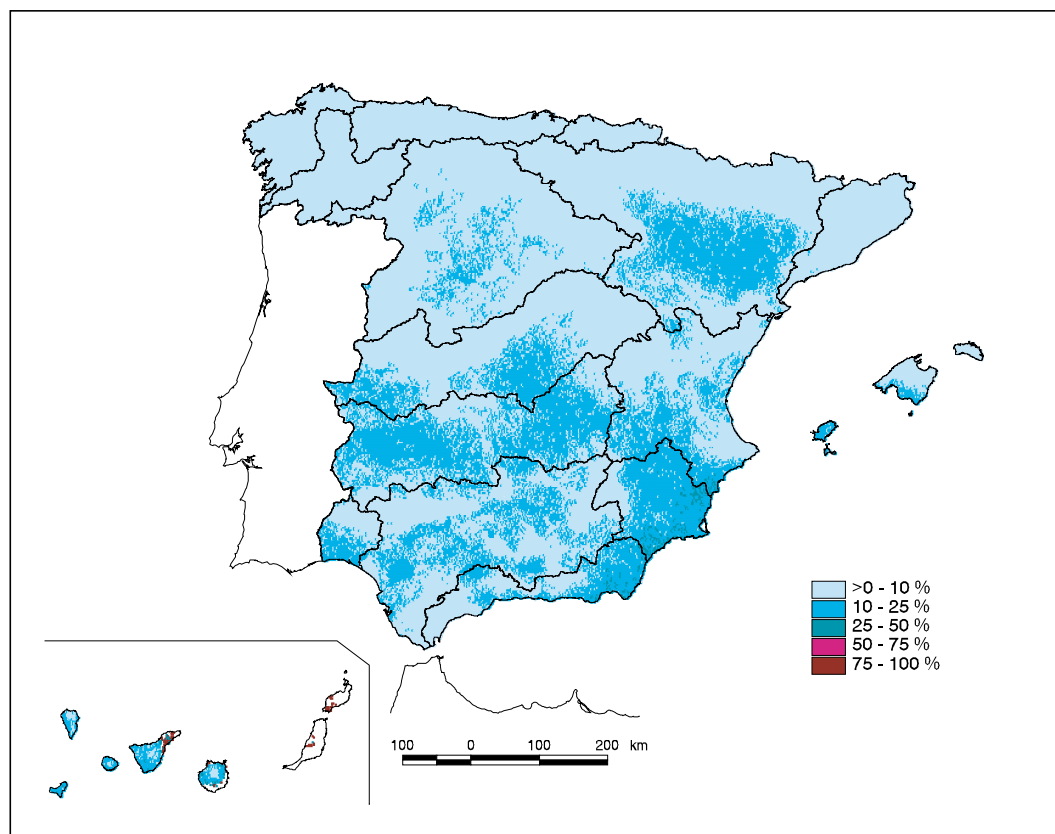


Figura 169. Mapa de disminución porcentual de la escorrentía para el escenario 1

En las figuras 169 y 170 se muestran las disminuciones porcentuales de escorrentía media anual respecto a la situación actual, resultantes para estos dos escenarios.

En la tabla 42 se cuantifican estos efectos, mostrándose, para cada ámbito territorial, el valor medio del porcentaje de disminución de las aportaciones totales en estos dos escenarios climáticos considerados.

También se ha analizado un escenario extremo, muy poco verosímil, suponiendo una disminución de un 15% en la precipitación media anual y un aumento extremo de 4 °C en la temperatura. Las reducciones en la aportación, en este caso, son mucho mayores, alcanzando en algunos ámbitos valores superiores al 50%.

El análisis realizado permite concluir que el sureste peninsular, la cuenca del Guadiana, el valle del Ebro y la España insular, son las áreas donde el impacto sobre los recursos hídricos se manifestaría más severamente.

Los resultados obtenidos son del mismo orden de magnitud que las estimaciones de impacto sobre los recursos realizadas en otras regiones del mundo similares hidrológicamente a España, como es el caso de California. En todo caso, y como ya se ha dicho, estos resultados no deben ser tomados en modo alguno como definitivos, sino como una llamada de atención, y un punto de partida para poste-

riores, y más precisos, estudios de impacto. Se debe, además, tener presente que, como se apuntó, los escenarios utilizados se corresponden con la hipótesis de duplicación del CO₂ prevista para el 2030 y que este año queda fuera de los horizontes de la planificación hidrológica actual. Esto no impide apuntar que, si el cambio climático antropogénico realmente ocurre, España podría enfrentarse en el futuro a un problema serio de agravamiento de la escasez de agua en algunas zonas.

Por otra parte, se han propuesto otros escenarios climáticos que, junto al aumento de temperaturas en todo el año, prevén para nuestro país una disminución de precipitaciones en verano, unida a un aumento de las mismas en invierno. Ello hace que las menores aportaciones por incremento de temperaturas y merma de lluvias en verano (aumento de las sequías estivales) pudieran verse compensadas por mayores caudales en invierno, generando un saldo final incierto, que podría incluso ser favorable si se dispone de suficiente almacenamiento para las mayores escorrentías invernales. Ello vuelve a ilustrar sobre las importantes incertidumbres actualmente existentes.

