

Figura 60. Relación entre aportación real y aportación natural para diferentes ríos españoles

Como se ha indicado, esta relación no es sino un primer indicador de la afección, pero en modo alguno la describe enteramente. Piénsese, por ejemplo, que puede haber modificaciones sustanciales del régimen de circulación de las aguas en la cuenca que no impliquen consumos apreciables (como producción hidroeléctrica o industrias con alto retorno) y, por tanto, no se reflejen en el ratio ofrecido. Además, y sobre todo, pueden producirse modificaciones muy importantes en las condiciones de calidad de las aguas que serían

invisibles para este ratio. En la práctica, no obstante, es frecuente que ambas condiciones vayan asociadas, y lugares con niveles de utilización más intensos presenten también los mayores niveles de degradación.

Por otra parte, desde el punto de vista del régimen temporal de flujos, la afección mas importante es sin duda la inducida por los embalses de regulación, cuyo objetivo es precisamente ése, la modificación del régimen de caudales naturales para su adaptación a los requerimientos humanos.

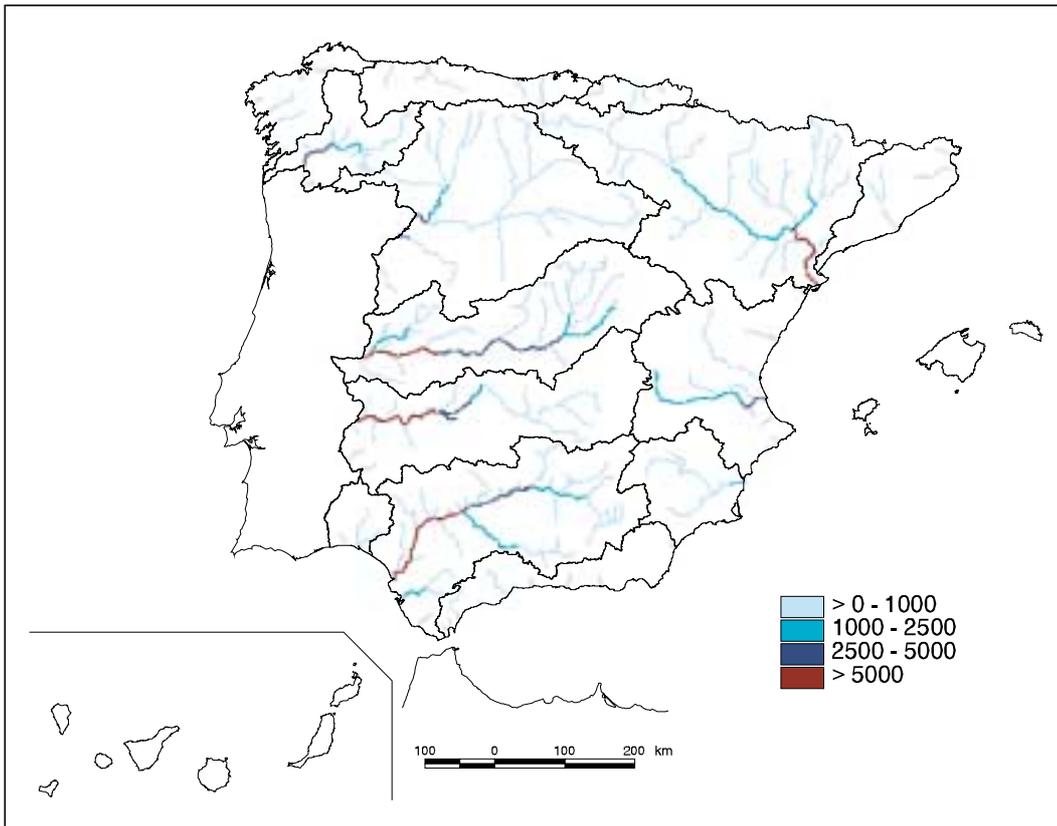


Figura 61. Mapa de volúmenes de embalse aguas arriba (hm³)

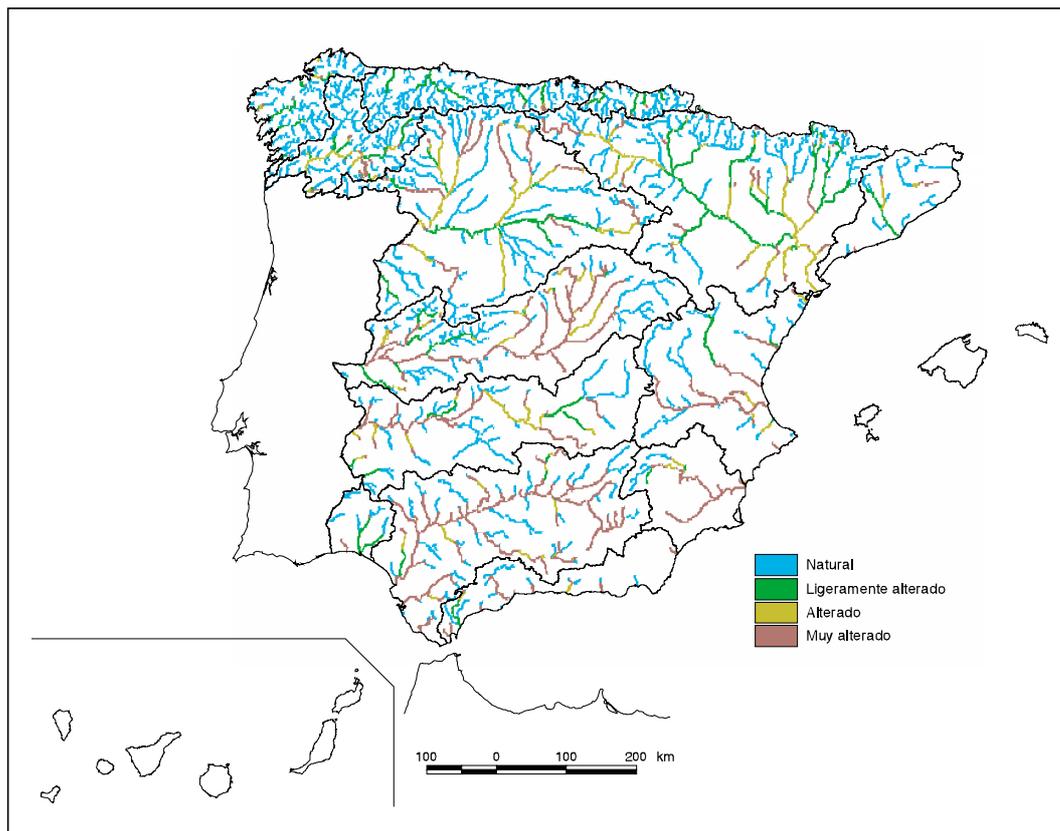


Figura 62. Mapa de máxima alteración potencial actual del régimen natural por efecto de la regulación existente

Bajo esta perspectiva, el grado de alteración producido en un punto de un río será básicamente función del volumen de embalse existente aguas arriba del punto, de la magnitud relativa de ese embalse con respecto a las aportaciones circulantes, y del régimen de explotación de estos embalses aguas arriba.

