

Figura 87. Rachas de la precipitación media anual por regiones pluviométricas en el periodo 1940/41-1995/96, a partir de las desviaciones unitarias acumuladas

correlación de las precipitaciones anuales, para el periodo 1940/41-1995/96, en los distintos ámbitos. De forma compacta, y puesto que esta matriz es simétrica, en la mitad inferior y diagonal se muestran los coeficientes de correlación, y en la superior una estimación de las probabilidades asociadas a estos coeficientes (1 implica no correlación y 0 implica correlación significativa).

La observación de esta tabla permite obtener la interesante conclusión de que existen correlaciones significativas entre grupos de ámbitos, pero no de todos entre sí. Ello significa que existen en España áreas con regímenes pluviométricos independientes, no dándose sensiblemente las rachas secas y húmedas con simultaneidad en todo el país, lo que viene a subrayar, una vez más, la variedad hídrica del territorio español.

Además, todas las correlaciones son nulas o positivas, y no existe, entre ningún par de ámbitos, ninguna correlación negativa significativa. Ello implica que o no hay simultaneidad o hay una cierta simultaneidad de sequía y abundancia, pero no hay, significativamente, sequía en una zona mientras hay abundancia en otra, y viceversa.

Avanzando aún más en la indagación de la estructura espacio-temporal de las precipitaciones y en la exploración de su comportamiento relativo en los distintos territorios, la observación de correlaciones significativas entre ámbitos sugiere estudiar sus posibles afinidades, reduciéndolos a áreas similares desde el punto de vista de las precipitaciones anuales.

Si se realiza un análisis de agregaciones mediante cluster jerárquico, se obtienen algunos agrupamientos muy persistentes entre ámbitos. Así, Norte II y Norte III aparecen siempre agrupados, del mismo modo que

Júcar y Segura; que Tajo y Duero; y que Guadiana I y Guadalquivir. Considerando globalmente estos cuatro grupos básicos, su proximidad entre ellos, y el resto de agrupamientos obtenidos, puede proponerse tentativamente una regionalización muy robusta de los ámbitos de planificación, desde el punto de vista de las precipitaciones anuales, en siete clases, que serían las ofrecidas en la figura 86.

Una gran zona es la central o atlántica (azul), que puede subdividirse en norte (C\_N: Duero y Tajo) y sur (C\_S: Guadiana, Guadalquivir y Sur); otra zona es la de levante (L: Júcar y Segura); otra sería la noreste (N\_E: Ebro, Baleares y C.I.Cataluña); otra es la norte o cantábrica (N: Norte II y Norte III); otra la noroeste (N\_O: Galicia Costa y Norte I); y, por último, otra sería Canarias (CA).

La organización regional propuesta permite revisar la cuestión que se planteó sobre las rachas pluviométricas húmedas y secas, pero descendiendo ahora al nivel de la región en lugar de a la media global del país, y empleando regiones rigurosamente establecidas.

Así, y como antes se hizo para la media areal global, se han construido las curvas de desviaciones unitarias acumuladas de las precipitaciones regionales, ofrecidas conjuntamente en la figura 87.

Un primer examen de este gráfico muestra que, en efecto, existen en apariencia diferencias regionales que hacen que las secuencias de rachas en las distintas cuencas no resulten ser las mismas. Una inspección más detallada permite diferenciar las situaciones mostradas en la figura 88.

Como se aprecia, la mayoría de las cuencas (Duero, Tajo, Guadiana, Guadalquivir, Sur, Ebro, C.I. de Cataluña, Norte I, Galicia Costa y Baleares) ha segui-

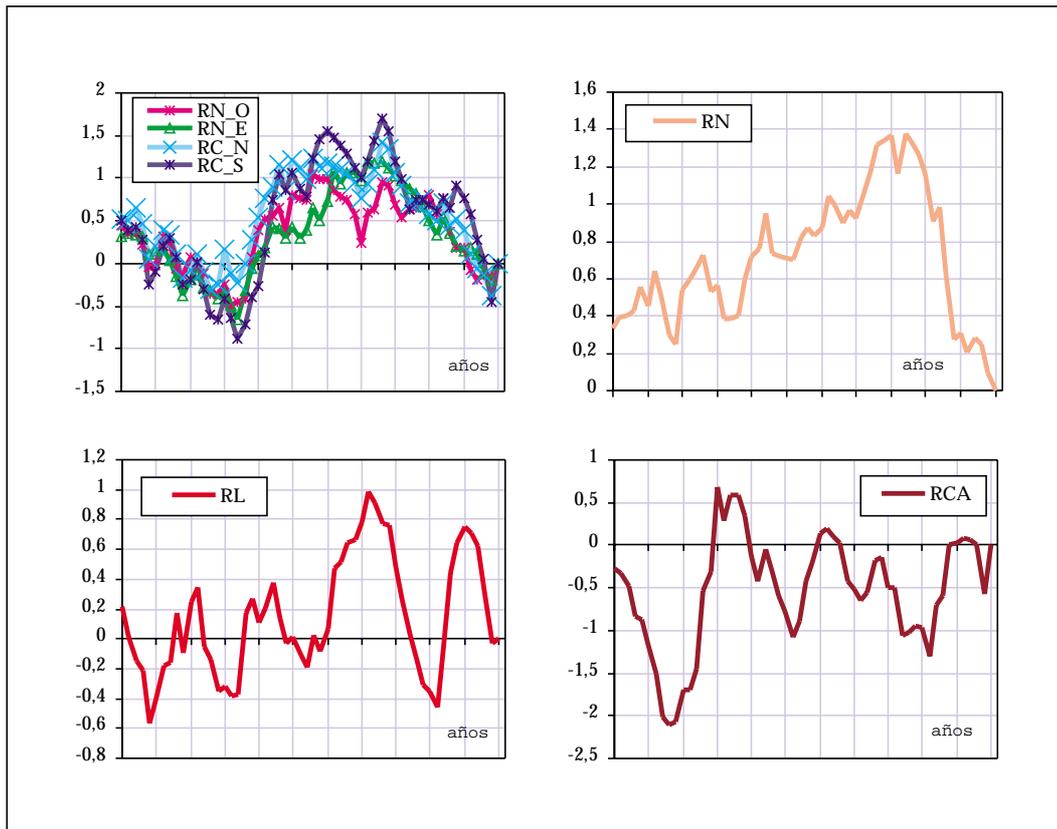


Figura 88. Distintas situaciones de las rachas de la precipitación media anual por regiones pluviométricas en el periodo 1940/41-1995/96, a partir de las desviaciones unitarias acumuladas

do un patrón muy similar, que es, sensiblemente, el que se ofreció antes como representativo de la media global del país, pero hay tres regiones (Levante, Norte y Canarias) que parecen haber seguido patrones diferentes a éste, y diferentes entre sí.

