

Regionalización y Caracterización de Sequías en Europa

JAVIER ÁLVAREZ RODRÍGUEZ (*)

RESUMEN Las sequías se han definido como fenómenos caracterizados por la escasez temporal de agua en una región. El presente trabajo expone los estudios realizados en la identificación de sequías a lo largo y ancho de Europa y en la regionalización previa. Fueron realizados como colaboración dentro del proyecto ARIDE (Assessment of the Regional Impact of Droughts in Europe), financiado por el IV Programa Marco para el Medio Ambiente y Clima de la UE.

REGIONALIZATION AND DROUGHT CHARACTERIZATION IN EUROPE

ABSTRACT Droughts have been defined as phenomena characterised by an unusual temporary scarcity of water in a region. This work is focussed on studying the occurrence of drought events at European scale through a previous regionalization. It has been developed for ARIDE (Assessment of the Regional Impact of Droughts in Europe) project funded by EC (Environment and Climate Programme implemented under the Fourth Framework Programme).

Palabras clave: Sequía; Regionalización; Precipitación.

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

El objetivo de este artículo es exponer los trabajos realizados por el CEDEX para la regionalización y caracterización de sequías a escala europea. Fue desarrollado dentro del marco de trabajos que comprendía el proyecto ARIDE (Assessment of the Regional Impact of Droughts in Europe), financiado por el IV Programa Marco para el Medio Ambiente y Clima de la UE. ARIDE fue coordinado por Universidad de Friburgo de Alemania y, aparte del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX, contaba con la colaboración de otros organismos como el Instituto de Hidrología Británico, hoy Centro de Ecología e Hidrología, Universidad de Geofísica de Oslo, Universidad Agronómica de Wageningen y el Instituto del Agua de Portugal, INAG. De entre sus objetivos destacan el desarrollo de bases de datos hidrológicas a escala europea, el análisis de factores hidrológicos relacionados con las sequías, así como la identificación de los procesos y factores climáticos relacionados con su ocurrencia en Europa, el estudio de persistencia y frecuencias, de su distribución espacial y de la definición de regiones climáticas homogéneas.

Las sequías se definen como fenómenos extremos naturales que provocan escasez temporal de agua en una región, que en el caso de los trabajos abordados, se definieron desde una escala europea. Por otro lado, desde el punto de vista de la planificación de recursos hídricos, interesa centrar los estudios dentro de escalas temporales mensuales y anuales.

El estudio de sequías necesita disponer de series hidrometeorológicas ordenadas en bases de datos como la precipi-

tación, temperatura, evapotranspiración, caudales, niveles piezométricos en los acuíferos, etc. Además, se les ha de exigir la condición de tener un periodo de registro de datos lo más dilatado posible para inferir conclusiones consistentes. En un trabajo de estas características cuyo marco de trabajo es el europeo, también se les ha de exigir que esos datos hayan sido recopilados a lo largo y ancho de ese territorio con una densidad de estaciones adecuada. Sin embargo, el acceso a bases de datos de estas características es difícil lo que restringe las posibilidades de investigación sobre regionalización e identificación de sequías.

Desde el punto de vista hidrológico sería de principal interés disponer de datos de caudales en régimen natural. Estos datos son escasos y es difícil encontrar una base de datos desarrollada con criterios homogéneos para toda Europa. Una posibilidad puede hallarse en la simulación de escorrentías a partir de modelos que reproduzcan el proceso lluvia-escorrentía utilizando las principales variables del ciclo hidrológico. Los modelos conceptuales pueden jugar un papel interesante en grandes territorios, pero surge la cuestión de la dependencia del esquema conceptual de funcionamiento del ciclo hidrológico y de las fórmulas utilizadas respecto a determinadas condiciones hidrometeorológicas. No obstante, conviene mencionar el trabajo desarrollado para la elaboración del *Libro Blanco del Agua en España* donde las escorrentías de todo el territorio español fueron simuladas utilizando un modelo distribuido conceptual y criterios homogéneos para su calibración bajo las diferentes condiciones climáticas existentes en España (MIMAM, 2000; Ruiz, 1999; Estrela et al., 1999).

En ARIDE se ha utilizado la base de datos creada por la *Unidad de Investigación del Clima (CRU, Climatic Research Unit)* de la *Universidad de East Anglia*. Esta base de datos

(*) Director de Programa de Simulación Hidrológica del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX del Ministerio de Fomento.

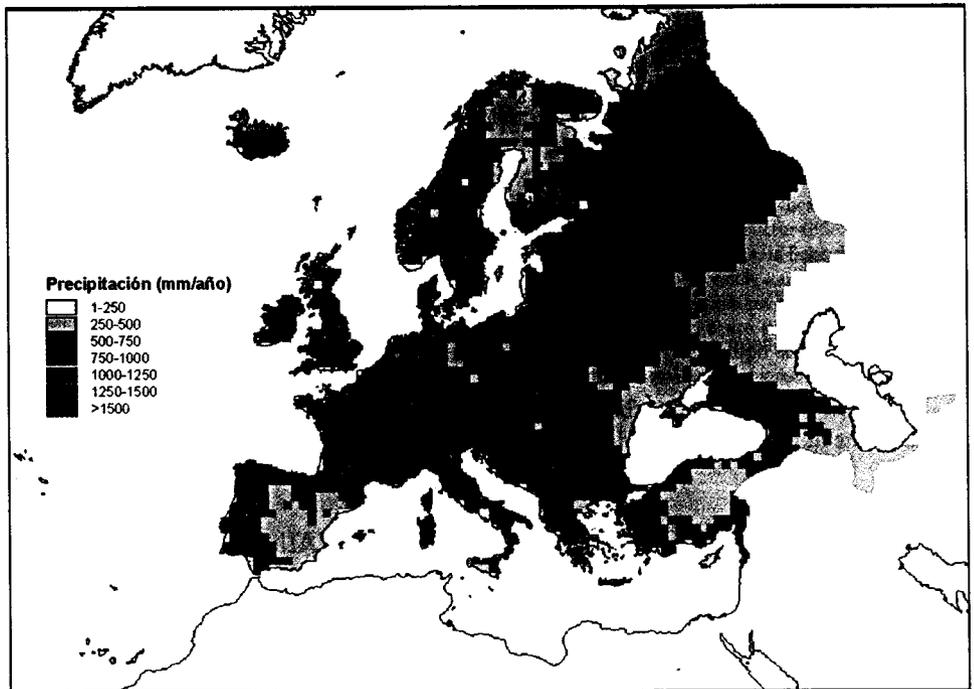


FIGURA 1. Lluvia media anual en Europa (1901-1996) estimada a partir de datos CRU.

fue desarrollada con propósitos científicos y comprende la estimación de mapas mensuales de distintas variables meteorológicas en toda Europa, desde principios del siglo XX hasta casi su final. Se seleccionaron las series de lluvia mensual por ser ésta la variable de entrada más importante en los sistemas hidrológicos y en las definiciones de sequías, restringiendo el alcance del estudio a lo que se denominan sequías meteorológicas (Hisdal et al., 1999).