El régimen de explotación podría ser tal que se reprodujese la circulación natural, con lo que la alteración sería nula. En el extremo contrario, la máxima perturbación sería la correspondiente a la movilización de todo el volumen de embalse aguas arriba. Para acotar este efecto extremo, y tener una primera idea cuantitativa de lo que puede suponer en nuestro país la alteración del régimen de caudales, como consecuencia de la regulación, se ha elaborado un mapa de volúmenes de embalse aguas arriba de cada punto de la red fluvial, tal y como se muestra en la figura 61.

Como se observa, los mayores volúmenes llegan a superar los 5.000 hm³, y se encuentran obviamente en los cursos bajos de los grandes ríos (Guadalquivir, Ebro, Tajo, Duero y Gadiana). Por contra, existen algunas cuencas donde apenas se alcanzan los 1.000 hm³ (Norte, Sur, C.I. de Cataluña, Galicia Costa y Segura).

Si se divide el mapa de aportación natural circulante por este mapa de volumen de embalse aguas arriba, se obtiene el interesante nuevo mapa de máxima alteración potencial del régimen mostrado en la figura 62.

Como puede verse, las alteraciones potenciales por efecto de la regulación presentan un aspecto muy diferente al del embalse aguas arriba. Cuencas con muy alta capacidad absoluta de almacenamiento, como el Ebro, presentan regímenes en general poco alterados debido a su gran aportación natural, mientras que otras también con grandes aportaciones presentan posibilidades de alteración mucho mayor (Tajo o Guadalquivir), debidas a su mayor disponibilidad de embalses.

Además, debe recordarse que nos estamos refiriendo a alteraciones máximas potenciales, y las reales pueden ser notablemente inferiores a estas. Piénsese, por ejemplo, en el caso frecuente de un embalse hidroeléctrico de muy alta capacidad, pero con poca carrera de explotación. La alteración potencial aguas abajo podría ser muy alta, pero la realmente producida puede ser muy pequeña.

3.1.2.2.2. La restitución al régimen natural

La restitución de los caudales de los ríos y drenajes de acuíferos consiste en estimar su régimen natural -que es el que define los recursos existentes- a partir del régimen alterado, que es el que puede observarse y medirse. Para estimar ese régimen natural es preciso conocer las detracciones de agua de los ríos y acuíferos, los retornos al río, la gestión de los embalses, así como las evaporaciones y filtraciones que en ellos

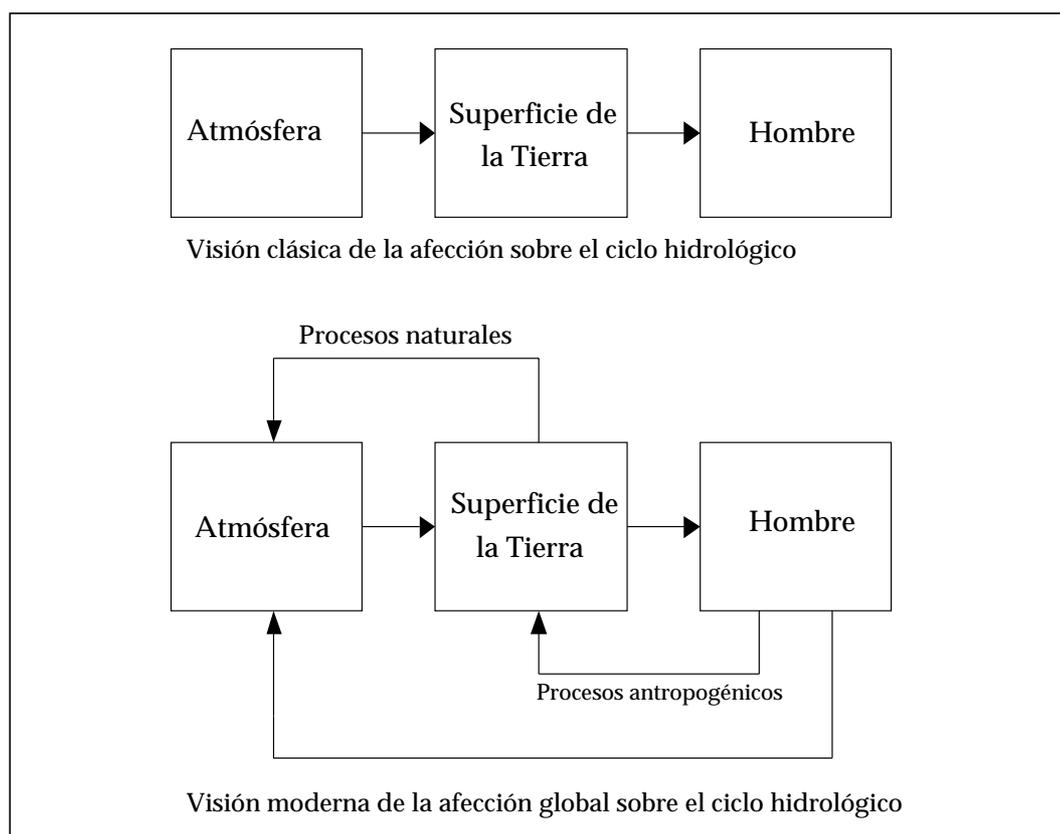


Figura 63. Distintas perspectivas de los efectos antrópicos sobre el ciclo hidrológico

puedan producirse, las transferencias artificiales entre cuencas, etc. En suma, se necesita disponer de información sobre la evolución en el tiempo de todas las intervenciones humanas significativas que se han producido en la cuenca.

En general, en nuestro país no se conocen de forma satisfactoria los usos y derivaciones del agua. Lógicamente, este conocimiento es mayor en aquellas zonas donde la escasez ha exigido mayores controles e intervenciones públicas para la distribución de las aguas, pero, en todo caso, y de forma general, resulta imprescindible promover avances fundamentales en esta dirección, que solo pueden venir de la intensificación y potenciación de las redes de medida, aspecto fundamental que ya avanzamos, y que trataremos más adelante.