Asimismo, se observa cómo desde finales de los 70 hay una racha seca, más o menos exacerbada, en todas las regiones, y con algún altibajo en el periodo 1985-90, a partir del cual es completamente generalizada. Como se apuntó, ello explica, entre otras razones, la grave crisis de suministro hídrico que se vivió en muchos lugares de España en estos últimos años.

El grado de detalle de todos los análisis anteriores se justifica por un hecho básico, y es que, como ya se ha apuntado, la precipitación es el origen de los recursos hídricos, excita y gobierna la respuesta hidrológica, y su variabilidad es la principal fuente de la irregularidad de los caudales de los ríos. En efecto, la variabilidad pluviométrica se transmite, y de forma más acusada, amplificada, a los datos de escorrentía, tal como se verá más adelante. Regiones de comportamiento pluviométrico similar serán probablemente regiones con comportamiento hidrológico también similar, y rachas pluviométricas húmedas o secas se traducirán, con mayor o menor rezago, en rachas de caudales del idéntico signo.

Por otra parte, si en lugar de datos anuales se emplean datos a escalas más pequeñas (p.e. men-

suales, diarios u horarios), este efecto de irregularidad se ve aún más acentuado.

### 3.1.4.1.2. Evapotranspiración

Como se mostró en el epígrafe anterior, la precipitación (P) media anual en España es de 684 mm, equivalentes a unos 346.000 hm<sup>3</sup>/año, cifra que, como también se vio, está sujeta a una gran variabilidad temporal y espacial.

Por otra parte, la evapotranspiración potencial (ETP) media anual en España, mostrada en la figura 89, es, en el mismo periodo, de 862 mm, presentando sus máximos en la mitad meridional de la península, Canarias, y el valle central del Ebro. Este mapa de ETP se ha obtenido aplicando el método de Thornthwaite y corrigiendo los resultados por unos factores mensuales, regionalizados para todo el territorio, deducidos del contraste de los métodos de Thornthwaite y Penman-Monteith.

La evapotranspiración real (ET), mostrada en la figura adjunta, presenta en el mismo periodo un valor medio global de 464 mm/año, siendo bastante menor que la ETP, al no darse siempre las condiciones óptimas de humedad en el suelo para que se produzca la evapotranspiración a su tasa potencial. Como es lógico, las mayores diferencias relativas se darán en los territorios más secos, y las menores diferencias en los

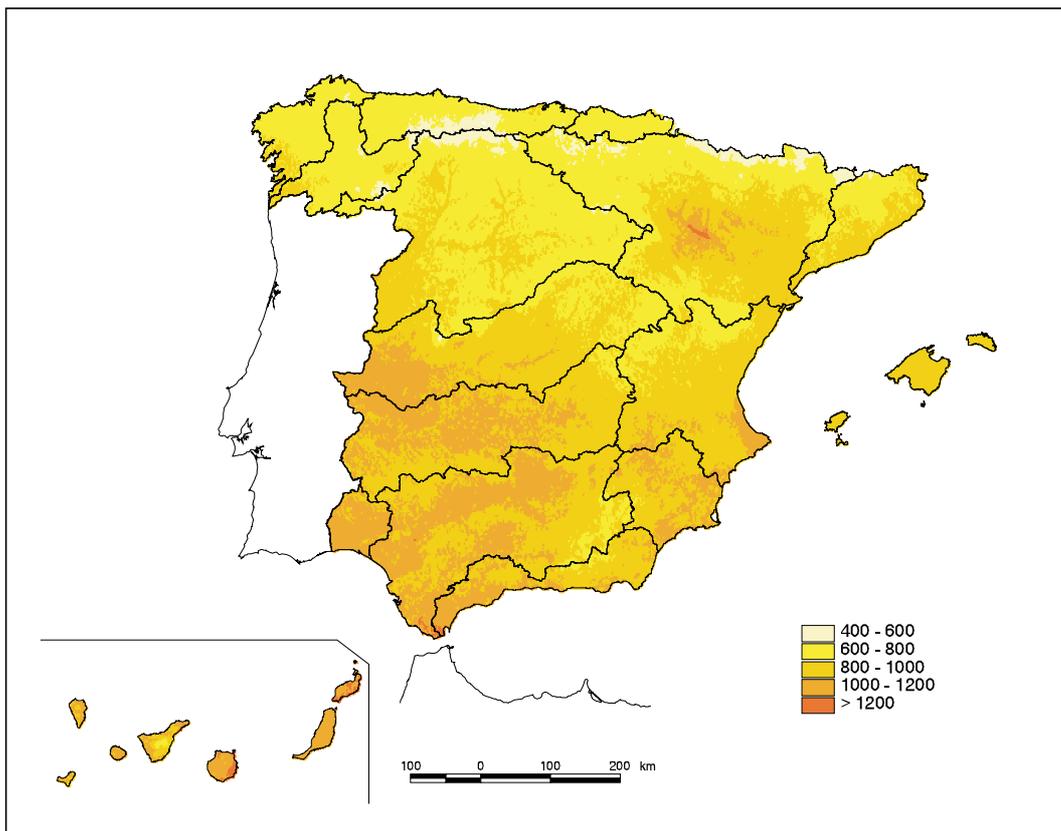


Figura 89. Mapa de evapotranspiración potencial media anual en mm (periodo 1940/41-1995/96)