En definitiva, la fuente de información utilizada fue la serie de mapas CRU de lluvia mensual en formato matricial, desde enero de 1901 hasta diciembre de 1996. Primeramente se realizaron contrastes básicos para validar su uso mediante contraste con las bases de datos meteorológicas europeas del programa FRIEND de UNESCO y del proyecto ARIDE. Como ejemplo, la Figura 1 muestra la lluvia media anual (1901-1996 en años naturales) europea estimada con los datos CRU.

Utilizando la información de las series de lluvia se puede conseguir una regionalización de Europa para la posterior identificación de sequías. Las regiones climáticas se obtuvieron partiendo de cuencas elementales de las que se toma como representativa su lluvia media areal. Las cuencas introducen un criterio hidrológico e implícitamente consideran el efecto orográfico en el clima. De las series de lluvia mensual de cada cuenca se filtraron tendencias y el ciclo estacional y, en función de la similitud entre unas y otras valorada mediante el coeficiente de correlación de Pearson, se agregaron cuencas elementales en otras mayores. Además, para la composición final de las regiones se utilizó de manera cualitativa la información sobre los ciclos estacionales.

Una vez definidas las regiones de trabajo, se les aplicó a cada una de ellas un modelo de identificación de sequías basado en la teoría de rachas, definiendo las principales variables asociadas. El trabajo se completó con la recopilación bibliográfica de información disponible sobre sequías históricas y su comparación con los resultados obtenidos. Todos estos puntos se detallan en los apartados siguientes.

2. UTILIZACIÓN DE LOS DATOS CRU

El desarrollo de esta base de datos constituye un esfuerzo para representar la variabilidad espacial y temporal del clima con criterios homogéneos para todo el mundo. La información está constituida por capas mensuales matriciales de resolución $0,5^\circ$ latitud/longitud desde 1901 a 1996. La base de datos CRU comprende el tratamiento de variables como la precipitación en la que se apoya el presente trabajo, la temperatura media, el rango de temperatura diurna, los días de lluvia, la presión atmosférica, la frecuencia de la nubosidad y la frecuencia de helada en superficie (New et al., 1998).

CRU obtuvo las capas matriciales derivando series de anomalías mensuales de las series de precipitación registradas en cada pluviómetro (New et al., 1998). Y a estas series se les aplicaron transformaciones logarítmicas que facilitaban el ajuste de superficies, obteniéndose capas interpoladas de anomalías. Finalmente, se combinaron las capas matriciales interpoladas con capas de precipitación media estimadas a partir de los datos registrados entre 1961 y 1990, realizándose un tratamiento explícito de la orografía. Para este trabajo se seleccionaron los pluviómetros con registros durante un periodo superior a 20 años entre 1961 y 1990. Posteriormente, este periodo de análisis se amplió a prácticamente todo el siglo XX. Como sus autores señalan, la técnica trata por separado los campos medios de precipitación y los campos mensuales interpolados de anomalías, bajo la hipótesis de que los primeros representan la estructura local del fenómeno, dependiente de factores fisiográficos, y los segundos, los esquemas de circulación atmosférica.

Antes de utilizar la información procedente del CRU se procedió a su comparación con las estimaciones realizadas por el CEDEX para el Libro Blanco del Agua en España (MIMAM, 2000). Las series de mapas precipitación mensual obtenidas en el último comprendían el periodo temporal entre 1940/41 y 1995/96 (años hidrológicos de España) estimadas mediante un algoritmo de interpolación por inverso distancia cuadrado con un tratamiento explícito del efecto

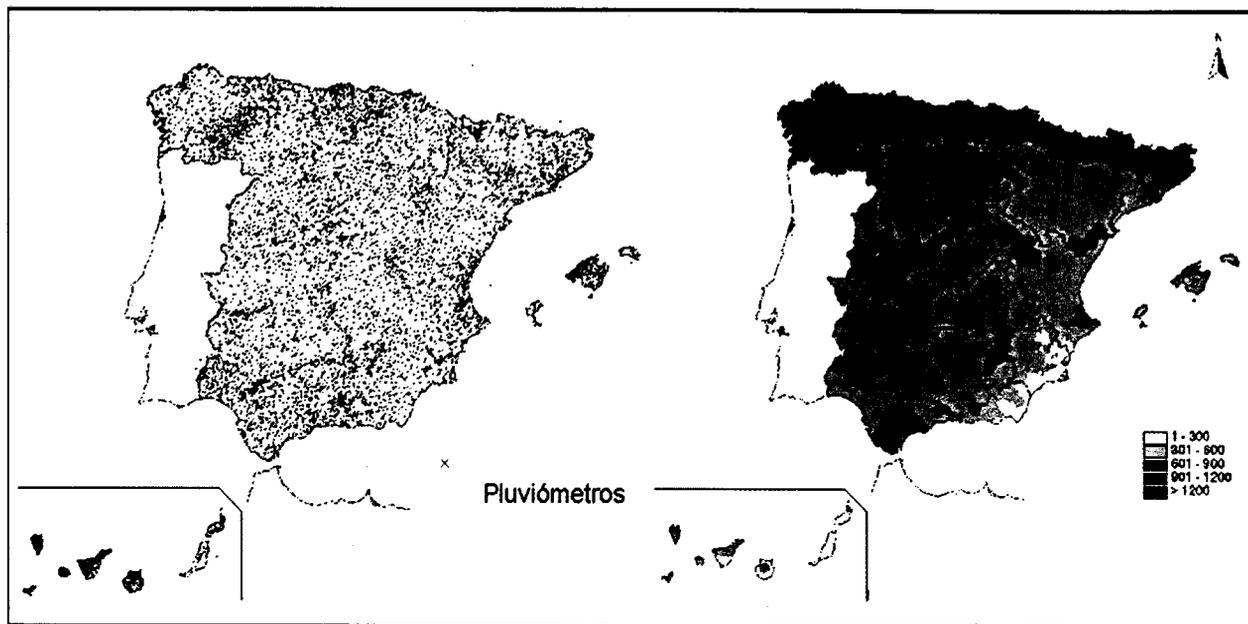


FIGURA 2. Red meteorológica utilizada (Instituto Nacional de Meteorología) y precipitación media anual en España según Libro Blanco del Agua (1940/41-1995/96).

