

Figura 99. Mapa de capacidad máxima de infiltración (mm/mes)

En la figura 101 se muestran los puntos de control seleccionados para la calibración, así como la situación de los embalses y de las zonas de riego, información utilizada para realizar esa selección.

Como ya se ha mencionado, para lograr el ajuste del modelo no se han calibrado de forma matemática los parámetros de las cuencas aforadas sino que se han regionalizado sus valores para todo el territorio a partir de las características físicas de las cuencas (usos de suelo y litología). Aunque de esta manera es más difícil conseguir errores próximos a cero, se tiene la ventaja de que los parámetros estimados en las cuencas no

aforadas, que cubren un gran porcentaje del territorio, son consistentes con sus características y pueden estimarse con mayor fiabilidad. En el caso de las Islas Canarias la regionalización de parámetros efectuada no ha podido ser contrastada dada la ausencia de registros de caudales. De la misma manera tampoco se ha podido determinar con precisión el parámetro que regula el reparto entre aportación superficial y subterránea, por tratarse de un terreno volcánico con escasa representación en otras zonas del territorio español.

Los resultados de la simulación son los mapas de los distintos almacenamientos, humedad en el suelo y

Litología	Infiltración máxima (mm)
Material aluvial de origen indiferenciado	400
Calizas y dolomías	1.000
Margas	85
Margas yesíferas	75
Yesos	64
Materiales arenosos	450
Materiales gravo-arenosos	500
Calcarenitas (Macigno)	250
Arcosas	150
Rañías	95
Granitos	65
Rocas metamórficas	20
Gneiss	55
Pizarras	40
Rocas volcánicas	275

Tabla 14. Regionalización de la capacidad máxima de infiltración a partir de la litología

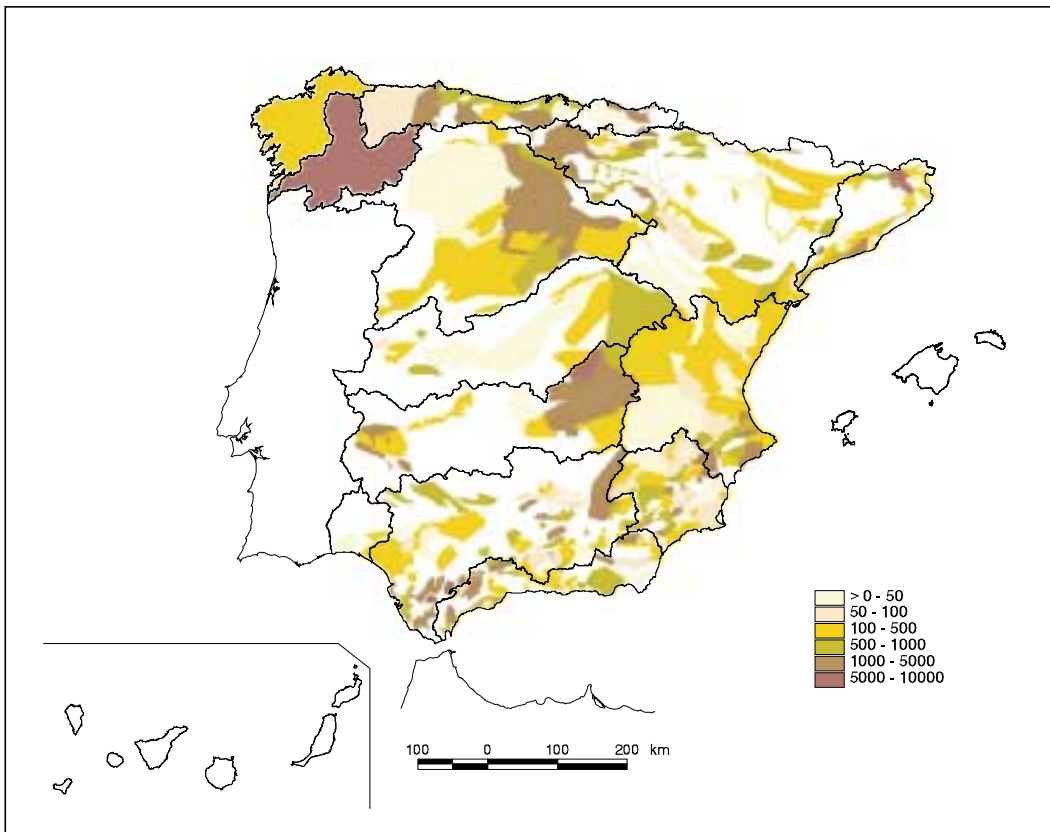


Figura 100. Mapa de coeficientes de recesión ($\text{días}^{-1} \times 100.000$)