Los retornos del agua derivada, que son aún menos conocidos cuantitativamente, dependen del tipo de uso y de la distancia del punto de utilización a los de toma y retorno. El retorno de agua superficial a los ríos se produce con un desfase respecto a la toma usualmente de horas o días, pero que puede llegar a ser del orden de un mes. Si el retorno se produce a través de los acuíferos, el desfase suele ser mucho mayor, incluso de años. Esto es importante a la hora de interpretar los datos de caudales históricos registrados en las estaciones de aforo de los ríos y, en particular, los de caudales bajos cuando están influidos por derivaciones de riego de cuantía desconocida. Lo mismo sucede cuan-

do se producen bombeos de agua subterránea de cuantía y distribución temporal desconocida en acuíferos aluviales pequeños, que pueden influir de forma rápida en los caudales del río.

En definitiva, el nivel de alteración antrópica es a veces tan intenso y complejo que resulta prácticamente imposible restituir los caudales naturales, con cierta fiabilidad, a partir del imperfecto conocimiento de las afecciones producidas. En estos casos, frecuentes en los cursos bajos de los ríos, puede recurrirse a modelos hidrológicos de lluvia-escorrentía que, razonablemente calibrados, permitan estimar las condiciones naturales de la cuenca. Una adecuada combinación de distintos métodos y aproximaciones, según las circunstancias de cada caso, será la clave del éxito para atacar el problema de forma satisfactoria.

Restituir los caudales naturales históricos y obtener valores de aportaciones en régimen natural es una tarea de la mayor importancia para el conocimiento de los recursos hídricos y para la planificación hidrológica, pudiendo decirse que, en nuestros días, todavía está sujeta a algunas incertidumbres relativamente importantes, que no pueden ignorarse por esta planificación.

3.1.2.2.3. La afección antrópica a escala global

Además de previamente descritas afecciones antrópicas clásicas, a la escala local de las cuencas hidrográ-

ficas, recientemente ha emergido la consideración de otro tipo de afección antrópica sobre el ciclo hidrológico, que es la debida a los impactos humanos a escalas globales, continentales o planetarias.

Las alteraciones térmicas y emisiones de gases debidas a las concentraciones humanas y megalópolis en latitudes templadas, o la tala masiva y deforestación de los trópicos, son fenómenos planetarios conmensurables con los del intercambio de humedad de la circulación general atmosférica. El efecto de realimentación del estado de superficie, cada vez más influenciado de forma antrópica, sobre los procesos atmosféricos y el ciclo hidrológico a escala global, comienza a ser una realidad cuyas consecuencias no son aún suficientemente conocidas (NRC, 1991. pp.43-45). La figura 63 ilustra esquemáticamente estas perspectivas.

En definitiva, una moderna concepción del ciclo hidrológico ha de tener presente que, además de las afecciones clásicas a la escala de las cuencas fluviales, la actividad humana a la escala planetaria ha llegado a ser una parte significativa de este ciclo global, produciéndose complejos fenómenos de retroalimentación, aún no bien caracterizados desde el punto de vista científico.

3.1.2.3. La contabilidad del agua

Una vez contemplados los aspectos básicos del ciclo hidrológico tanto en régimen natural como afectado, procede comentar la existencia de metodologías para llevar a cabo la contabilidad formal de los procesos descritos.

Estas metodologías de cuentas del agua en su vertiente cuantitativa presentan gran interés como procedimiento de organización compacta, metódica y estructurada de los flujos y almacenamientos, y aunque se limitan a grandes balances agregados y carecen de la finura de los modelos detallados de simulación de sistemas hidráulicos, pueden emplearse como expresión sintética y estructurada de las salidas de estos modelos, y como instrumento de homogeneización formal con vistas a una posible contabilidad de los recursos naturales.

Los primeros antecedentes de esta aproximación se deben a los trabajos sobre las cuentas del agua desarrollados por Margat en los años 70, y han sido aplicados en España de forma experimental en la cuenca del Segura en 1984, y sistemáticamente en todo el territorio nacional (MOPTMA, 1996b).

El desarrollo de un sistema de información estadística construido con tablas contables proporcionaría una base sólida de datos para el seguimiento y evaluación de las actuaciones políticas sobre la gestión, uso y ahorro de agua en España, y permitiría análisis homogéneos y comparaciones internacionales.

Este sistema estadístico podría basarse en las denominadas cuentas satélite del agua que está desarrollando EUROSTAT con la colaboración de algunos estados miembros. El INE español está participado en estos desarrollos.

3.1.3. El reconocimiento de los recursos. Redes de medida

El conocimiento descriptivo de los procesos intervinientes en el ciclo hidrológico, tal y como ya se ha descrito, no es suficiente, ya que las necesidades de la sociedad actual obligan, cada vez más y con mejor detalle, a conocer su magnitud de una forma también cuantitativa. Para ello es necesario medir los flujos y almacenamientos de agua mediante redes de medida.

Así, las redes de medida son el elemento básico para la cuantificación de los recursos hídricos, y tienen como objetivo fundamental suministrar información sobre el estado y evolución de las aguas superficiales y subterráneas.

Existe un gran número de redes, de muy distinta naturaleza, objetivos y tipología. De forma esquemática, puede afirmarse que las que afectan a la cuantificación de los recursos hídricos son:

1. Las meteorológicas, dado que tanto la precipitación como otras variables meteorológicas intervinen en el proceso de generación de escorrentía
2. Las de aguas superficiales, que miden los flujos y almacenamientos en superficie, y
3. Las de aguas subterráneas, que proporcionan información básicamente sobre niveles piezométricos en los acuíferos y caudales en los manantiales.

A ellas nos referiremos en los epígrafes que siguen.

3.1.3.1. Situación de las redes de control

3.1.3.1.1. Redes meteorológicas

Aunque existen observaciones meteorológicas puntuales desde tiempos muy remotos, es por Perrault en Francia y en el siglo XVII, entre 1668 y 1674, cuando se realizan por vez primera mediciones sistemáticas de lluvias a lo largo de todo un año, en el contexto de los primeros estudios cuantitativos sobre el ciclo hidrológico. Desde finales del XVII se extiende por los países de occidente la medición de las precipitaciones, y comienza a medirse la tasa de evaporación (Solís, 1990, p.173).