orográfico (MIMAM, 2000). Para el cálculo de esta serie de mapas mensuales se utilizaron unas 5000 estaciones pluviométricas y la resolución final de esta serie de mapas mensuales es de $1 \times 1 \text{ km}^2$. (Figura 2). La fiabilidad de esta estimación es alta al compararla con la de CRU, que trabaja a una escala mayor y con un número muy inferior de pluviómetros

Los resultados de la comparación en valores medios areales se muestran en la figura siguiente donde se aprecia la diferencia de escala en valores totales de precipitación y la casi total coincidencia cuando se trata con valores normalizados, en los que se ha filtrado la escala en media y variabilidad. Los coeficientes de correlación entre las series son altos, como cabía esperar de la evolución similar señalada (coef. correlación de Pearson: 0,94; coef. correlación de Spearman: 0,95). El análisis espacial de las diferencias reveló que, además, éstas se debían al distinto tratamiento de los patrones de lluvia y orografía, mucho más detallado en el

caso de las series CEDEX de España, que pueden trabajar con una resolución de $1 \times 1 \text{ km}^2$. en vez de los $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ de la base CRU de ámbito mundial.

La representatividad de los datos en otras regiones de Europa también fue valorada. Para ello se recurrió a ponderar datos manejados por la Universidad de Oslo para obtener series de precipitación media anual en países como Dinamarca (Frinch et al., 1997) en el periodo 1961-1990 y con casi 300 estaciones. La universidad de Oslo también pudo proporcionar datos de otros países como Islandia, Irlanda, Bélgica, Holanda, Noruega, Suecia y Finlandia, entre el periodo 1890-1990, también recopilados por el mismo autor (Frinch et al., 1996), pero con densidades mucho menores, oscilando entre los 2.500 y $33.000 \text{ km}^2/\text{estación}$.

En el caso de Dinamarca el periodo de comparación se extiende desde 1961 a 1990. El ajuste entre las dos series es muy bueno, sobretudo al considerar que en la ponderación del CEDEX no se ha realizado ningún tratamiento explícito

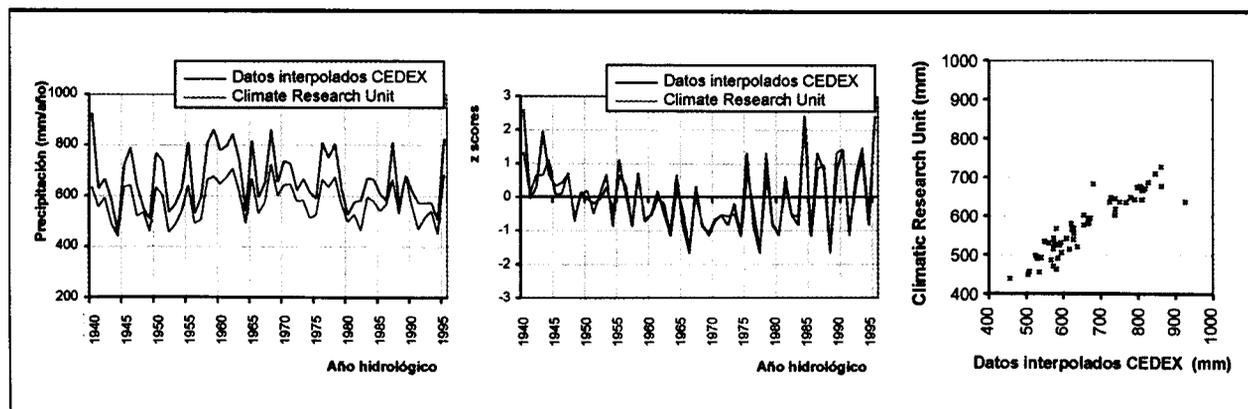


FIGURA 3. Series anuales de precipitación y de la variable estandarizada. Diagrama de dispersión entre series de precipitación en España.

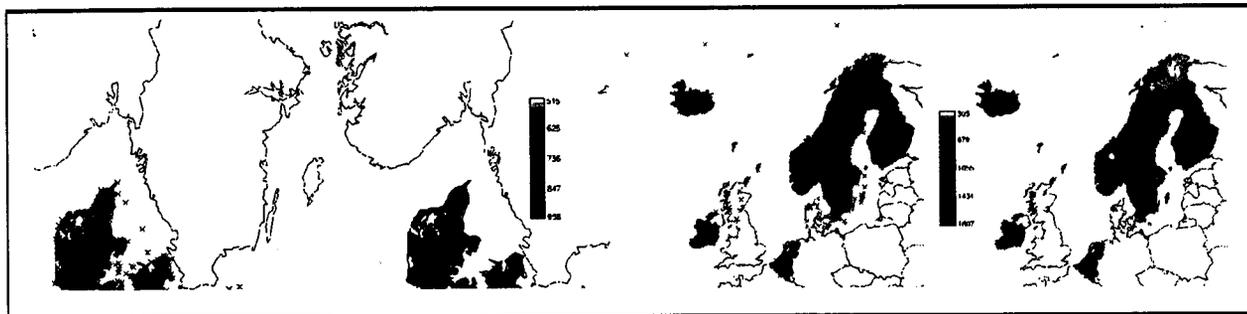


FIGURA 4. Red de pluviómetros daneses utilizada (Frinch P. et al., 1997) y precipitación media anual (1961/62-1989/90). Red meteorológica recopilada (Frinch P. et al., 1996) y estimación de la precipitación media anual en países del norte de Europa (1901/02-1989/90).

del patrón de precipitación en altura y únicamente se han considerado las relaciones existentes en la información recopilada. Solamente en los últimos años parece observarse alguna diferencia significativa entre las series, pero el acuerdo general es muy bueno. La razón que puede explicar el buen ajuste entre los datos es la densidad existente, más alta que en el caso de España, factor que puede tener mayor importancia que la utilización de un método u otro de interpolación. Cabe incluso sospechar si CRU está manejando los mismos 300 pluviómetros. Los coeficientes de correlación son también muy altos (coef. de correlación de *Pearson*: 0,98; coef. de correlación de *Spearman*: 0,95) aspecto que se refleja en el diagrama de dispersión.