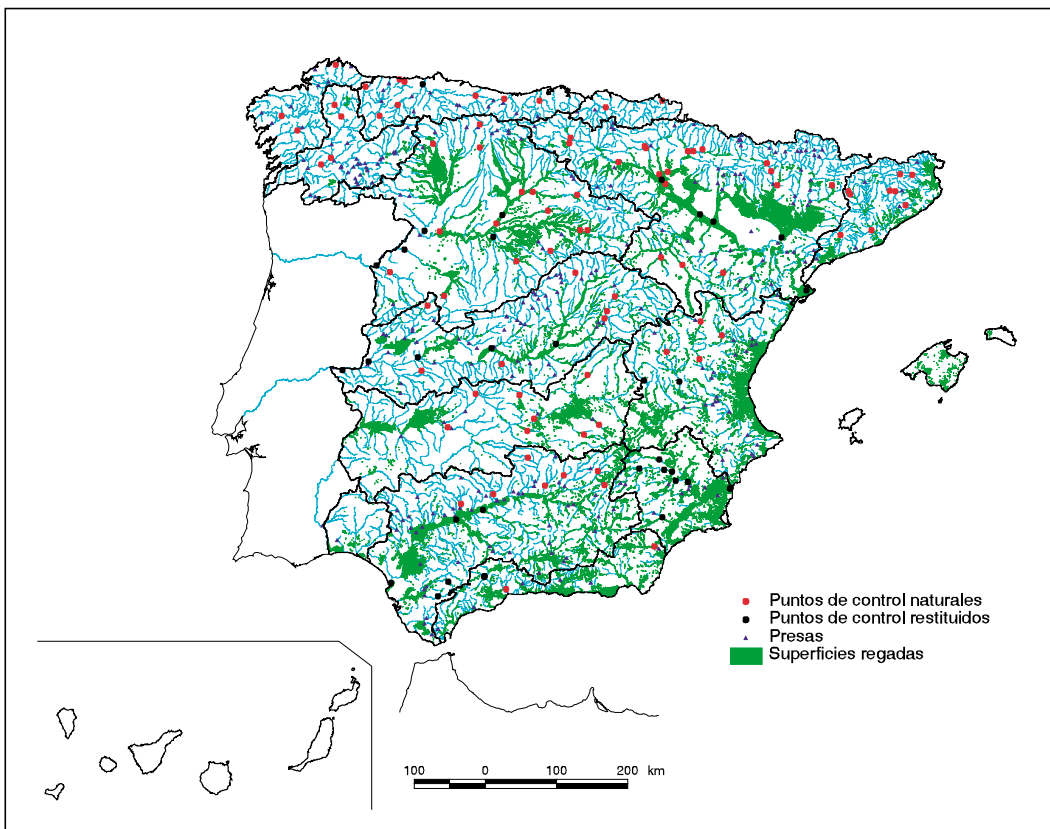


Figura 101. Mapa con la selección de puntos de control para la calibración del modelo

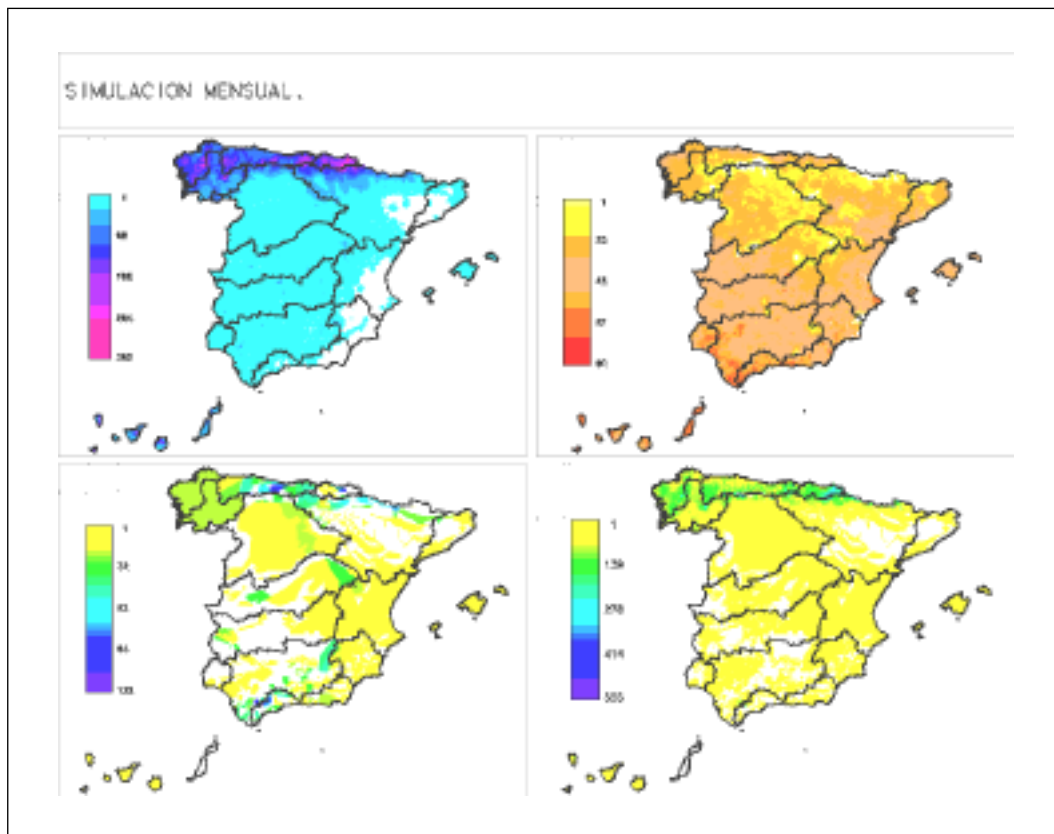


Figura 102. Ejemplo de mapas generados en la simulación de escorrentías en un intervalo de tiempo (febrero de 1970)

volumen de acuífero (drenable por gravedad conforme al modelo unicelular), y de las variables de salida del ciclo hidrológico, evapotranspiración real y escorrentía total, obtenida esta última como suma de escorrentía superficial y subterránea. La figura 102 muestra un ejemplo de simulación de escorrentías en milímetros en un mes determinado, para el que se generan los mapas de precipitación (sup. izq), evapotranspiración (sup.der.), escorrentía subterránea (inf. izq.), y escorrentía total (inf. der.). Los caudales mensuales, en

cada intervalo de tiempo, se obtienen integrando la escorrentía total en las cuencas vertientes a los puntos de simulación. Los caudales simulados se contrastan con los datos históricos, si estos existen.

Para ofrecer una idea del buen grado de ajuste conseguido, en la figura 103 se muestran los valores medios anuales de las aportaciones específicas, simuladas y observadas, en todos los puntos de control seleccionados.