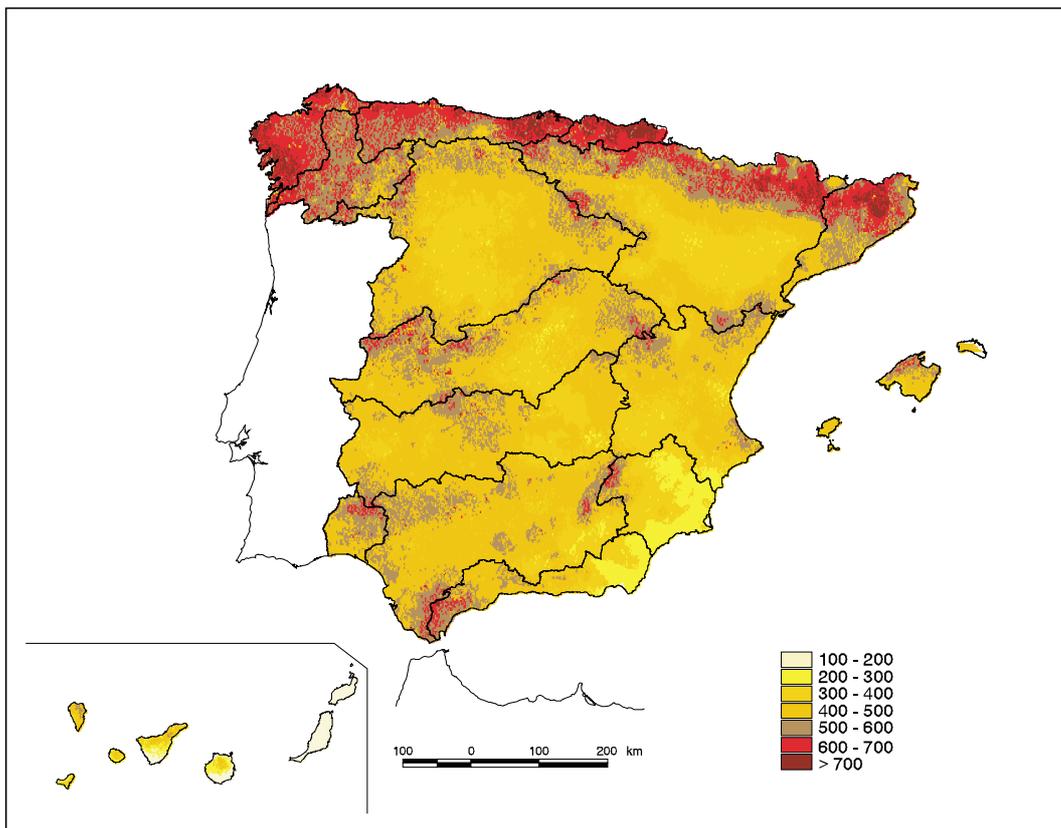


Figura 90. Mapa de evapotranspiración real media anual en mm (periodo 1940/41-1995/96)

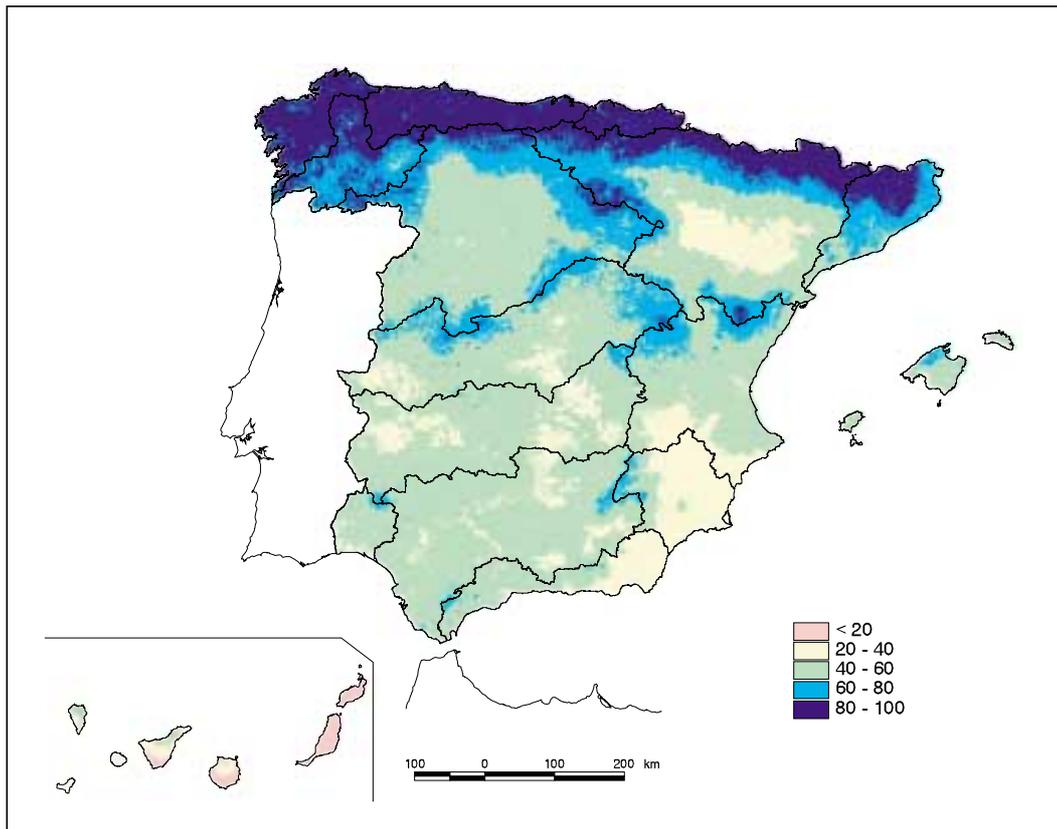


Figura 91. Mapa de la relación ET/ETP (%) (periodo 1940/41-1995/96)

más húmedos. Esa evapotranspiración se ha obtenido mediante el modelo hidrológico distribuido que se describe en apartados siguientes (fig. 90).

La diferencia entre ET y ETP puede verse en el mapa de la figura 91, que muestra la fracción porcentual ET/ETP que, en valor medio para el conjunto del territorio es de 0,54, y que varía desde 0,18 en Canarias a 0,97 en el ámbito del Norte III.

Puede apreciarse el comentado efecto de aumento del cociente con la mayor humedad de la zona.

#### 3.1.4.1.3. Lluvia útil

Recordando el esquema conceptual del ciclo hidrológico y el gráfico de los principales flujos de agua en régimen natural, ofrecidos en anteriores epígrafes, puede verse que si a las precipitaciones se le resta la evapotranspiración, lo que queda es el agua que, bien de forma subterránea o de forma superficial, contribuirá a la escorrentía total y es susceptible, por tanto, de ser utilizada. Esta es la razón por la que a tal diferencia se le denomina lluvia efectiva o lluvia útil.

El concepto de lluvia útil -o diferencia entre precipitación y evapotranspiración real- ha sido ampliamente utilizado en nuestro país en estudios hidrológicos e hidrogeológicos regionales.

El mapa de la figura 92 obtenido restando los dos anteriores (P-ET), muestra la variabilidad espacial de este valor, y ofrece una primera imagen de la mayor o menor abundancia hídrica de los distintos territorios españoles.

Pese a su evidente proximidad, los conceptos de lluvia útil y de escorrentía total no deben ser confundidos.

La diferencia entre ambos se debe a que mientras que el primero de ellos expresa la mera diferencia entre precipitación y evapotranspiración, la escorrentía representa la aportación total por unidad de superficie, y por tanto tiene en cuenta cómo se distribuye la lluvia útil entre almacenamiento en el suelo, escorrentía superficial y recarga al acuífero, y cómo éste descarga, de forma más o menos diferida, a la red de drenaje.