En el caso de los países del centro y norte de Europa, el periodo de comparación abarcaba un número mayor de años, desde 1901 hasta 1990. Este último grupo de datos está constituido por series dispersas con un número mucho menor de

pluviómetros y lagunas en los datos lo que redundaba en la representatividad de los resultados obtenidos. No obstante, las comparaciones también arrojan buenos resultados (coef. de correlación de *Pearson* y *Spearman* en Suecia: 0,99; coef. de correlación de *Pearson* y *Spearman* en Bélgica: 0,98; coef. de correlación de *Pearson* y *Spearman* en Holanda: 0,96).

3. REGIONALIZACIÓN

Las sequías meteorológicas ocurren temporal y espacialmente de manera aleatoria, con diferentes intensidades y extensión en función de los patrones de circulación atmosférica (Figura 5). La caracterización de sequías tiene sentido en áreas o regiones por lo que la regionalización se convierte en un paso previo. La búsqueda de modelos similares de comportamiento a escala europea se podría llevar a cabo trabajando con los datos mensuales de lluvia desde 1901 hasta

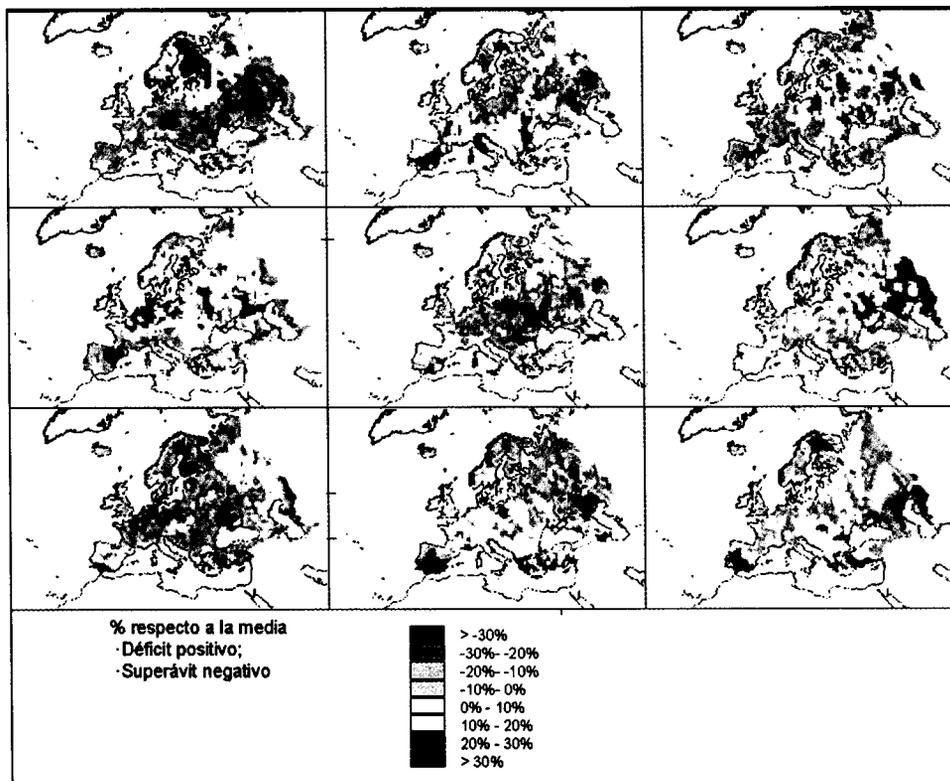


FIGURA 5. Mapas de déficit respecto al valor medio anual en Europa correspondientes a 1941, 1945, 1951, 1959, 1970, 1975, 1981, 1989 y 1992 (de izqda. a drcha.; de arriba abajo).



FIGURA 6. Principales cuencas europeas consideradas para la regionalización (fuente del modelo digital de elevaciones de Europa: USGS de EE.UU.).

1996 de CRU aplicando algoritmos que permitieran descubrir estos patrones regionales.

El objetivo anterior se facilita si se maneja una subdivisión de Europa en un número finito de áreas en las que pueda aceptarse que la evolución de la precipitación es homogénea. En cada una de estas áreas elementales se pueden obtener series de lluvia promediadas utilizando herramientas de los SIG a partir de las series mensuales distribuidas de CRU, desde enero de 1901 hasta diciembre de 1996. Cada una de estas series promediadas tendría una dimensión de 1.152 datos mensuales. Las regiones se formarían considerando las similitudes entre series representativas de cada área para ir formando áreas mayores hasta la definición final

de las regiones. Se consideraron finalmente 81 cuencas, áreas elementales sobre las que se valoraba la similitud entre series. Hay que decir que, a su vez, estas 81 cuencas elementales procedían de simplificar las 920 procedentes de EUROSTAT.

La similitud entre series de lluvia mensual promediadas en las cuencas puede valorarse usando los diagramas de dispersión y el coeficiente de correlación de Pearson. Los diagramas de dispersión proporcionan una idea cualitativa de las relaciones que existen entre dos series temporales dibujando los eventos contemporáneos, *i. e.* en un diagrama x-y donde el eje x es para una de las series y el eje y para el segundo (Figura 7). El coeficiente de correlación de Pearson