Volviendo a los dos escenarios considerados, una cifra media global representativa de ese cambio, proyectada al segundo horizonte de la planificación hidrológica, y sensiblemente encajada en todas las horquillas de los distintos ámbitos, sería del orden del 5-6 %, tal y como

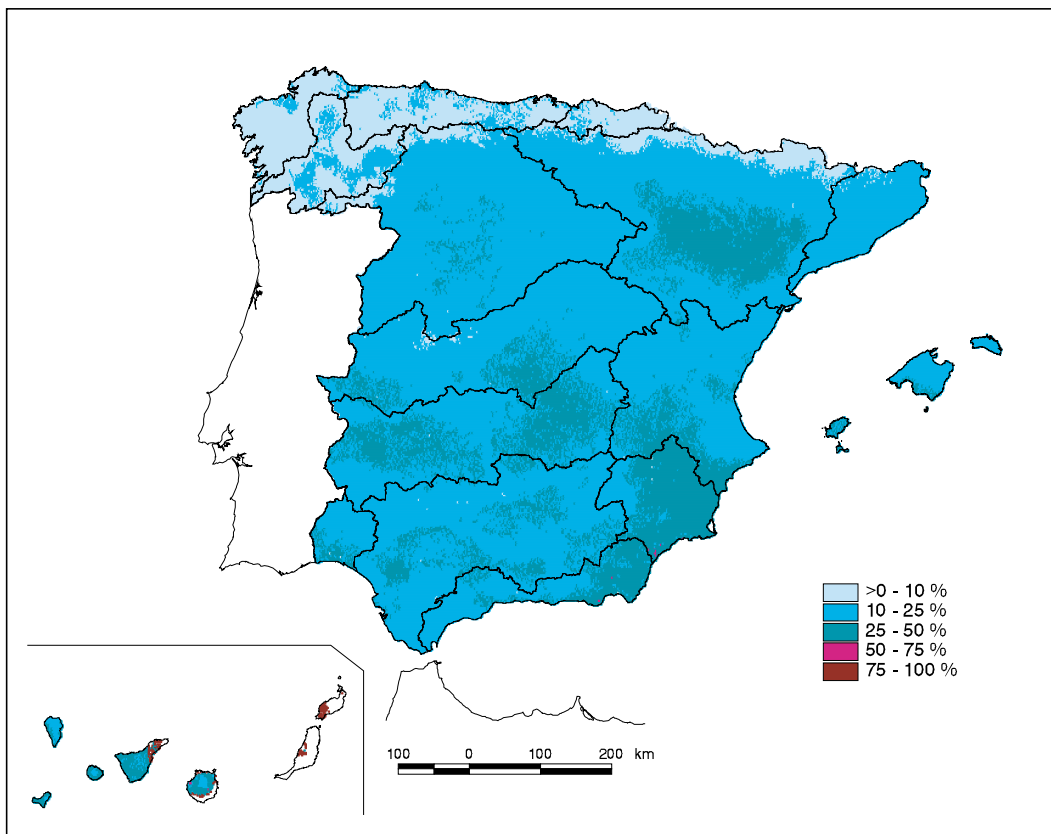


Figura 170. Mapa de disminución porcentual de la escorrentía para el escenario 2

muestra el gráfico de la figura 171. El efecto que esta disminución de los recursos naturales podría tener en los recursos disponibles peninsulares se ha evaluado, de modo global, en torno a un 4% (Garrote et al., 1999).

Dadas las grandes incertidumbres que actualmente conllevan semejantes estimaciones, no parece razonable avanzar más allá -y ya es bastante aventurado- de estas grandes cifras agregadas (como ejemplo, los modelos climáticos suelen considerar a toda España como una región climática única), debiendo considerarse por ahora un ejercicio ilusorio y puramente espe-

culativo descender a mayores detalles o niveles de desagregación espacio-temporal.

En definitiva, y aunque, como se ha dicho, la realidad de este proceso no está aún contrastada científicamente de forma indiscutible, si se desea una estimación prudencial y razonable de los impactos del posible cambio climático antropogénico sobre los recursos hídricos en España, podría admitirse para todo el país, de forma global y genérica, una disminución del 5% en las aportaciones totales en régimen natural al segundo horizonte (o largo plazo) de la planificación hidrológica.