Aunque las diferencias entre los valores asociados a ambos conceptos pueden ser importantes cuando se consideran escalas temporales más detalladas -días, meses o incluso años-, en valores medios interanuales tales diferencias son mucho más pequeñas (ver figuras adjuntas), y se deben únicamente a la redistribución espacial que se produce en la descarga del agua infiltrada al acuífero.

#### 3.1.4.1.4. Escorrentía total

Consecuencia del efecto de las variables climáticas junto con las características del terreno, la escorrentía total media anual en España sigue un patrón de comportamiento espacial similar al de las precipitaciones, aunque

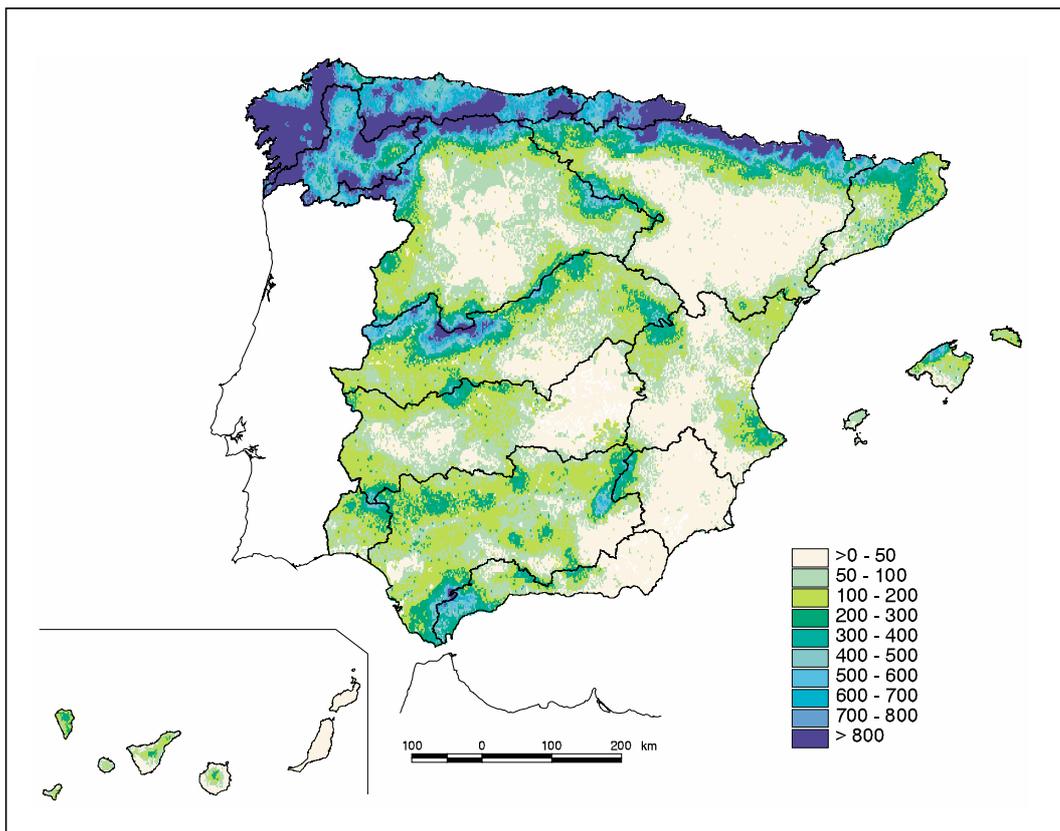


Figura 92. Mapa de lluvia útil media anual en mm (periodo 1940/41 - 1995/96)

con una mayor variabilidad, tal y como se aprecia en la figura adjunta. Esta escorrentía total (recurso por unidad de superficie o aportación específica total) es la suma de la escorrentía superficial directa y la escorrentía subterránea, y más adelante se explicará cómo se ha obtenido para cualquier punto del país.

El valor medio anual de la escorrentía total en España es de 220 mm, equivalentes, como se vio, a unos 111.000 hm<sup>3</sup>. En cuanto a la distribución espacial son evidentes las grandes diferencias territoriales que muestra, variando desde áreas donde la escorrentía es de menos de 50 mm/año (sureste de España, la Mancha, el valle del Ebro, la meseta del Duero, y las Islas Canarias) hasta otras donde supera los 800 mm/año (cuencas del Norte y áreas montañosas de algunas cuencas) (fig. 93).

Esa escorrentía se genera casi en su totalidad en nuestro territorio, a partir de la precipitación. Se exceptúan unos aportes irrelevantes respecto al total de la escorrentía que provienen de Andorra y Francia en la cabecera del río Segre (unos 300 hm<sup>3</sup>/año según estimación del Plan de cuenca del Ebro), así como las procedentes de unas muy pequeñas cuencas en la frontera portuguesa.

Obtenido el mapa de escorrentías totales para todo el país, la escorrentía total (los recursos naturales) de un territorio cualquiera se obtiene simplemente sumando las escorrentías totales de todos sus puntos, es decir, integrando en el recinto del territorio. Los resultados que

se obtienen de este modo para los ámbitos de planificación hidrológica son los que se ofrecen más adelante.

Asimismo, si en cada punto del territorio se determina la suma de las escorrentías de todos los puntos situados aguas arriba, se obtiene el mapa de aportaciones acumuladas en cada punto, que no es sino una representación fractal de la red fluvial, en la que el valor correspondiente a cada punto de la red es su aportación media interanual. La escorrentía total de un territorio cualquiera será ahora no la suma de sus puntos interiores, sino la de los puntos de su contorno, positiva si el punto aporta al territorio, y negativa si lo drena. Ello equivale en términos formales a integrar curvilíneamente en el contorno del recinto.

La figura 94 muestra este mapa de aportaciones acumuladas para todo el territorio peninsular, habiéndose representado los tramos fluviales con una aportación estimada mayor de 25 hm<sup>3</sup>/año.