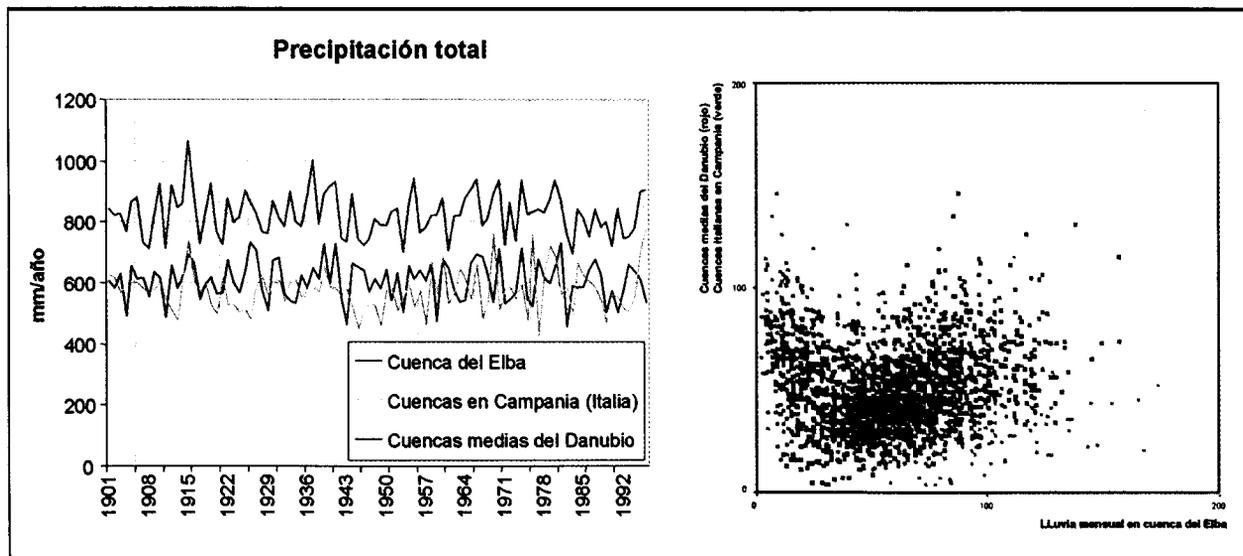


FIGURA 7. Series anuales de lluvia y diagrama de dispersión asociado.

es una herramienta estadística cuantitativa que describe la relación lineal entre dos variables.

Las series temporales de lluvia se pueden considerar formadas por diferentes componentes que afectan a la evaluación de similitudes. Al estudiar las series derivadas de los datos de CRU en las cuencas seleccionadas, aparece una tendencia de larga escala. Este término puede distinguirse de una fluctuación de duración plurianual y de un ciclo estacional anual. La descomposición de las series se completaría con la consideración de series aleatorias.

Las tendencias de larga escala y los ciclos estacionales reforzarán la correlación entre series debido a que introducen orden y regularidad en los datos. Este efecto ha de ser previsto para mejorar la comparación entre series temporales y filtrar sus causas hasta donde sea posible. Además, se puede justificar que una regionalización orientada a la caracterización de sequías debería filtrar estos componentes previamente ya que no están ligados esencialmente a ella. Una tendencia de larga escala estaría relacionada con tendencias sostenidas en el clima, por ejemplo con la aridez que haría dominantes los periodos secos en una región. La variación estacional tiene que ver con la sucesión natural de periodos húmedos y secos y, aunque puede agravar los efectos de una sequía, pueden considerarse independientes a ésta. No obstante, y como este aspecto es discutible, en la regionalización final se consideró también la similitud entre ciclos hidrológicos medios anuales resultantes para subdividir las regiones previamente definidas utilizando como medida de similitud el coeficiente de correlación de Pearson entre series de residuos una vez filtradas las componentes estacionales y de tendencia.

Para identificar las tendencias de larga escala se utiliza un modelo de mínimos cuadrados que ajusta linealmente esta tendencia al ciclo total de 96 años (Figura 8). Una vez estimados los términos de la ecuación de regresión, a y b , la

tendencia se filtra atendiendo a la siguiente expresión, donde $fecha_{i,j}$ representa el orden mensual de la serie $x_{i,j}$ y los subíndices i y j representan los meses y años de la serie, respectivamente.

A continuación, se identifican los ciclos estacionales de los datos de lluvia mensual por su media y desviación típica mensual (Figura 9) y se utiliza una transformación clásica propuesta por diferentes autores (Salas et al., 1985), donde μ_i y σ_i son la media y desviación típica del mes i .

Los coeficientes de correlación obtenidos entre las series mensuales de anomalías reflejan las relaciones que existen entre las cuencas. Son mayores entre cuencas cercanas debido a que se encuentran sometidas a patrones de circulación atmosférica comunes y, a medida que se estudian los coeficientes de correlación entre cuencas más alejadas, se observa que ésta se va perdiendo. Como ejemplo ilustrativo se puede destacar el elevado número de coeficientes de correlación casi nulos o incluso negativos obtenidos entre cuencas mediterráneas españolas, portuguesas o griegas con cuencas del centro y norte de Europa, resaltando las diferencias climáticas existentes entre países meridionales y septentrionales. Entre cuencas del sudeste español como las del río Júcar y Guadalquivir se alcanza un coeficiente de correlación de Pearson alto (0,79). Disminuye entre la cuenca del Júcar y otras cuencas atlánticas de la costa portuguesa situadas en el punto opuesto de la península Ibérica (0,24). La disminución es ya considerable cuando se repara en la correlación existente entre la cuenca del Júcar y cuencas de la costa noruega (-0,26).

Hay diversos factores relacionados con la estructura de correlación obtenida como las barreras orográficas, la proximidad al mar y los efectos continentales. Como ejemplo del primer factor, se puede comentar el efecto climático que impone la cadena montañosa escandinava cercana a la costa.