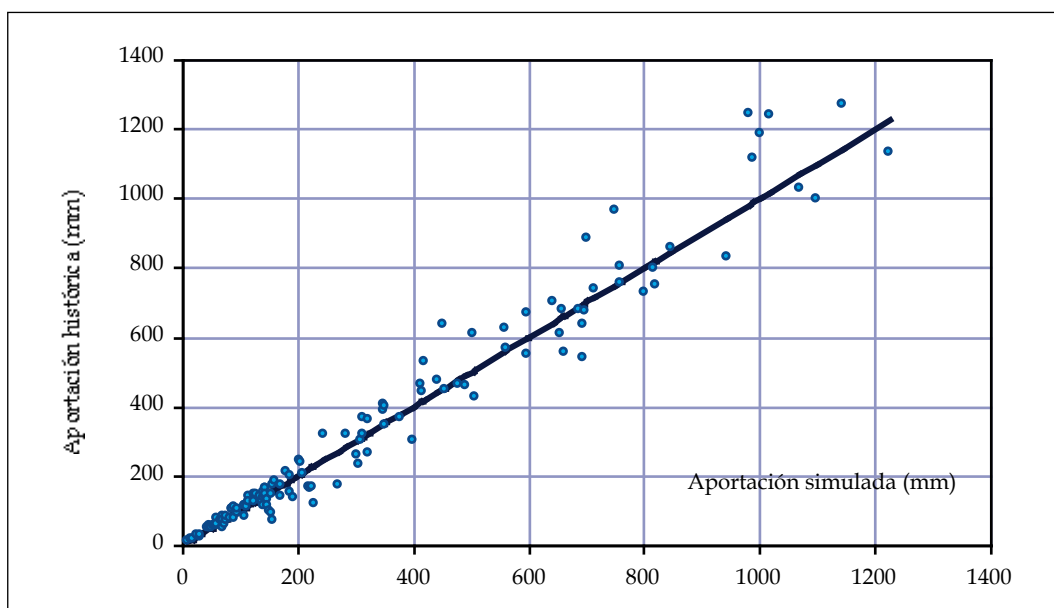


Figura 103. Contraste del modelo en valores medios anuales

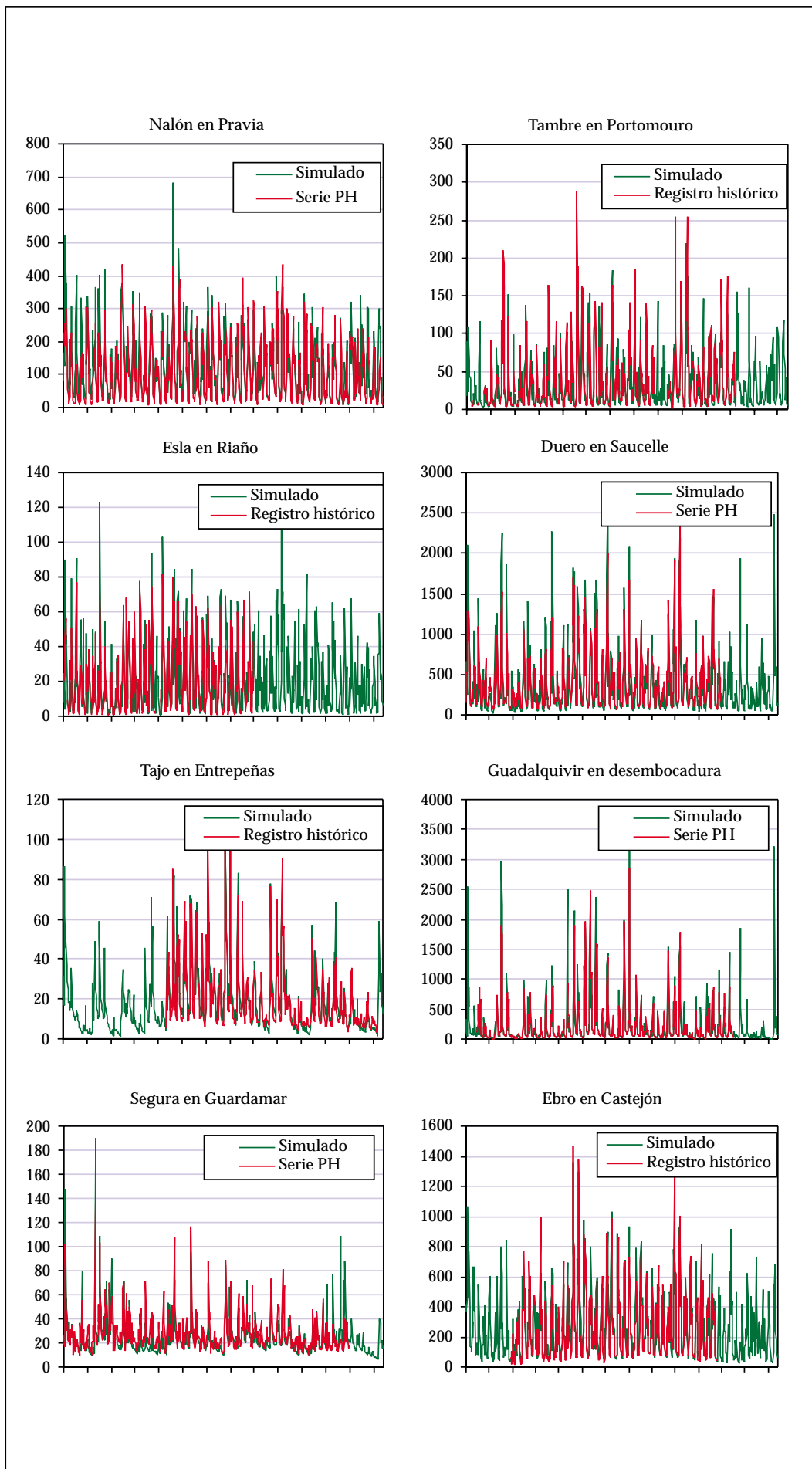


Figura 104.
Aportaciones mensuales simuladas y observadas (m^3/s) en varios puntos de control en el periodo 1940/41-1995/96