En este mapa se aprecia, por ejemplo, el contraste entre las densidades de las redes fluviales de las cuencas del Norte de España y del Sureste. También en algunas cuencas hidrográficas se producen diferencias acusadas entre las aportaciones de las distintas vertientes, como sucede en el Ebro, donde las aportaciones de la margen izquierda, generadas en gran parte en los Pirineos, son muy superiores a las de la margen derecha. Con carácter general se observa cómo en la mayoría de las cuen-

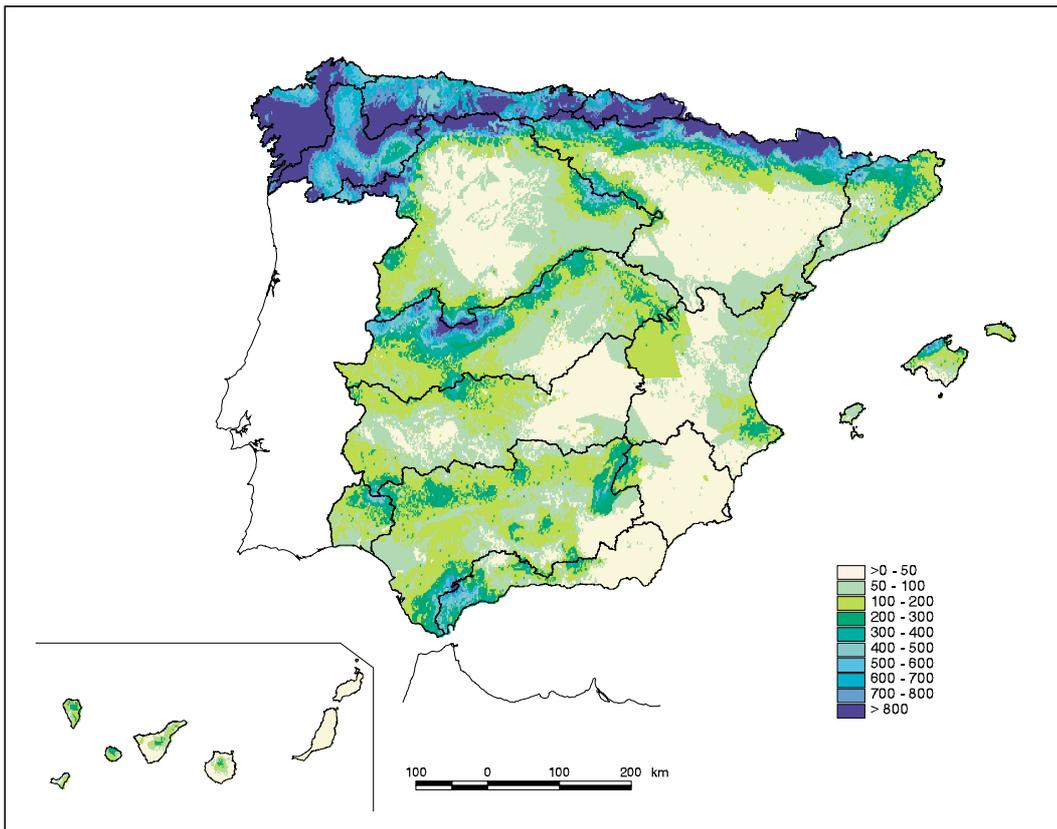


Figura 93. Mapa de escorrentía total media anual en mm (periodo 1940/41 - 1995/96)

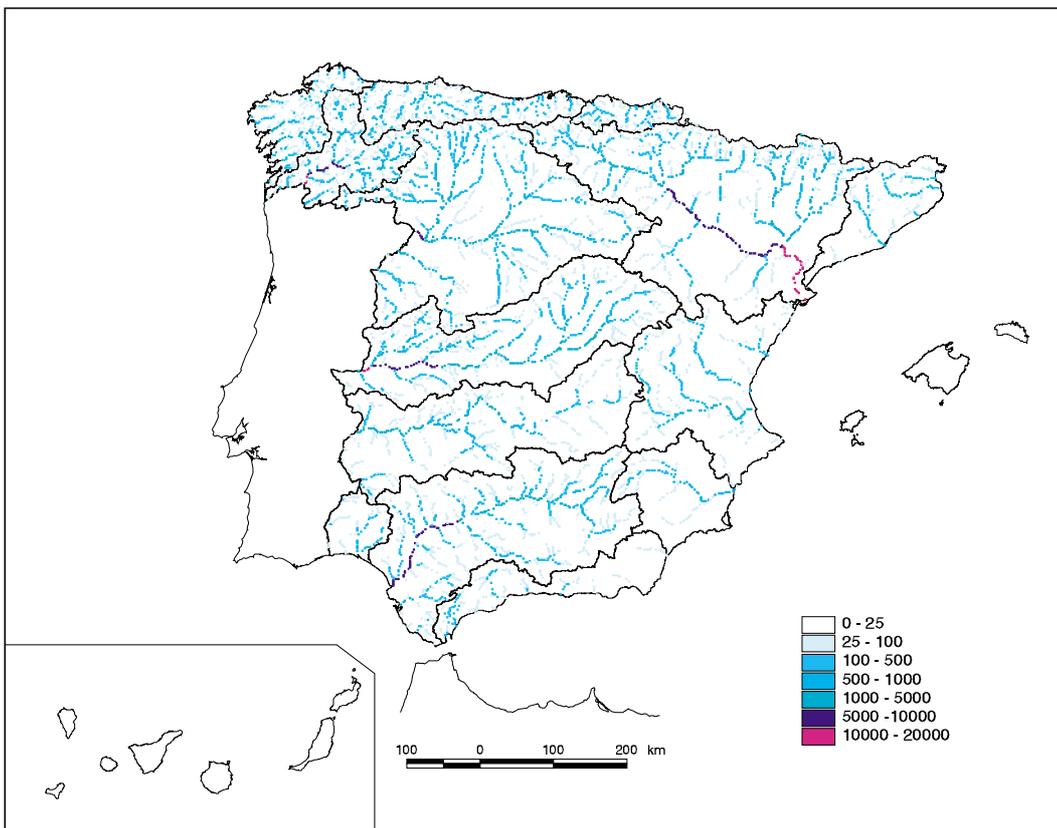


Figura 94. Mapa de aportación total media anual (hm³/año) en el periodo 1940/41 - 1995/96.