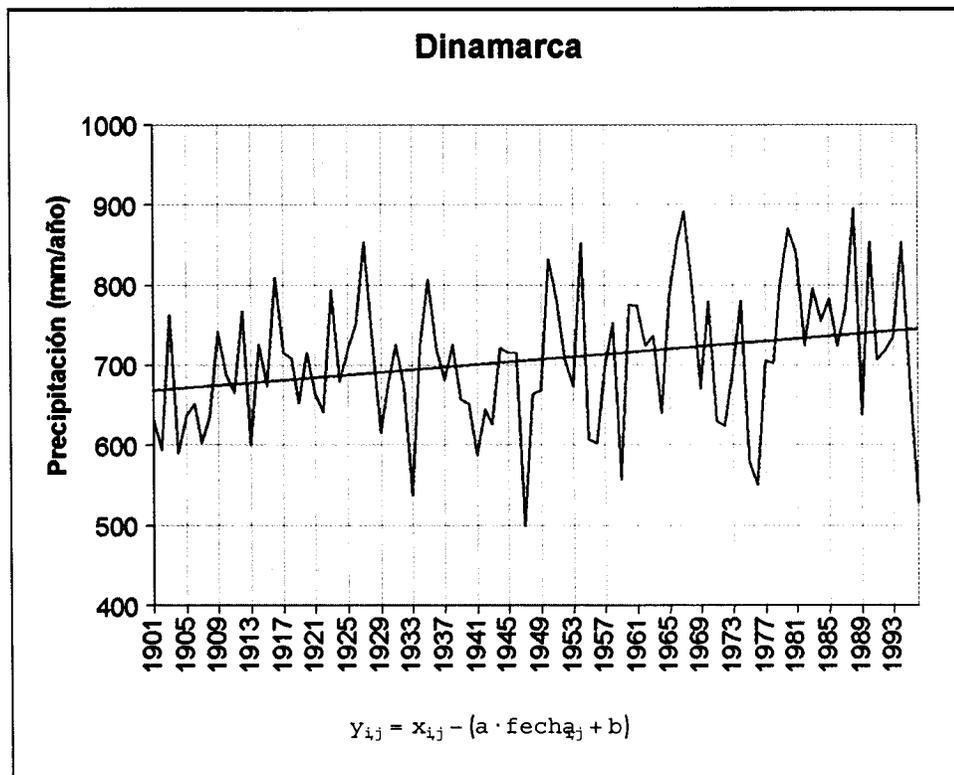


FIGURA 8. Tendencia de larga escala y ciclo estacional en cuencas danesas.

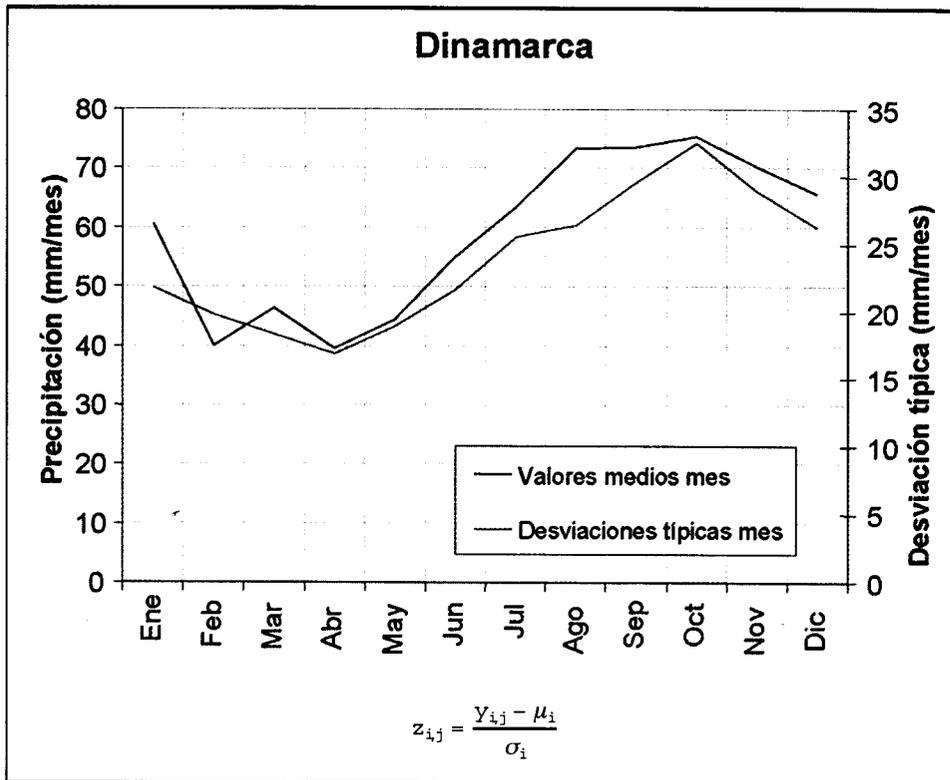


FIGURA 9. Una vez obtenidas las series de anomalías en las cuencas europeas seleccionadas, se pasa a su agrupamiento utilizando como medida de similitud el coeficiente de correlación de Pearson.

Este factor crea una diferencia climática considerable entre las cuencas de un lado y otro de esta divisoria que se refleja en los coeficientes de correlación estimados.

En el Mediterráneo la estructura de correlación parece tener una dimensión espacial más reducida que la existente en regiones continentales del norte. Esto puede deberse a rasgos climáticos propios del mar Mediterráneo donde los efectos de ciclogénesis son significativos, especialmente en la

zona del golfo de Génova y de Chipre. El mar Mediterráneo se sitúa bajo la influencia de los vientos del oeste Atlánticos y los sistemas de presión Asiáticos, pero el mencionado efecto puede cambiar la circulación zonal en otra celular o meridional (Wallen, 1970). Estos factores podrían explicar las importantes diferencias existentes entre los coeficientes de correlación de cuencas de Turquía y de las cuencas de la costa mediterránea española.

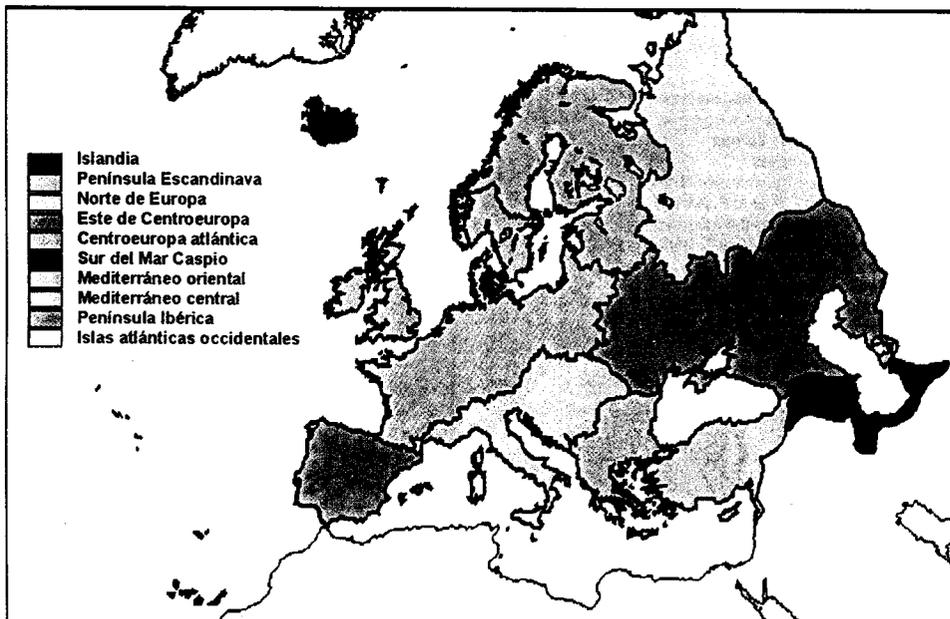


FIGURA 10. Procedimiento de agrupación y regionalización considerando las series de anomalías.