En España, los primeros intentos realizados para disponer de datos meteorológicos son muy antiguos,

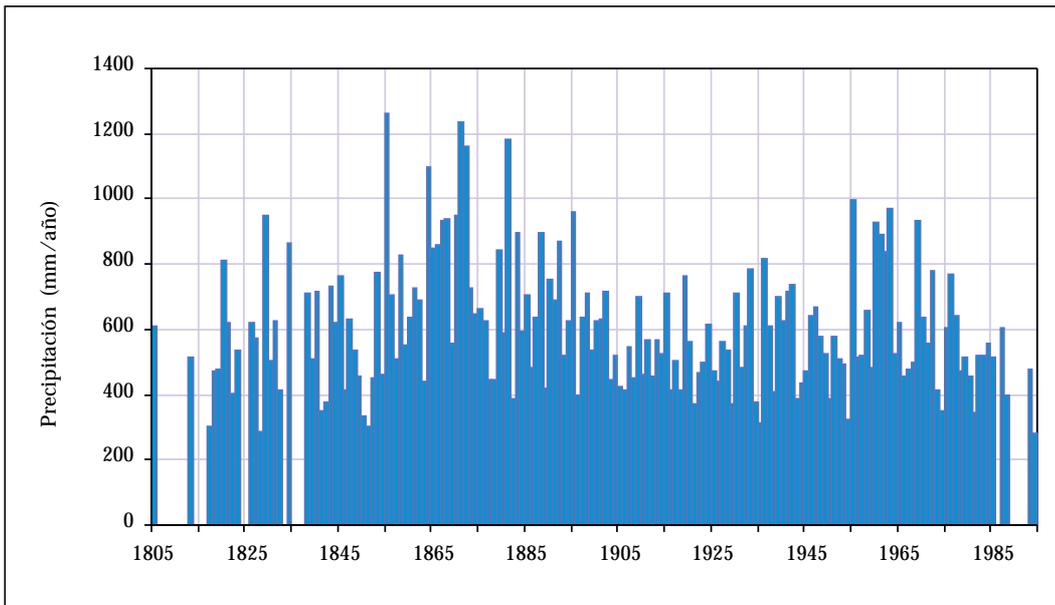


Figura 64. Serie de precipitaciones anuales en San Fernando (Cádiz) desde 1805

existiendo constancia de observaciones realizadas con fines médicos desde las Efemérides de Navarrete, en 1737. De finales del XVIII son las pioneras observaciones de Salvá en Barcelona, Alonso Salanova en Madrid, Sánchez Buitrago en Cádiz, o Bals y Cardona en Mahón (Barriendos et al. [1997] pp.47-62).

Ya a finales del siglo XVIII se iniciaron propiamente las observaciones meteorológicas, y los primeros datos que se conservan son los del Observatorio de San Fernando en Cádiz, desde 1805, y los del Observatorio de Madrid, desde 1841. La serie de San Fernando, la más antigua de todas las españolas, es la ofrecida en el gráfico adjunto, elaborado con datos de INM (1996) (fig. 64).

Además de los Observatorios oficiales, existieron curiosas iniciativas singulares como la del párroco

mosén Bodí, que recogió la relación detallada de las tormentas acaecidas en Carcagente entre 1837 y 1876, con datos concretos de las lluvias caídas en cada temporal y sus vientos dominantes, o la recopilación de Rico Sinobas, con datos del primer tercio del siglo.

Un primer impulso al desarrollo de la red oficial se produce en 1860, año en que Isabel II promulgó un Real Decreto por el que se encomendaba a la Junta General de Estadística del Reino la creación de 22 estaciones meteorológicas, lo que produjo un aumento espectacular del número de puntos de observación, tal y como se muestra en la figura 65 -elaborada con datos del Instituto Nacional de Meteorología-, de evolución del número de estaciones a lo largo del siglo XIX. Tal y como puede observarse, a finales de este siglo la red estaba compuesta por unas 40 estaciones meteorológicas.

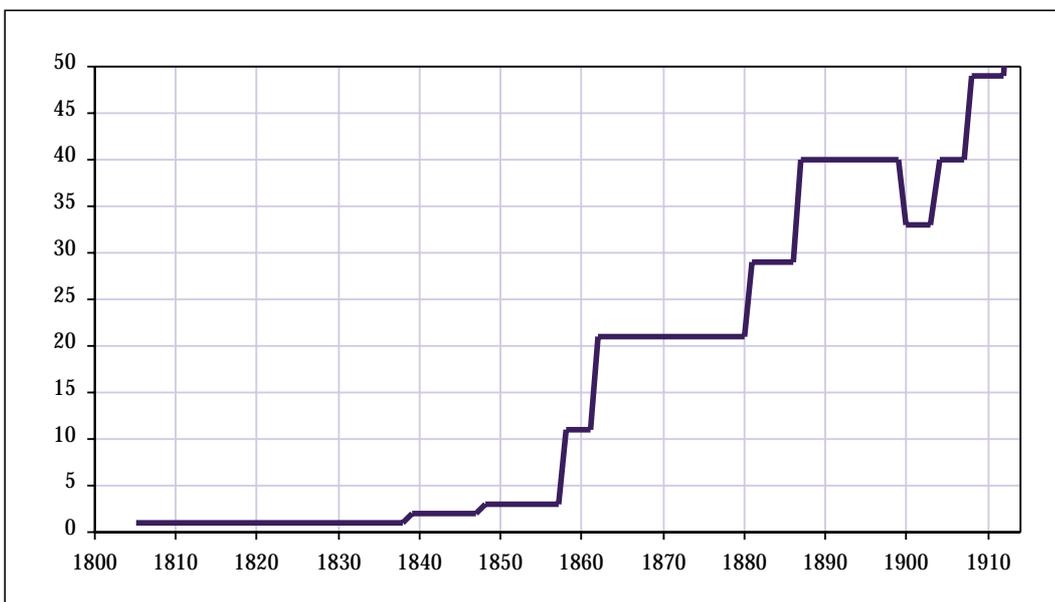


Figura 65. Evolución del número de estaciones meteorológicas en España durante el siglo XIX