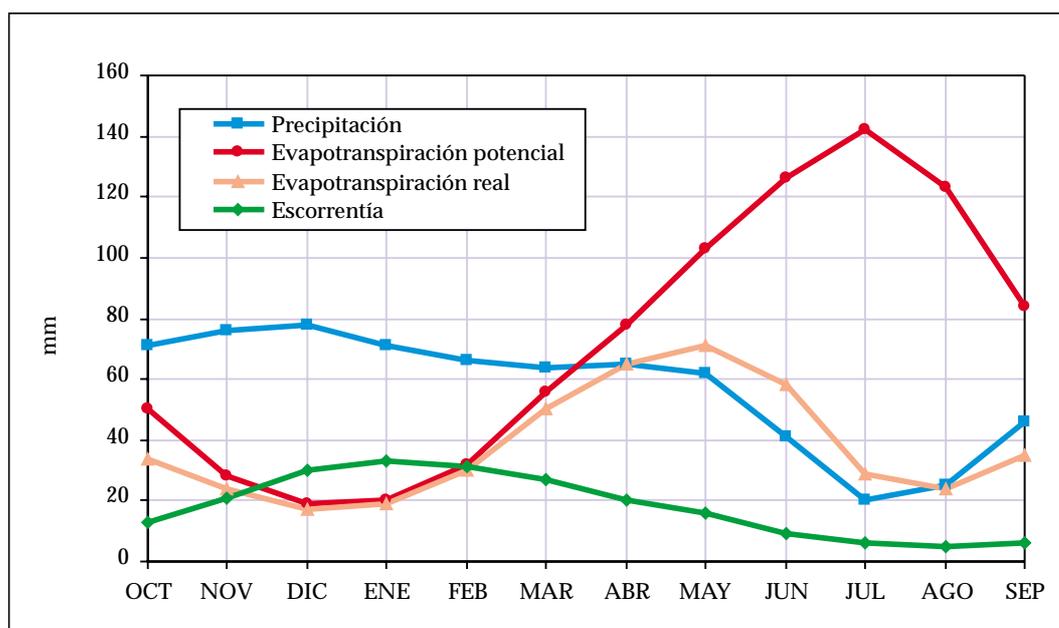


Figura 95. Distribución media intraanual de los principales flujos hidrológicos globales en España

cas una porción muy significativa de los recursos se genera en sus cabeceras. Una excepción es la cuenca del Guadiana, donde los recursos se generan en los afluentes que vierten a sus tramos medios.

La distribución estacional o intraanual de la escorrentía media en España se muestra, junto con la de la pre-

cipitación y las evapotranspiraciones potencial y real, en la figura adjunta.

Se observa claramente el desfase temporal existente entre la precipitación y la evapotranspiración potencial, lo que da lugar a los déficit de humedad del suelo. Igualmente se observa que la máxima produc-

Ámbito de Planificación	1967 (a)	1980 (b)	1993 (c)	1998 (d)	1998 (e)
Galicia Costa	-	-	12.504	12.642	12.250
Norte I	-	-	11.235	11.235	12.689
Norte II	-	-	12.954	13.000	13.881
Norte III	-	-	5.395	5.381	5.337
Norte	37.500	38.700	42.088	42.258	44.157
Duero	13.200	15.900	15.168	15.168	13.660
Tajo	8.920	10.250	12.858	12.230	10.883
Guadiana I	-	-	4.872	4.875	4.414
Guadiana II	-	-	1.293	1.293	1.061
Guadiana	4.895	5.100	6.155	6.168	5.475
Guadalquivir	7.300	9.400	7.771	7.978	8.601
Sur	2.150	2.690	2.418	2.483	2.351
Segura	884	960	1.000	1.000	803
Júcar	2.950	5.100	4.142	4.142	3.432
Ebro	17.396	18.950	18.198	18.217	17.967
C.I. Cataluña	1.700	3.250	2.780	2.780	2.787
Total Península	96.895	110.300	112.588	112.424	110.116
Baleares	-	690	745	562	661
Canarias	-	965	965	826	409
Total España	-	111.955	114.298	113.812	111.186

Tabla 12. Distintas estimaciones de los recursos hídricos totales en régimen natural (hm<sup>3</sup>/año)

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

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

(c) MOPT (1993) Memoria del PHN.

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

(e) Datos de la evaluación realizada en este Libro Blanco, que se expondrá más adelante (1998)

Notas: Norte comprende los ámbitos de Galicia Costa y Norte I, II, y III; Guadiana comprende los ámbitos Guadiana I y II. La cifra del Plan de cuenca (columna d) del Ebro no incluye los recursos del Garona y Gallocanta.

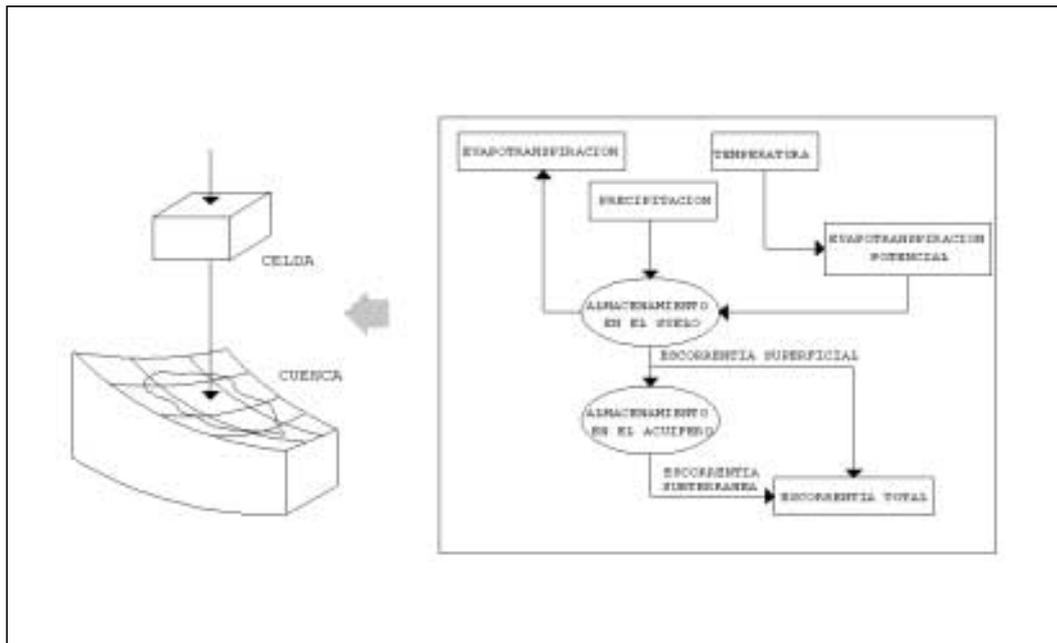


Figura 96.  
Representación  
esquemática del  
modelo distribuido  
empleado

ción global de escorrentía se produce de diciembre a febrero, y la mínima en agosto; o que la máxima evapotranspiración potencial se da en julio.

Es también interesante destacar el efecto que tiene el almacenamiento de agua en el suelo y en los acuíferos, que en los meses secos de mayo a julio posibilita que la evapotranspiración real sea mayor que la precipitación, o que circule caudal por los ríos (fig. 95).