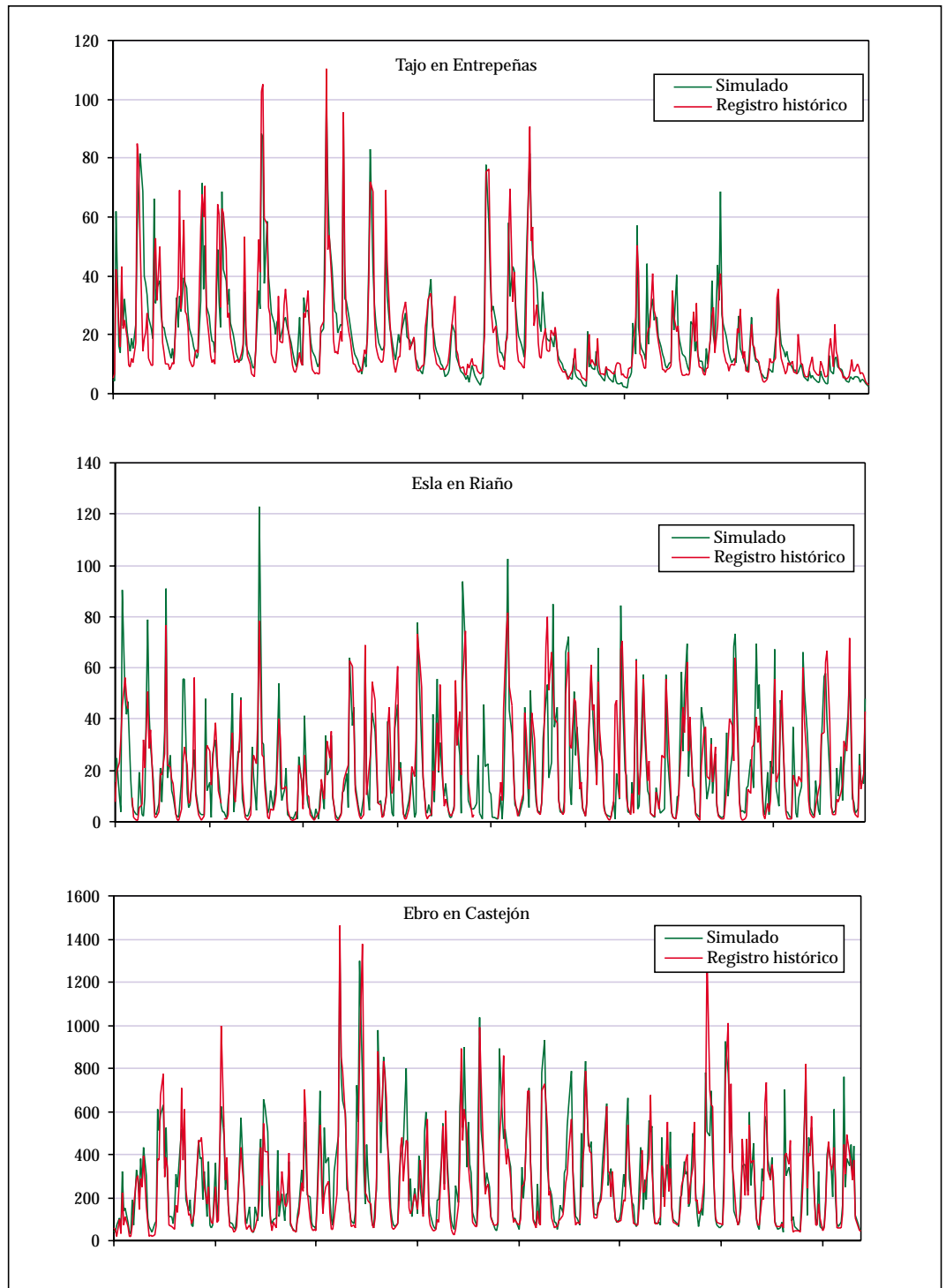


Figura 105. Detalle de aportaciones mensuales simuladas y observadas (m^3/s) en el periodo 1940/41-1995/96

También se representan en las figuras 104 y 105 las series completas de aportaciones mensuales (en m^3/s), simuladas y observadas, en distintos puntos de control. Se puede afirmar que la calibración es muy aceptable, y que es lo suficientemente fiable como para permitir la aplicación generalizada del modelo en todo el territorio.

Asimismo, se observa que aparentes tendencias a la disminución de los recursos naturales (como el Tajo en Entrepeñas) pueden explicarse simplemente por la variabilidad de las precipitaciones, pudiendo conside-

rarse estacionarios los parámetros controladores de la respuesta hidrológica, al menos en el periodo analizado, desde el año 40. Aceptar esta hipótesis supone admitir la invarianza de los usos de suelo. Aunque, como es obvio, se han producido ocasionalmente cambios de usos en las últimas décadas, su incidencia global sobre las aportaciones de los ríos es muy escasa, como demuestra el hecho de que los residuos no presenten derivas a lo largo del periodo de simulación. Los cambios de suelo son ciertamente significativos a la escala de la ladera, parcela o pequeña cuenca, pero

Ámbito	Superf. (km ²)	Precip. (mm)	Precip. (mm)	ETP (mm)	ET (mm)	Esc. tot. (mm)	Esc/Md (%)	C. Esc. (%)	Ap. tot. (hm ³ /año)	Ap. tot. (hm ³ /año) (1)
Norte I	17.600	1.284	1.316	709	563	721	328	56	13.147	12.689
Norte II	17.330	1.405	1.440	653	604	801	364	57	14.405	13.881
Norte III	5.720	1.606	1.650	695	673	933	424	58	5.614	5.337
Duero	78.960	625	631	759	452	173	79	28	14.175	13.660
Tajo	55.810	655	666	898	460	195	89	30	11.371	10.883
Guadiana I	53.180	521	531	977	438	83	38	16	4.624	4.414
Guadiana II	7.030	662	661	1.075	511	151	69	23	1.053	1.061
Guadalquivir	63.240	591	602	991	455	136	62	23	9.090	8.601
Sur	17.950	530	531	969	399	131	60	25	2.359	2.351
Segura	19.120	383	379	963	341	42	19	11	811	803
Júcar	42.900	504	500	881	424	80	36	16	3.335	3.432
Ebro (2)	85.560	682	692	792	472	210	95	31	18.647	17.967
C. I.Cataluña	16.490	734	727	792	565	169	77	23	2.728	2.787
Galicia Costa	13.130	1.577	1.590	737	644	933	424	59	12.245	12.250
Península	494.020	691	700	859	468	223	101	32	113.604	110.116
Baleares	5.010	595	603	896	463	132	60	22	696	661
Canarias	7.440	302	297	1.057	247	55	25	18	394	409
España	506.470	684	693	862	464	220	100	32	114.694	111.186

Tabla 15. Valores medios anuales simulados de la precipitación, evapotranspiración y escorrentía por ámbitos de planificación, correspondientes al periodo 1940/41-1995/96

(1) Estas cifras, a diferencia de las otras, corresponden al periodo 1940/41-1985/86

(2) Estas cifras no incluyen la escorrentía procedente de territorio francés, estimada en unos 300 hm³/año

resultan irrelevantes a la escala de las cuencas fluviales consideradas en este Libro, y su efecto queda ampliamente absorbido por las incertidumbres y ruidos propios de los modelos hidrológicos, aún de los más complejos y parametrizados.

La figura 105 muestra tres de estos ajustes con mayor detalle, al objeto de apreciar mejor los resultados conseguidos.

3.1.4.1.6. Resultados obtenidos

Concluida la validez global del modelo utilizado, se ha procedido a su aplicación masiva para el periodo 1940/41-1995/96, obteniéndose los resultados que se resumen en la tabla 15. Pueden verse los valores medios anuales de la precipitación (ya ofrecida anteriormente), la evapotranspiración potencial y real, la escorrentía total (que resulta igual a la lluvia útil), el porcentaje de esta escorrentía con relación a la media de toda España, el coeficiente de escorrentía, y la aportación total en cada uno de los ámbitos, y en el total del país. Asimismo se indican, a efectos comparativos, los valores de la precipitación y la aportación total obtenidos por el modelo para el periodo 1940/41-1985/86, que es el usualmente empleado en los Planes Hidrológicos de cuenca.