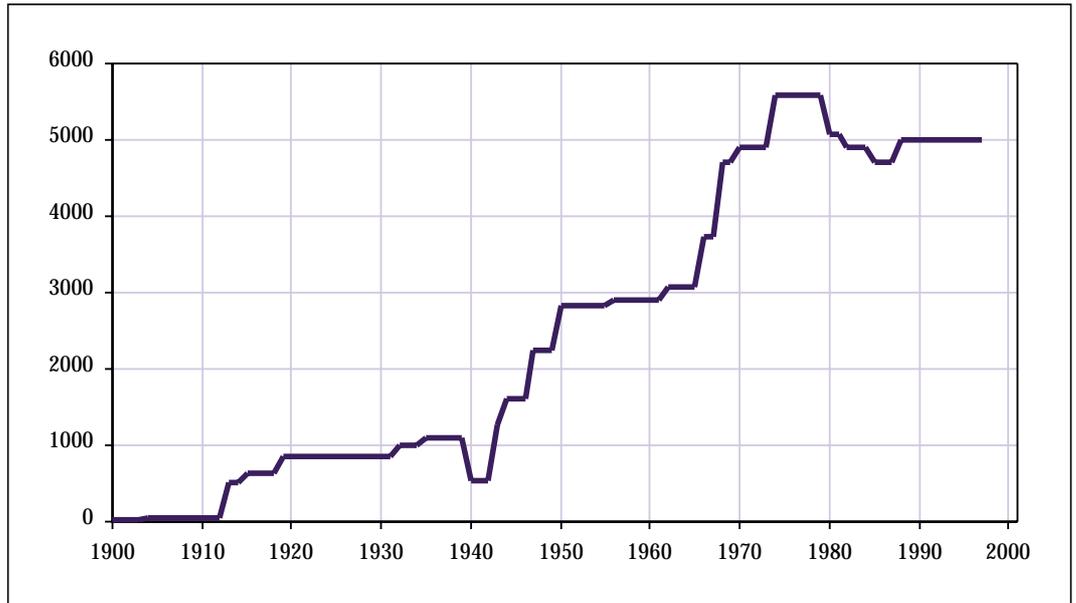


Figura 66. Evolución del número de estaciones meteorológicas en España durante el siglo XX

Durante el presente siglo el crecimiento de la red ha sido desigual, y aunque en la segunda década (arrancando en 1912-1913) se produce el despegue inicial, con un aumento muy importante de estaciones alcanzando un número próximo a mil, puede afirmarse que es a partir del año 1940 cuando se empieza a disponer masivamente de series ininterrumpidas, o al menos con pocas lagunas. Esta es la razón principal por la que, con frecuencia, los datos de estudios hidroclimáticos en nuestro país arranquen en esas fechas.

Como se aprecia en el gráfico adjunto, elaborado con datos del INM, este crecimiento alcanza un máximo a finales de los años 70, para mantenerse o incluso decrecer hasta la actualidad, en que existe un número aproximado de 5.000 estaciones meteorológicas en servicio (fig. 66).

En la actualidad, el Ministerio de Medio Ambiente es el responsable, a través del Instituto Nacional de Meteorología, de la adquisición, gestión y difusión de los datos meteorológicos.

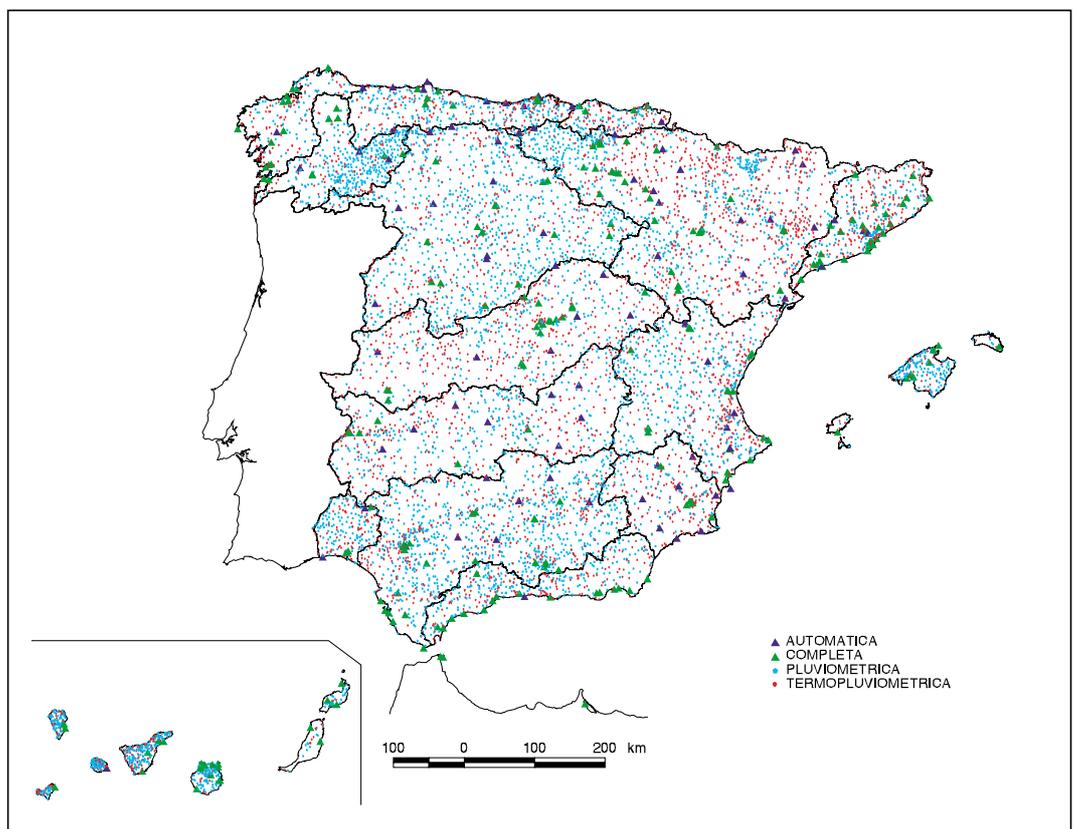


Figura 67. Mapa de la Red de estaciones meteorológicas con registros históricos del INM

Ámbito	Pluviométricas	Termopluviométricas	Completas	Automáticas	Totales
Norte I	326	74	8	3	411
Norte II	241	169	8	12	430
Norte III	74	88	3	2	167
Duero	757	355	15	10	1.137
Tajo	257	355	18	6	636
Guadiana I	344	298	6	8	656
Guadiana II	124	74	3	2	203
Guadalquivir	782	382	23	7	1.194
Sur	215	147	14	1	377
Segura	110	182	6	8	306
Júcar	447	318	18	5	788
Ebro	663	748	34	14	1.459
Galicia Costa	82	97	10	1	190
C.I. Cataluña	170	242	30	4	446
Baleares	130	38	7	0	173
Canarias	435	164	23	0	622
Total	5.157	3.731	226	83	9.197

Tabla 3. Número y distribución por ámbitos de planificación de las estaciones meteorológicas con registros históricos

La red de ámbito nacional, mostrada en la figura 67 y descrita por ámbitos de planificación en la tabla 3, consta de aproximadamente 9.200 estaciones en las que se dispone de registros históricos, de las cuales unas 5.200 miden sólo precipitaciones (P); 3.700 miden precipitaciones y temperaturas (TP); 200 son estaciones completas (C), que registran datos de precipitación, temperatura, humedad atmosférica, insolación, velocidad del viento, etc.; y 80 son automáticas. Este último tipo de estaciones son muy recientes. Registran los mismos tipos de datos que las completas y su principal rasgo característico es que transmiten la información automáticamente a través de la red telefónica.