Como antes se ha apuntado, la evaluación de las aportaciones naturales de los ríos no es una tarea fácil, y una muestra de ello es cómo a lo largo del tiempo estas estimaciones han ido variando según el autor que las ofrecía y las fechas de elaboración, tal y como se muestra en la tabla adjunta de estimaciones de recursos hídricos totales en régimen natural (expresados en  $\text{hm}^3/\text{año}$ ). Las diferencias son esperables considerando, en primer lugar, las diferentes fechas y periodos (distintas series) en que se realizan las evaluaciones; en segundo lugar, que aún empleando las mismas series, pueden emplearse distintos procedimientos técnicos que darán lugar a diferentes resultados; y, en tercer lugar, que no siempre - y en especial en las estimaciones más antiguas - se ha entendido como cuenca la totalidad del ámbito administrativo definido como tal, habiéndose considerado los recursos solamente del río o ríos principales, y no de todos los cauces.

En todo caso, ha de tenerse presente que, como se dijo, los recursos naturales no pueden medirse de forma directa, y han de ser estimados, lo que conlleva siempre un cierto grado de incertidumbre (tabla 12).

Las cifras más recientes son las procedentes de los Planes Hidrológicos de cuenca (que aunque aprobados en 1998

se basan, con carácter general, en datos del periodo comprendido entre los años hidrológicos 1940/41 y 1985/86), y las correspondientes a la nueva evaluación de los recursos naturales, realizada en este Libro, para el periodo comprendido entre 1940/41 y 1995/96.

Como puede verse, las diferencias entre estas dos últimas estimaciones no exceden en ningún caso del 20% y suelen ser a la baja, lo que resulta lógico considerando los diferentes periodos empleados y el efecto de la última sequía. Asimismo, se observa que las evaluaciones más antiguas se encuentran por lo general ajustadas, y la estimación global de los recursos peninsulares -en torno a los  $110 \text{ km}^3/\text{año}$  - encajada desde hace casi 20 años. En los siguientes epígrafes se detallará la más reciente evaluación, realizada en este Libro.

### 3.1.4.1.5. El procedimiento de evaluación de los recursos hídricos

Expuestas ya las nociones básicas del ciclo hidrológico y los balances hídricos, y caracterizadas sus variables meteorológicas básicas, procede explicar con algún detalle el procedimiento de evaluación de los recursos hídricos en régimen natural que se ha seguido en este Libro y que ha consistido la modelación distribuida, masiva, de los componentes básicos del ciclo hidrológico a la escala global de todo el país.

En efecto, con motivo de la elaboración de este Libro y la preparación de datos para la elaboración del Plan Hidrológico Nacional, y con objeto de actualizar todas las series hasta el año hidrológico 1995/96 utilizando una metodología homogénea para todas las cuencas peninsulares, se ha puesto a punto un mode-

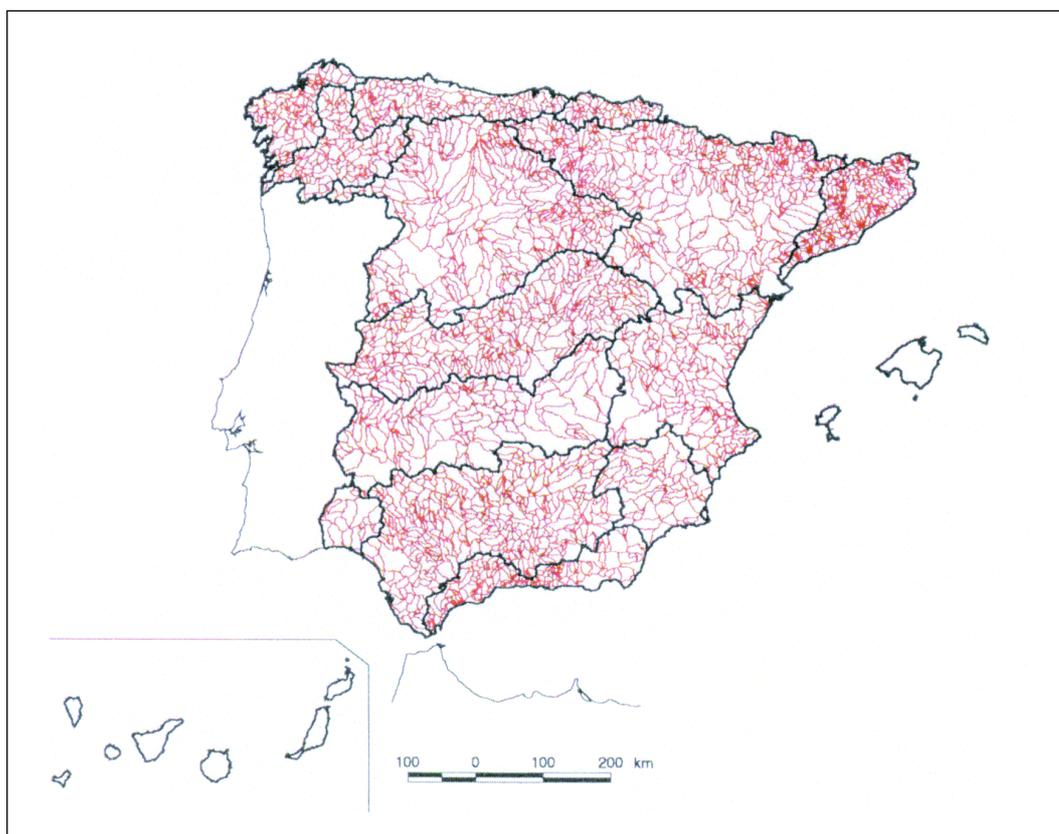


Figura 97. Mapa de subcuencas en la España peninsular

lo de simulación de las aportaciones naturales para su evaluación en cualquier punto del país (Estrela y Quintas, 1996b; Ruiz, 1999).

Este modelo utiliza los datos registrados en las estaciones de aforo, la información meteorológica, y las características de las cuencas y acuíferos. Es un modelo hidrológico conceptual y distribuido -considera la variabilidad espacial de toda la información hidrológica- que simula los flujos medios mensuales en régimen natural en cualquier punto de la red hidrográfica de España. Para ello reproduce los procesos esenciales de transporte de agua que tienen lugar en las diferentes fases del ciclo hidrológico. En cada una de las aproximadamente medio millón de celdas de dimensiones 1.000 m. x 1.000 m. en que se ha discretizado el territorio español, plantea el principio de continuidad y establece, a escala mensual, leyes de reparto y transferencias de agua entre los distintos almacenamientos (ver figura 96).