Ámbito	Escenario 1	Escenario 2
Norte I	-3	-10
Norte II	-2	-10
Norte III	-2	-9
Duero	-6	-16
Tajo	-7	-17
Guadiana I	-11	-24
Guadiana II	-8	-19
Guadalquivir	-8	-20
Sur	-7	-18
Segura	-11	-22
Júcar	-9	-20
Ebro	-5	-15
C.I. Cataluña	-5	-15
Galicia Costa	-2	-9
Baleares	-7	-18
Canarias	-10	-25
España	-5	-14

Tabla 42. Porcentaje de disminución de la aportación total, por ámbitos de planificación, para los escenarios climáticos considerados

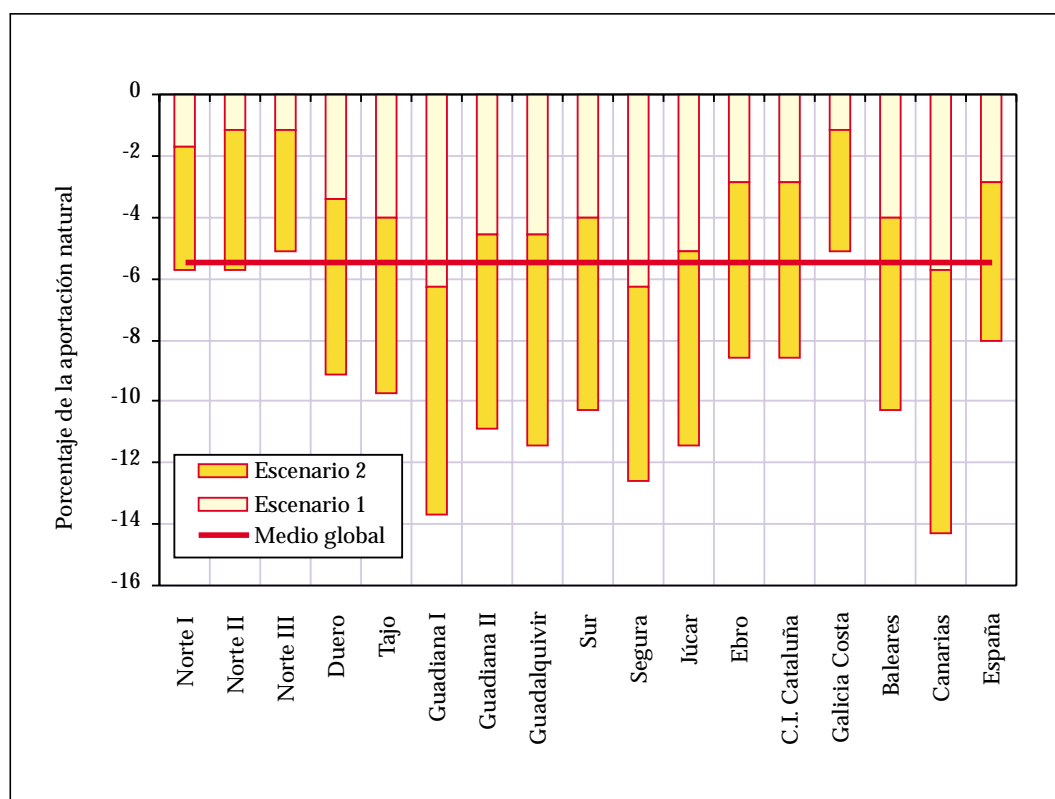


Figura 171. Porcentajes de disminución de la aportación total, para los escenarios climáticos considerados, en el largo plazo de la planificación hidrológica

Junto con esta disminución, parece esperable una mayor variabilidad anual e interanual, que se expresaría por un aumento en el rango de los caudales, y cuya cuantía, hasta el momento, se ignora.

3.1.8.3. Conclusiones

Tanto por razones de la variabilidad natural de los fenómenos hidrológicos, como por la posible incidencia de un cambio climático de origen antropogénico, es dudoso que deba admitirse, como supuesto de diseño desde el punto de vista de la planificación y gestión del agua, que el registro hidrológico del futuro será igual al del pasado, o dicho de otra forma, que los flujos hidrológicos deban ser considerados estacionarios en el largo plazo.

La incertidumbre intrínseca de nuestra actual estimación de valores medios de aportaciones naturales en España (error estándar de la media), debida a la longitud de las muestras disponibles, oscila entre un 3 y un 12%, según el ámbito de planificación considerado, y con un valor medio para todo el país próximo al 5%. Además, aún en ausencia de cambio climático de origen antrópico, el clima europeo muestra variaciones multi-decadales, con diferencias apreciables entre

tales periodos, aunque el análisis estadístico de esta variabilidad, en las muestras disponibles, no permita concluir la hipótesis de no estacionariedad de las series hidroclimáticas. En el caso español, hay indicios para suponer que el periodo de referencia empleado en la planificación hidrológica de cuenca puede ser ligeramente más húmedo que el periodo hidrometeorológico instrumental, aunque esto no pasa de ser una mera hipótesis, no confirmada estadísticamente.

Visto en este contexto, el posible cambio climático aparece como un elemento más de incertidumbre añadida, que puede quedar embebido dentro de esta variabilidad natural, o discernirse de ella en un futuro más o menos lejano.

En definitiva, y como resultante de todas estas circunstancias superpuestas, parece oportuno reconsiderar la forma en que los recursos hídricos son evaluados en el largo plazo desde el punto de vista de la planificación hidrológica. Acaso una prudencial reducción de sus valores esperados (p.e. en torno al 5% en el segundo horizonte de la planificación), junto con un cierto aumento de su irregularidad estacional (incremento del rango de caudales), sea una buena práctica preventiva en tanto en cuanto avanza nuestro conocimiento del fenómeno.