Los datos registrados históricamente en todas las estaciones meteorológicas se almacenan en la base de datos climatológicos del INM, tal y como se describe en el correspondiente epígrafe.

De las casi 9.200 estaciones meteorológicas reflejadas en la tabla anterior se encuentran actualmente en servicio unas 5.080, de las cuales 2.520 son pluviométricas, 2320 son termopluviométricas, 160 son completas y 80 son automáticas. El reparto por cuencas hidrográficas se muestra en la tabla 4, elaborada con datos del INM.

Las estaciones pluviométricas y termopluviométricas registran datos diarios, de gran valor para la estimación de los recursos, pero insuficientes para los estudios de crecidas, que requieren información en periodos de tiempo menores. Los datos de intensidades horarias, e incluso minutales, sólo se registran en las estaciones completas y automáticas, cuyo número es muy escaso para el conjunto del territorio nacional. Este hecho hace que, como se verá mas adelante, la información captada por los sensores pluviométricos de la red SAIH (Sistema Automático de Información

Cuenca	Pluviométricas	Termopluviométricas	Completas	Automáticas	Totales
Norte	213	268	23	18	522
Duero	339	215	12	10	576
Tajo	105	177	15	6	303
Guadiana	153	206	6	10	375
Guadalquivir	385	198	13	7	603
Sur	166	54	14	1	235
Segura	70	156	5	8	239
Júcar	180	193	15	5	393
Ebro	214	498	16	14	742
C.I. Cataluña	70	132	15	4	221
Baleares	134	43	7	0	184
Canarias	485	183	18	0	686
Total	2.514	2.323	159	83	5.079

Tabla 4. Número y distribución de las estaciones meteorológicas actualmente en servicio

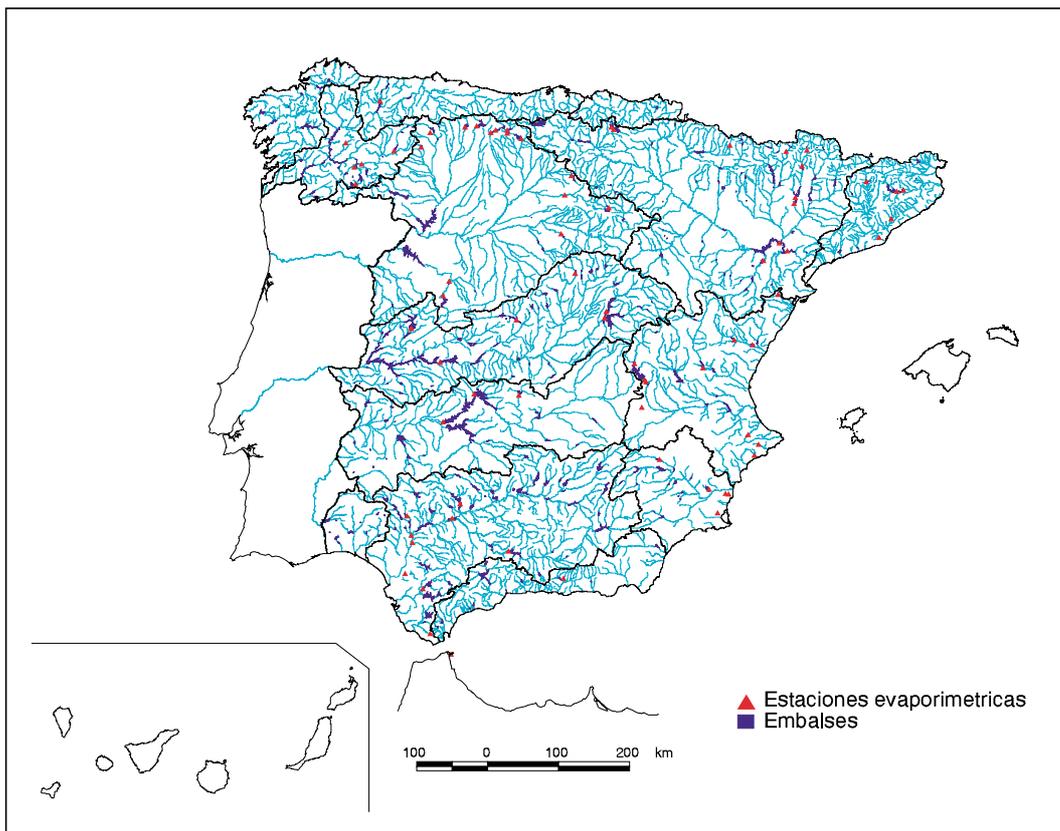


Figura 68. Mapa de la Red de estaciones evaporimétricas en embalses

Hidrológica) tenga un especial interés para las crecidas, y como complemento de las estaciones completas y automáticas del INM.

Otra red meteorológica de ámbito nacional es la red de estaciones evaporimétricas en embalses, que históricamente ha desarrollado y mantenido la Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas (DGOHCA). Además de registrar información sobre diferentes variables meteorológicas, mide datos de evaporación en tanque o en Piché. Aunque con anterioridad tuvo mayor número de estaciones, la red consta en la actualidad de los 75 puntos mostrados en la figura 68, cuyos datos mensuales son incluidos en los Anuarios de Aforo que regularmente publica la DGOHCA.

Además de las mencionadas, existen otras redes meteorológicas, de menor ámbito, que son gestionadas por los propios Organismos de cuenca u otros Organismos de la Administración Central o Autónoma, y que sirven para propósitos específicos y de complemento a la red nacional.

También existe un programa, denominado ERHIN (Estudio de los Recursos Hídricos procedentes de la Innivación), que se inició en la cordillera pirenaica, y cuya finalidad es la de cuantificar la contribución de la fusión de la nieve en los recursos hídricos de distintas cuencas (MOPU [1988]; MOPT [1992b]).