Las entradas al modelo son los datos de precipitaciones y temperaturas mensuales en las estaciones meteorológicas y los datos de caudales históricos observados en los puntos de simulación o de calibración. Los mapas de precipitaciones se han obtenido por interpolación de los datos registrados en los pluviómetros, teniendo en cuenta la orografía. Para el cálculo de la evapotranspiración potencial utiliza una combinación de los métodos de Thornthwaite y Penman-Monteith, e introduce

un coeficiente reductor por la vegetación. Otra información que precisa el modelo son datos sobre la geometría de las subcuencas consideradas que, teniendo en cuenta los primitivos trabajos de clasificación de los ríos realizados en los años 60 (MOP-CEH [1965]; MOP-CEH [1966]), han sido digitalizadas a partir de los planos del Servicio Geográfico del Ejército a escala 1:50.000, y se muestran en la figura 97.

Los parámetros del modelo son los mapas de capacidad máxima de almacenamiento de humedad en el suelo, de capacidad máxima de infiltración y los coeficientes de recesión de los acuíferos.

En la figura 98 se muestra el mapa del parámetro de capacidad máxima de almacenamiento de humedad en el suelo, estimado a partir de información sobre usos del suelo conforme al criterio de la tabla 13.

La figura 99 muestra el mapa del parámetro de capacidad de infiltración máxima.

Este parámetro se ha regionalizado en función de la litología, tal y como se muestra en la tabla siguiente. Inicialmente, a las clases litológicas del mapa digital de suelos de EUROSTAT se les asoció un valor de capacidad de infiltración máxima a partir de los estimaciones de infiltración por grupos litológicos recogidas en Sanz Pérez (1995). Estos valores de referencia fueron ajustados con posterioridad durante el proceso de calibración del modelo (tabla 14).

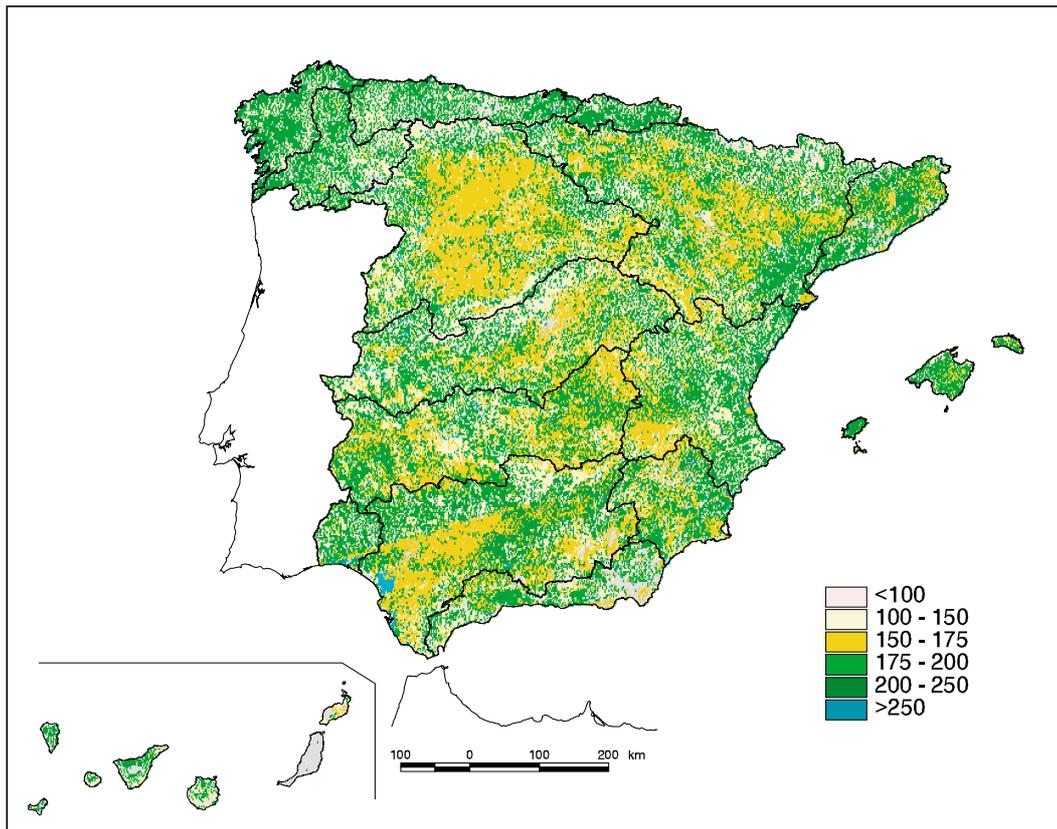


Figura 98. Mapa de capacidad máxima de almacenamiento de agua en el suelo (mm)

Finalmente, en la figura 100 se muestra el mapa de coeficientes de recesión de los acuíferos. El modelo estima la recarga a los acuíferos de forma distribuida, y obtiene un valor areal sobre la unidad hidrogeológica para cada mes. El intercambio de agua entre cada unidad hidrogeológica y la red fluvial se realiza mediante un modelo unicelular (López-Camacho, 1981), aplicado de forma agregada a toda la unidad, y cuyo parámetro es el coeficiente de recesión o descarga.

Este mapa se ha estimado introduciendo en cada unidad hidrogeológica unos valores iniciales en función de la extensión de los acuíferos y de sus características litológicas, y ajustándolos posteriormente en el proceso de calibración del modelo a partir de los hidrogramas de agotamiento registrados en las estaciones de aforo.

La calibración del modelo ha consistido en obtener los mapas de los parámetros que conducen a un buen ajuste entre los valores observados y los simulados por el modelo, entendiendo por tal la reproducción, en la medida de lo posible, de las aportaciones medias mensuales, anuales e interanuales, y de otras propiedades de las series, como la varianza o la persistencia de los caudales.

La mayoría de los datos de calibración corresponden a estaciones de aforo donde se miden caudales en régimen natural. También se han utilizado, como elemento de contraste, series restituidas a régimen natural procedentes de los Planes Hidrológicos de cuenca, fundamentalmente en zonas con una escasa cobertura espacial de las estaciones anteriores, y en las desembocaduras de los principales ríos lo que asegura el encaje global de las cuencas.

Uso del suelo	Capacidad máxima de humedad del suelo (mm)
Superficies artificiales	40
Espacios con poca vegetación	100
Tierras de labor en secano	155
Tierras de labor en regadío	215
Praderas y pastizales naturales	150
Sistemas agrícolas heterogéneos	195
Cultivos permanentes	210
Vegetación arbustiva	135
Bosque mixto	220
Bosques de frondosas y coníferas	230
Zonas húmedas, superficies de agua y artificiales	300

Tabla 13. Regionalización de la capacidad máxima de humedad del suelo a partir de los usos del suelo