Las cifras de aportación total incluyen la correspondiente a la red fluvial (escorrentía superficial directa y recar-

ga a los acuíferos) y la escorrentía subterránea al mar. Esta última es proporcionalmente poco importante, del orden de 2.000 hm³/año incluyendo la de las islas, tal y como se verá en un epígrafe posterior.

Examinando esta tabla es interesante constatar que la consideración de los últimos 10 años -es decir, el empleo de las series 1940/41-1995/96 en lugar de las estándar 1940/41-1985/86- supone, por término medio, casi un 4% de disminución de los recursos naturales totales.

Esta disminución se produce, con distintos porcentajes, en casi todos los ámbitos excepto los de Galicia Costa y Guadiana II, donde es prácticamente igual, y en los del Júcar y Cuencas Internas de Cataluña, donde se produce un ligero aumento. Estas excepciones se explican analizando con detalle la distribución espacial de la sequía de principios de los noventa, que aunque tuvo un carácter bastante generalizado, no afectó por igual a todo el territorio nacional, como más adelante se muestra con claridad en los epígrafes de sequías.

En concreto, la aportación media en esos ámbitos en el periodo comprendido entre 1985/86 y 1995/96 fue algo mayor que la media de todo el periodo de análisis, aunque esas aportaciones elevadas se produjeron básicamente en las zonas litorales, donde no podían ser reguladas para paliar la sequía en esos territorios y los de aguas arriba. Es, por ejemplo, el caso del Júcar, con altas precipitaciones en las Marinas y muy bajas en las cabeceras y cursos medios de los ríos Júcar, Turia y Mijares.

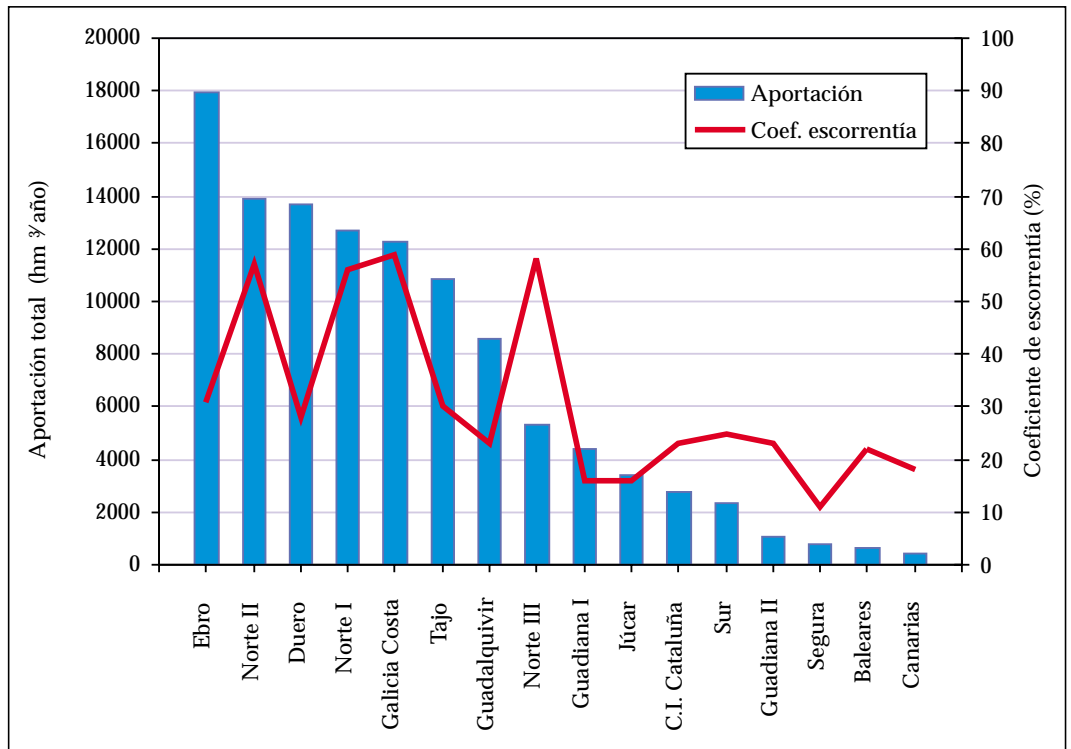


Figura 106. Aportaciones totales medias anuales (hm³/año) y coeficientes de escorrentía en régimen natural en los diferentes ámbitos territoriales de los Planes Hidrológicos

Estos efectos pueden verse en los gráficos del análisis de rachas pluviométricas regionales, en los que se observa que el resultado global de la región pluviométrica de Levante fue muy húmedo en el periodo 1986-90 y, en menor medida, seco en el 1991-95.

En todo caso, y a escala global, debe constatararse la ya indicada reducción total de los recursos naturales, en torno al 4%, con respecto a los recursos correspon-

dientes a los periodos usualmente considerados por los Planes Hidrológicos.

Asimismo, como puede comprobarse, e ilustra la figura 106, la aportación total natural media anual varía enormemente de unas cuencas a otras, con valores entre los casi 18.000 hm³/año del Ebro (la mayor de España), los más de 10.000 de las cuencas del Norte I