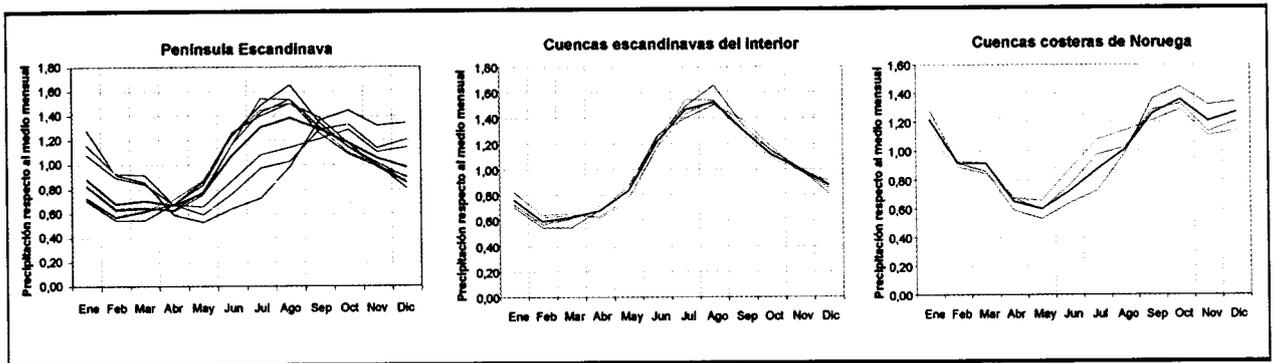


FIGURA 11. Ciclos anuales en las cuencas pertenecientes a las regiones definidas.

Las cuencas costeras atlánticas del norte de Europa muestran similitudes de mayor extensión que las que muestran las del sur. Como se esperaba, las cuencas de Inglaterra, Escocia, Gales e Irlanda forman un grupo consistente. También aparecen similitudes que se pueden relacionar con las características climáticas que impone el Océano Atlántico en cuencas del norte de Francia, de los Holanda, de la costa atlántica de Alemania y de ciertas partes de Dinamarca, Noruega y Suecia. Por último, debe mencionarse el pronunciado aislamiento de las cuencas de Islandia respecto a otras europeas. La aplicación de la técnica anterior permite resumir en 10 grupos el conjunto inicial de 81 series.

Hasta ahora sólo se ha considerado la correlación de la evolución de anomalías para la definición de regiones. Esta secuencia anual entre meses húmedos y secos constituye otro criterio para la definición de regiones climáticamente homogéneas. Además, el ciclo estacional influye en la evolución de las sequías ya que puede intensificar variables como el déficit, su duración, etc. La manera en que se consideró esta información sobre los ciclos estacionales de las cuencas euro-

peas en la regionalización definida anteriormente fue distinguir subregiones con ciclos anuales similares.

En la mayoría de las regiones se encuentra un buen acuerdo en la correspondencia de ciclos anuales. En Islandia, se alcanzan los máximos en octubre, mientras los valores de lluvia mínimos ocurren en mayo. Un ciclo similar se encuentra en las cuencas de la mayor parte de la península Escandinava. Los valores máximos suceden entre agosto y octubre dependiendo de la situación de la cuenca. En las cuencas atlánticas se alcanzan los valores mínimos en mayo y, de febrero a marzo, si las cuencas están a sotavento de la cordillera Escandinava. Este desplazamiento sugiere mejorar la regionalización distinguiendo entre cuencas a barlovento y cuencas a sotavento de la cadena montañosa.

La Figura 12 muestra el mapa con la regionalización final. Combina el análisis de la correlación de anomalías y el estudio de ciclos anuales de cada una de las cuencas consideradas.

De acuerdo con la regionalización obtenida en función de los datos de CRU, se obtienen algunos estadísticos descriptivos de los valores medios de precipitación en las regiones y

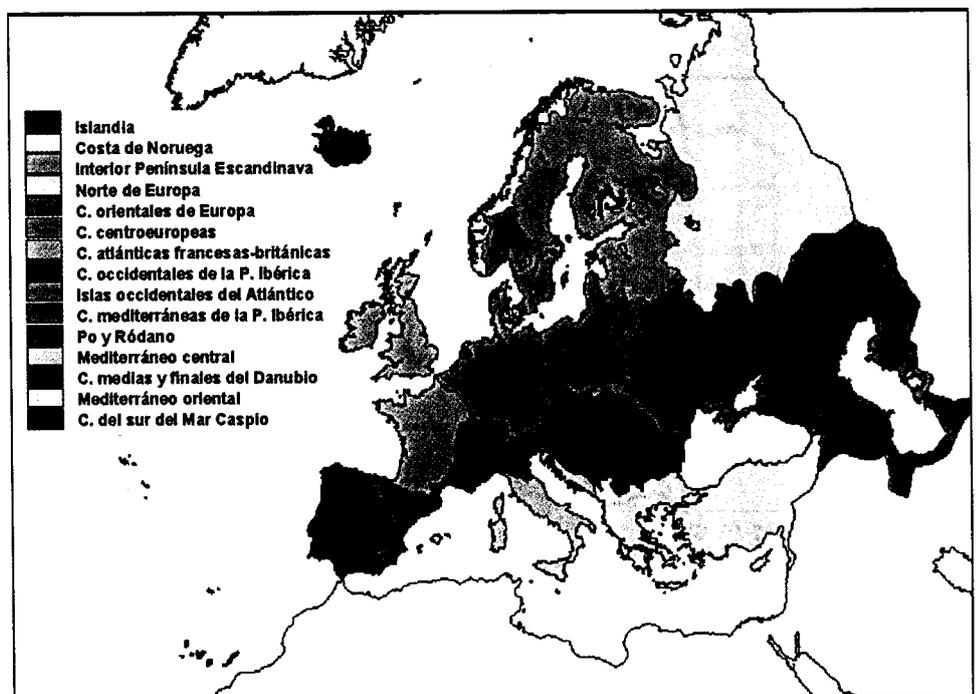


FIGURA 12. Regionalización final.

de su variabilidad que resaltan las diferencias existentes entre ellas (Tabla 1).