El variado número de redes existentes y el diferente alcance de las mismas, pone de manifiesto el proble-

ma de la dispersión y la necesidad de coordinación que debe existir entre todas las Administraciones y Organismos implicados.

3.1.3.1.2. Redes de aguas superficiales

El concepto de caudal de un río era conocido desde antiguo, pero su determinación en los cauces planteó en la práctica muchos problemas, no siendo hasta el siglo XIX cuando se conocen y dominan las técnicas necesarias para tal estimación. Así como la lluvia comenzó a registrarse en Europa a finales del XVII, la medición de caudales no se desarrolla hasta los siglos XIX y XX.

Aunque se conocen datos puntuales de caudales en algunos ríos españoles desde antes, es en el último tercio del XIX cuando comienza a disponerse de series continuas, como muestra la figura 69 de aportaciones anuales del Guadalentín en la presa de Puentes, y que es -como la de San Fernando para las lluvias- la serie de aforos diarios conocida más larga de España. Lo usual es que, como se ha dicho, a lo largo del XIX no se disponga más que de datos puntuales de aforo muy dispersos espacial y temporalmente (v. Bentabol, 1900), no existiendo registros sistemáticos -aunque en un número reducido de estaciones- hasta comienzos del presente siglo.

La primera normativa oficial sobre redes de medida de caudales data de 1941, cuando el entonces Ministerio

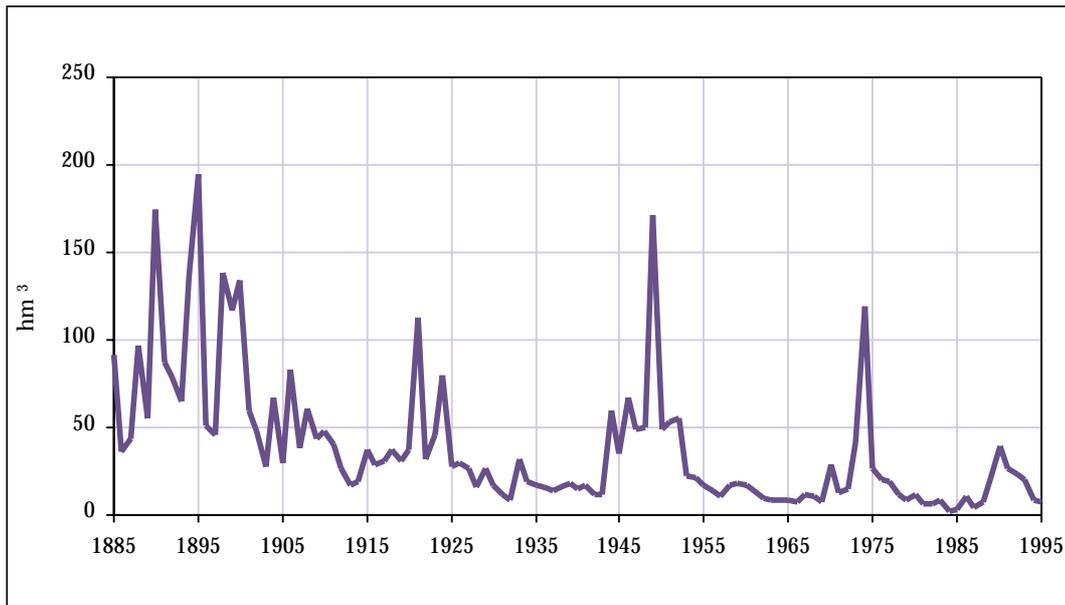


Figura 69. Serie de aportaciones anuales del río Guadalentín en la presa de Puentes desde 1885

de Obras Públicas aprobó una Orden Ministerial para conocer los caudales utilizados por los concesionarios de los aprovechamientos de aguas públicas.

Esta Orden Ministerial tuvo un cumplimiento parcial y tardío por lo que en 1963, la entonces Dirección General de Obras Hidráulicas (DGOH), ante la constatación de que las estaciones no funcionaban de la forma deseable, aprobó un Plan General de Mejora y Ampliación de Estaciones de Aforo, que condujo al establecimiento de la Red Oficial de Estaciones de Aforo (ROEA). Este importante Plan se desarrolló entre 1963 y 1972 y dio lugar, tal y como se observa en la figura 70, a un crecimiento muy importante del número de estaciones de aforo en los ríos, que alcanzó un máximo a principios de los ochenta, para luego decrecer ligeramente hasta la actualidad.

En la organización actual, los Organismos de cuenca tienen a su cargo la operación y mantenimiento de estas redes de medida, mientras que el Organismo responsable del archivo general y la difusión de los datos es el Ministerio de Medio Ambiente, a través de la DGOH-CA. En las Cuencas Internas de Cataluña, Galicia Costa, Baleares y Canarias, los Organismos responsables dependen de sus respectivos Gobiernos autónomos.

La ROEA proporciona información de los datos de niveles y caudales en puntos seleccionados de los ríos y en los principales embalses y canales. Consta de unas 1.200 estaciones de aforo en los ríos (de las cuales se encuentran en servicio unas 730), unos 300 puntos de control en embalses mayores de 10 hm³, y unos 180 puntos de control en canales, tal y como muestran la figura 71 y la tabla 5, elaboradas con