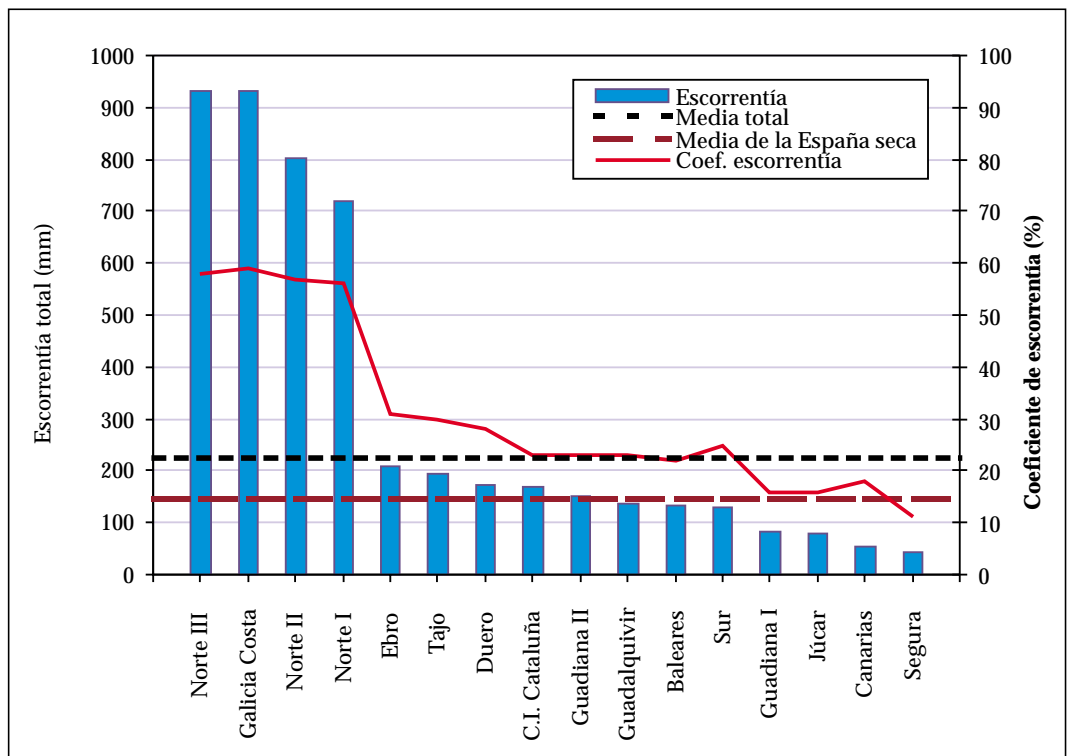


Figura 107. Escorrentías medias anuales (mm) y coeficientes de escorrentía en régimen natural en los diferentes ámbitos territoriales de los Planes Hidrológicos

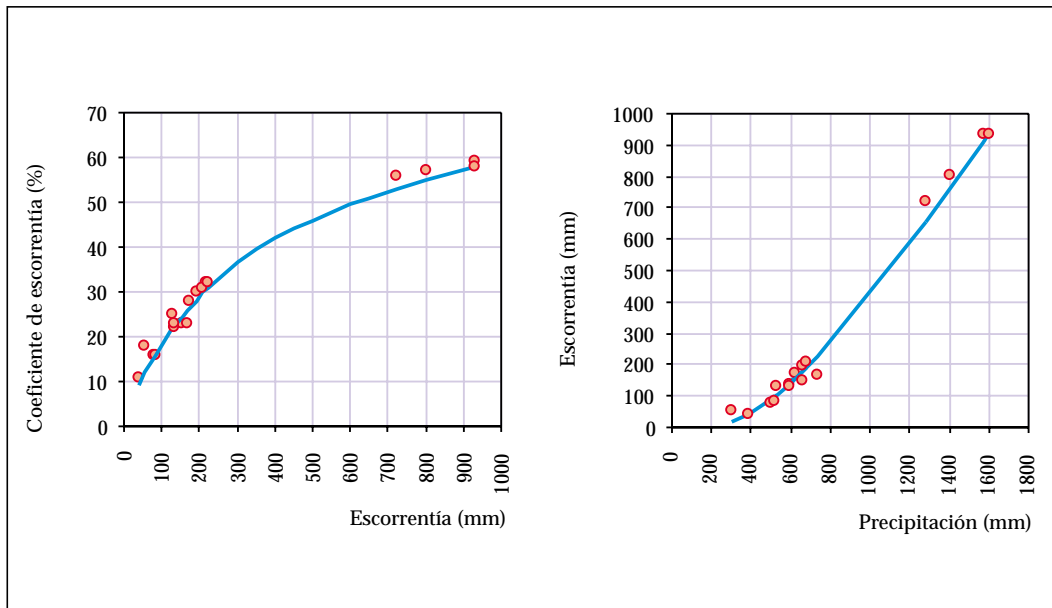


Figura 108. Relaciones entre precipitación, escorrentía total y coeficientes de escorrentía en los diferentes ámbitos territoriales de los Planes Hidrológicos

y II, Duero, Tajo y Galicia Costa, y los mínimos entre 400 y 800 de las islas y el Segura.

En la misma figura se ha representado el coeficiente global interanual de escorrentía (la relación entre aportación y precipitación) en cada ámbito. Como puede verse, los coeficientes de escorrentía globales varían entre cifras próximas al 60% en las cuencas del Norte, y el 11% del Segura, lo que, desde el punto de vista de los recursos, exagera aún más sus diferencias pluviométricas.

Las cifras de aportaciones totales son muy distintas, además de por razones hidrológicas, por las dimensiones relativas de las cuencas. La consideración de las escorrentías -aportación total dividida por el área de la cuenca- permite suprimir este efecto de escala, y da, por tanto, una mejor idea de la irregularidad de las aporta-

ciones en los distintos ámbitos. La figura 107 muestra estas escorrentías (también llamadas aportaciones específicas) junto con los coeficientes de escorrentía, y proporciona una imagen verdaderamente expresiva de la diversidad hídrica de España.

Puede verse que los territorios con mayor abundancia de agua por unidad de superficie son, a gran distancia del resto, los del Norte y Galicia (es decir, estrictamente la España húmeda) con valores superiores a los 700 mm/año, mientras que en el resto (la España seca) no superan los 250 mm/año. La menor aportación específica de España se produce en la cuenca del Segura, que no alcanza ni los 50 mm/año, es decir, unas 20 veces inferior a la de Galicia, 5 veces inferior a la media nacional, y 3 veces inferior a la media de la España seca.

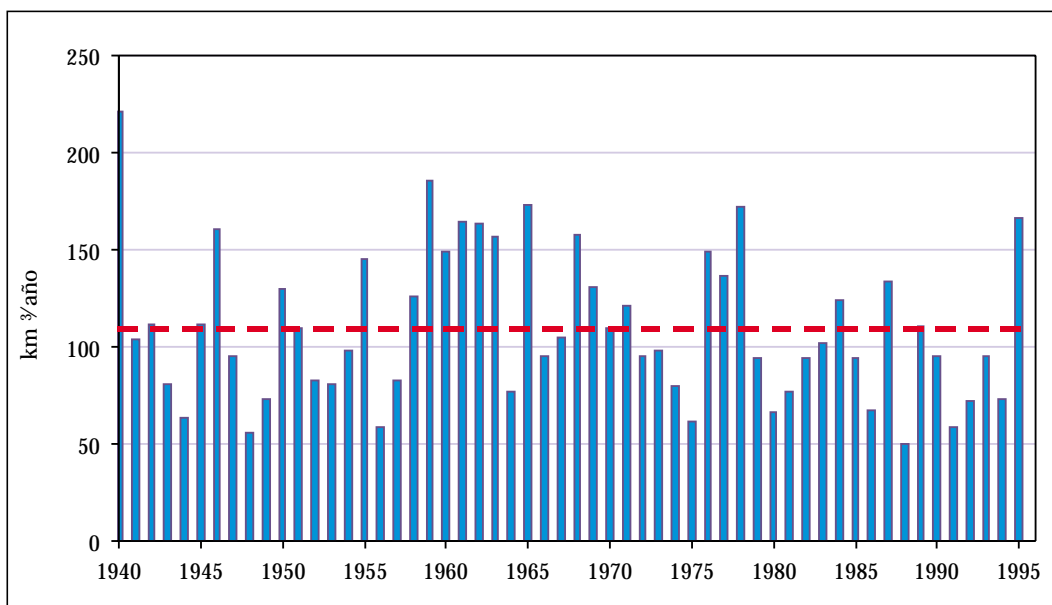


Figura 109. Serie de aportaciones totales anuales en régimen natural en la España peninsular (periodo 1940/41-1995/96)

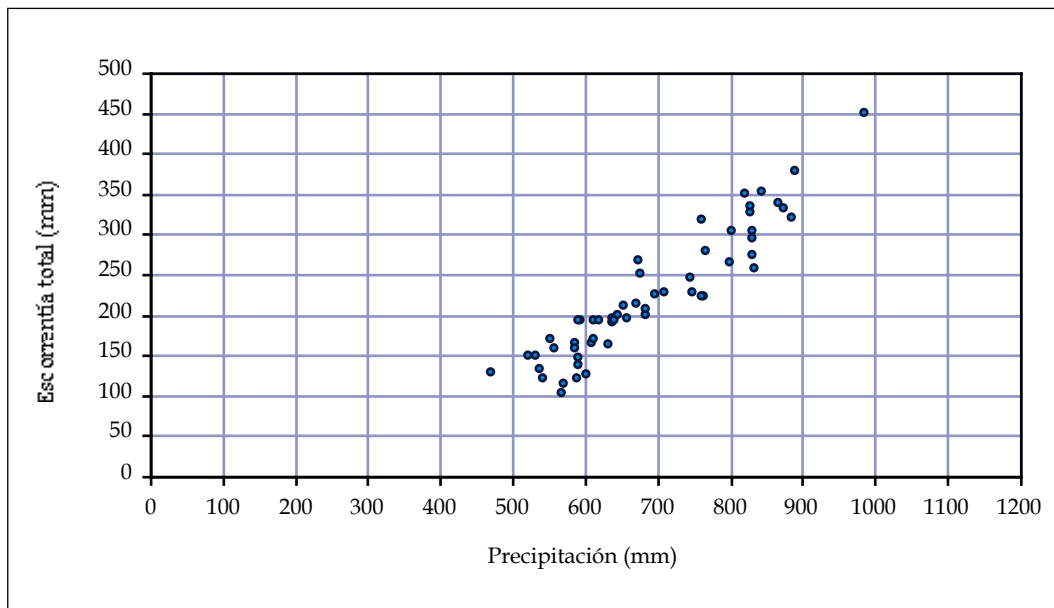


Figura 110. Relación precipitación-escorrentía total a escala anual en la España peninsular (años 1940/41 a 1995/96)

Asimismo se observa que, como era de prever, existe una clara relación -aunque no lineal- entre la escorrentía (o aportación específica) y el coeficiente de escorrentía, consecuencia evidente de la relación aproximadamente lineal a partir de cierto umbral, entre escorrentía y precipitación medias a largo plazo en los distintos ámbitos, tal y como se muestra en la figura 108. A estos datos se les ha ajustado la ley regional de Budyko, que tiene por expresión $E = P - ETP$, donde P es la precipitación, ETP es la evapotranspiración potencial y E es la escorrentía. En la expresión anterior se ha adoptado un valor constante de la ETP igual a la media de España.

Como sucede con la acusada variabilidad espacial de la escorrentía, la irregularidad temporal es también muy significativa. Paralelamente a como se hizo con la pre-

cipitación, en la figura 109 se muestran los valores anuales de la aportación total media en régimen natural para la España peninsular en el período de 56 años comprendido entre 1940/41 a 1995/96, junto con la media para ese periodo (unos 111 km³/año).

Como es lógico, esta aportación de cada año ha de tener una estrecha relación con la precipitación de ese mismo año, tal y como efectivamente se constata con claridad en la figura 110.

No obstante, las irregularidades temporales de las precipitaciones parecen estar amplificadas ahora, como efectivamente se comprueba al contrastar los coeficientes de variación de ambas series, que veremos más adelante.

Más aún, la relación entre ambas variables a escala global y con dato anual no parece presentar estructuras de

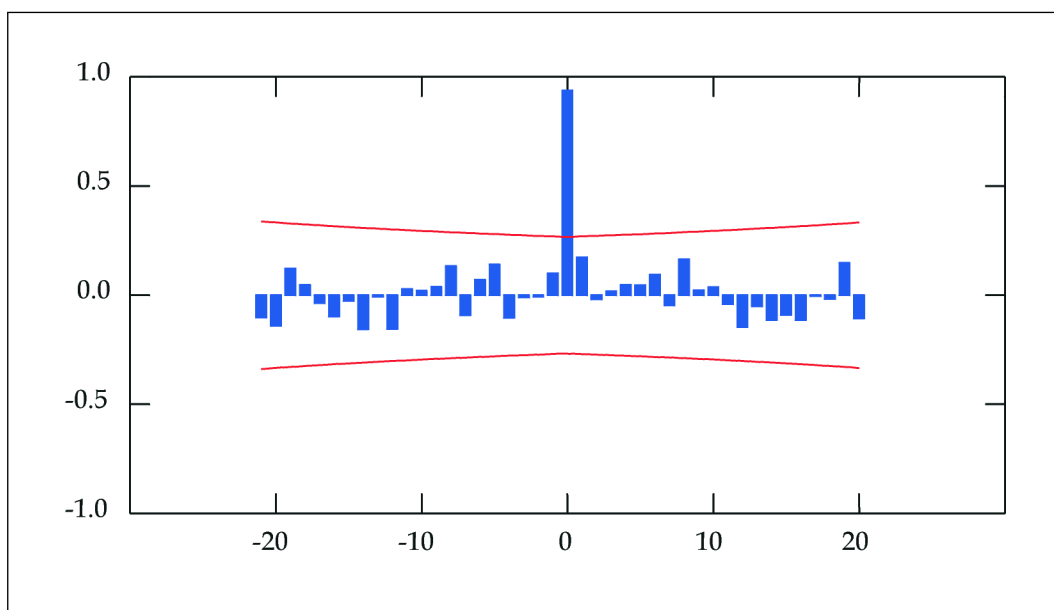


Figura 111. Correlación cruzada entre las precipitaciones y las aportaciones anuales en España en el periodo 1940/41-1995/96