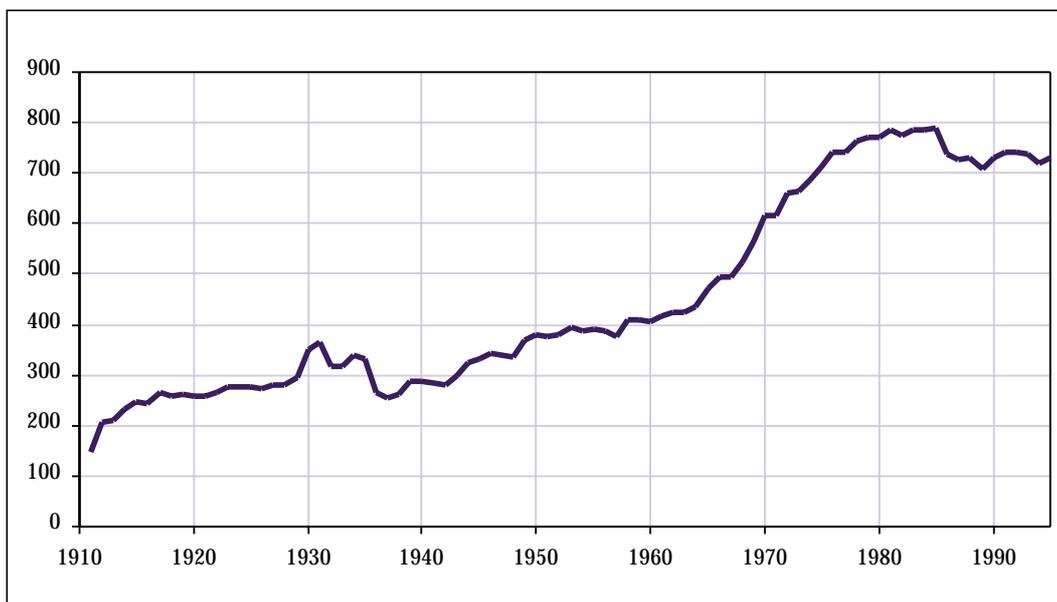


Figura 70. Evolución desde 1910 del número de estaciones de aforo en los ríos

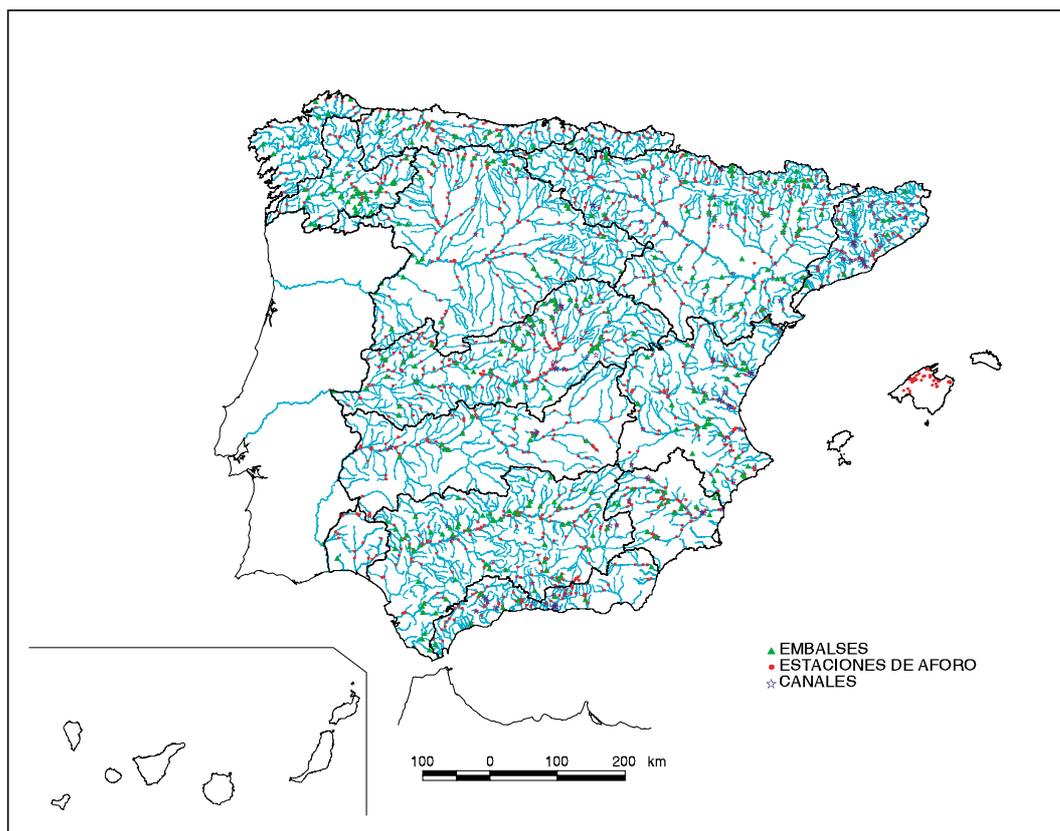


Figura 71. Mapa de la Red de medida de aguas superficiales

información de las Confederaciones Hidrográficas y otros Organismos.

La mayor parte de los datos de estas estaciones se almacena en la base de datos HIDRO diseñada y mantenida por el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX (Quintas, 1996), Organismo que tiene encargo de la DGOHCA de archivar y publicar periódicamente esa información. El dato se almacena y publica a escala diaria, aunque muchas de las estaciones de la red pueden registrar datos de forma prácticamente continua.

Las estaciones que forman parte de la ROEA tienen, en general, instalaciones de carácter permanente, y podrían complementarse con estaciones que funcionasen durante periodos cortos, por ejemplo durante las fases de estudio y proyecto de una obra hidráulica, y que después se abandonarían. Esto debería hacerse en cualquier caso de forma muy selectiva y programada.

Existen otro tipo de redes, como los Sistemas Automáticos de Información Hidrológica (SAIH), promovidos por la DGOHCA, e implantados en fase de implantación en los Organismos de cuenca. Los SAIH son una herramienta de gran interés proporciona un conocimiento de la situación hidrometeorológica e hidrológica de cuencas en tiempo real, y permite, con los adecuados modelos, hacer predicciones de ciertas variables a corto plazo (MOPTMA-CHE [1995]; Aldana et al. [1996]).

En la actualidad, la red SAIH cubre sólo parcialmente el territorio español, aunque se prevé a corto plazo su extensión a todas las cuencas peninsulares, y proporciona, entre otros, datos en tiempo real - a escala de pocos minutos - sobre niveles y caudales en ríos y canales, reservas y salidas de los embalses, precipitaciones, etc. En la actualidad, están funcionando total o parcialmente las redes correspondientes a las cuencas hidrográficas del Júcar, Segura, Sur, Ebro, Internas de Cataluña y Guadalquivir, tal y como se muestra en la figura adjunta, y se encuentran en distintas fases de desarrollo las del Tajo, Gadiana, Norte y Duero. Los datos oficiales más antiguos registrados por esta red son de 1988 y corresponden a la cuenca del Júcar, que fue la primera en la que se instaló el sistema (Pedrero, 1996).

Los datos de intensidades de precipitación y caudales en los ríos que proporcionan los SAIH son de gran interés para el estudio de episodios de tormenta, y deben servir de complemento a los datos diarios de la red de estaciones pluviométricas del INM y de la red oficial de estaciones de aforo en los ríos de la DGOHCA (fig. 72).

Aunque las redes anteriores hayan tenido en su origen una finalidad diferente - la ROEA es una red de propósito general de alcance nacional y el SAIH nació como una red específica en tiempo real orientada a las crecidas - en la actualidad sus objetivos y alcances tienden a ser convergentes y concebirse no específicamente para crecidas o explotación, sino como instru-