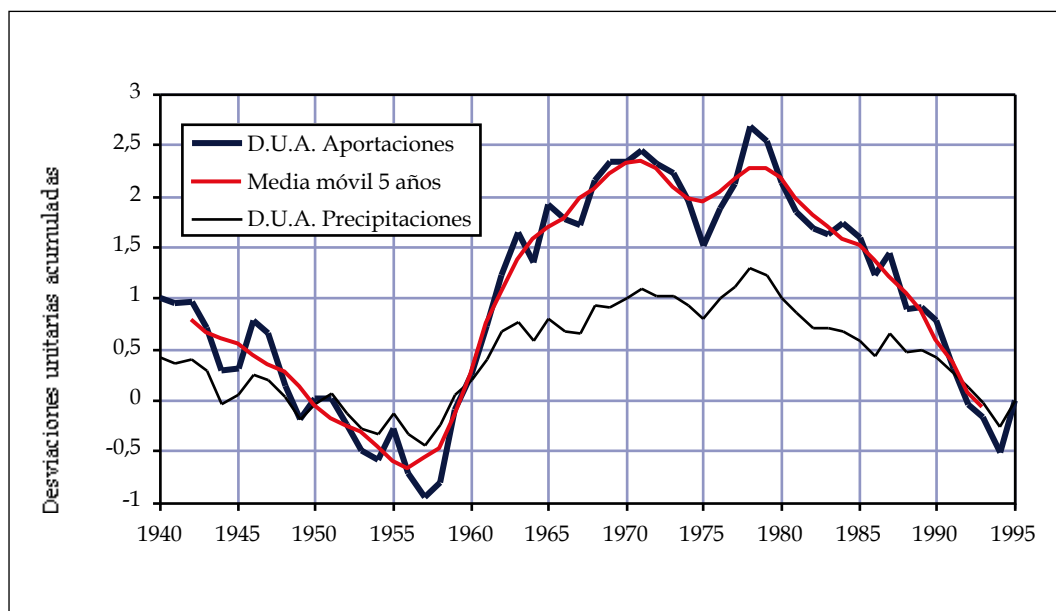


Figura 112. Rachas de la aportación total anual en España en el periodo 1940/41-1995/96, a partir de las desviaciones unitarias acumuladas

dependencia temporal más allá del año, tal y como puede verse en la figura 111, en la que se representa la función de correlación cruzada entre ambas variables junto con su nivel de confianza del 95%.

Como puede verse, existe una altísima correlación en el mismo año (que es la correspondiente al gráfico anterior), pero la influencia de la precipitación de un año sobre la aportación del siguiente no llega a ser significativa, aunque no está lejos de serlo, y, como era de esperar, no existe ninguna otra correlación significativa de ciclo más largo.

Análogamente, es previsible que las rachas secas y húmedas de aportaciones a escala peninsular presenten patrones similares a los de las precipitaciones que las generan. Para comprobar esta hipótesis se ha construido el gráfico de la figura 112, similar al ya ofreci-

do para las precipitaciones, mostrando la serie de desviaciones unitarias acumuladas, junto con su media móvil centrada de 5 años, y las desviaciones anteriormente obtenidas para las precipitaciones.

Puede verse que, a escala peninsular, las rachas de aportaciones secas y húmedas son, como era de esperar, las mismas que las de las precipitaciones medias, sin perjuicio, como antes, de las posibles diferencias territoriales.

Asimismo, y como en el caso de las precipitaciones, un aspecto de interés es el de la estructura de autocorrelación de las aportaciones anuales (es decir, las relaciones de dependencia de la aportación de un año con respecto a las de los años pasados). Para su contraste, la figura 113 muestra las funciones de autocorrelación y autocorrelación parcial de la serie, junto con sus intervalos de confianza.

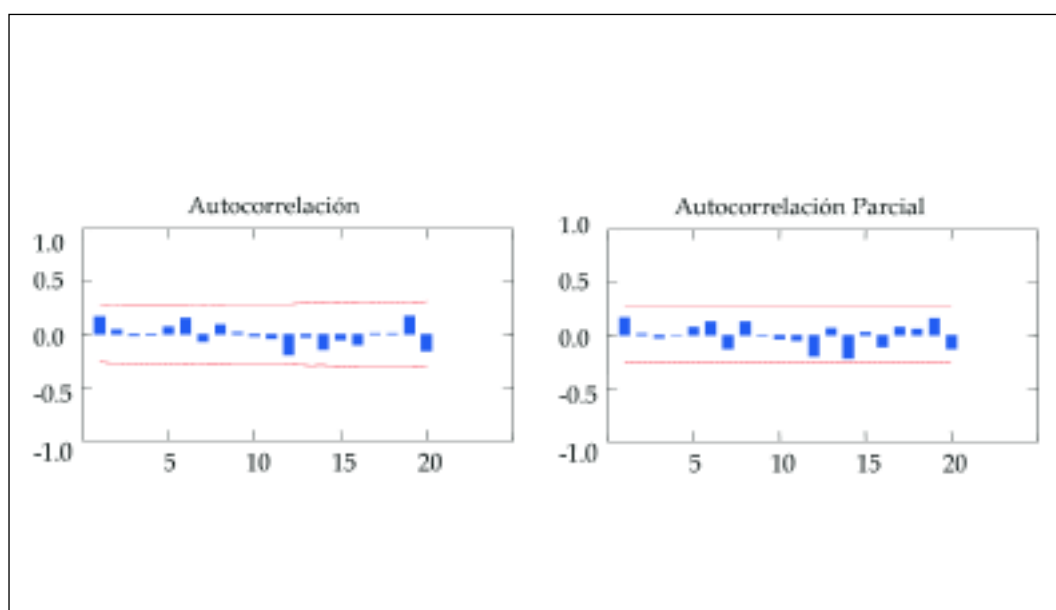


Figura 113. Funciones de autocorrelación y autocorrelación parcial de las aportaciones medias anuales en España en el periodo 1940/41-1995/96