4. IDENTIFICACIÓN DE SEQUÍAS EN EUROPA

Existen diferentes metodologías aplicables a la identificación y caracterización de las sequías y sus principales variables

asociadas (Hisdal et al., 1999; Menéndez, 1995; Cancellieri et al., 1995). Entre ellas destacan las basadas en la aplicación de índices de sequía y las basadas en la teoría de rachas y la detección de sequías estableciendo valores umbral definidos del análisis de los registros hidrológicos existentes.

Las metodologías basadas en los índices de sequía utilizan una fórmula conceptual que valora las condiciones anó-

| | Media | Mediana | Máximo | Mínimo | p25% | p75% | Coefficiente de variación |
|---|-------|---------|--------|--------|------|------|---------------------------|
| Islandia | 985 | 983 | 1206 | 750 | 928 | 1035 | 0,10 |
| Cuencas costeras de noruega | 1271 | 1248 | 1562 | 1036 | 1192 | 1326 | 0,09 |
| Cuencas escandinavas del interior | 572 | 570 | 695 | 442 | 543 | 607 | 0,08 |
| Cuencas del norte de Europa | 562 | 567 | 659 | 458 | 532 | 587 | 0,07 |
| Cuencas orientales de Europa | 445 | 446 | 544 | 356 | 411 | 473 | 0,09 |
| Cuencas centroeuropeas | 690 | 695 | 813 | 570 | 640 | 728 | 0,08 |
| Cuencas atlánticas francesas y británicas | 889 | 886 | 1067 | 669 | 838 | 944 | 0,09 |
| Cuencas occidentales de la península Ibérica | 646 | 636 | 917 | 495 | 571 | 695 | 0,14 |
| Islas occidentales del Atlántico | 209 | 207 | 375 | 138 | 181 | 228 | 0,19 |
| Cuencas mediterráneas de la península Ibérica | 502 | 499 | 680 | 380 | 456 | 541 | 0,13 |
| Cuencas del Po y Ródano | 1093 | 1098 | 1329 | 784 | 1041 | 1152 | 0,08 |
| Cuencas del Mediterráneo central | 724 | 717 | 919 | 529 | 678 | 771 | 0,09 |
| Cuencas medias y bajas del Danubio | 767 | 761 | 964 | 649 | 718 | 814 | 0,09 |
| Cuencas del Mediterráneo oriental | 601 | 597 | 719 | 461 | 572 | 632 | 0,08 |
| Cuencas del sur del mar Caspio | 394 | 396 | 526 | 293 | 369 | 420 | 0,09 |

TABLA 1. Principales estadísticos de las regiones encontradas.

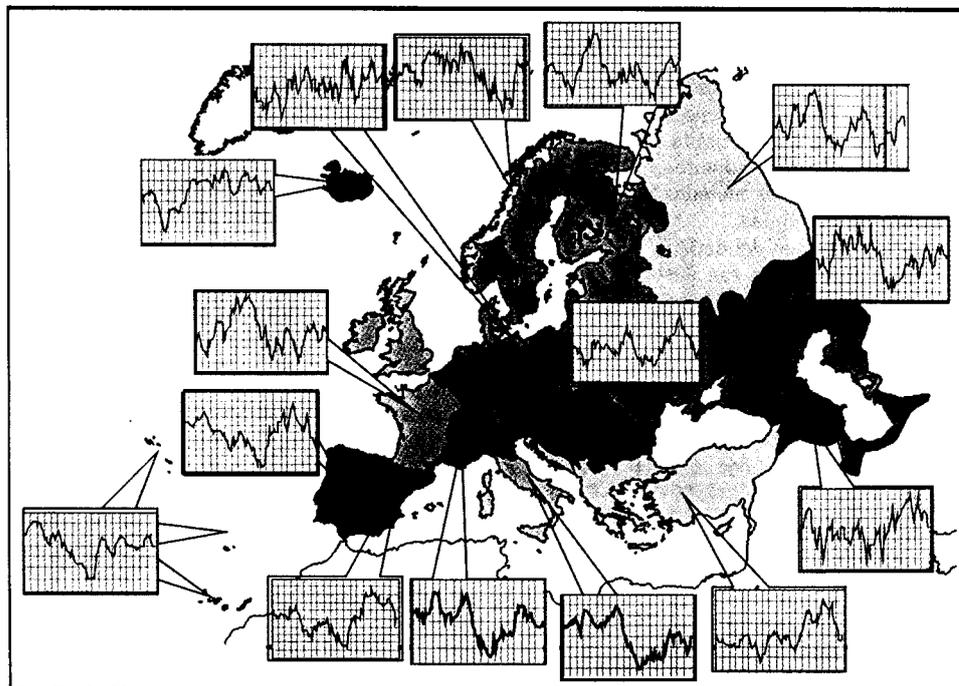


FIGURA 13. Gráficas de evolución de las desviaciones unitarias acumuladas en las regiones definidas.

malas de humedad durante una sequía. Con el índice de *Palmer* se estima así la severidad, el inicio y fin de sequía utilizando los datos mensuales de precipitación, evapotranspiración potencial según el método de Thornthwaite y la humedad del suelo.

La teoría de rachas define las sequías en función de la serie

$$y_i = x_i - d_i$$

donde x_i es el recurso y d_i la demanda en el momento i . Se denomina racha a la secuencia de observaciones de la misma clase precedidas y sucedidas por observaciones de clase diferente (Estrada, 1996). El número de observaciones consecutivas de la misma clase es la longitud de la racha. Las sequías se definen como las secuencias de años secos y las variables asociadas a cada sequía son su duración, la severidad o el déficit acumulado, la intensidad o el déficit medio, obtenido como cociente entre severidad y longitud, y el déficit máximo alcanzado durante la sequía respecto al valor de referencia.

De forma similar al tratamiento anterior se puede definir sobre una serie hidrológica un umbral de corte que permita definir rachas de sequía. El umbral de definición de la sequía se podría definir en función del valor medio, pero considerando a las sequías como situaciones extremas, distintas de periodos con recursos reducidos que de forma natural sufre el sistema, se recomienda fijar un umbral entre los percentiles del 90% y 70% de la curva de valores clasificados (Hisdal, 1999), variable (análisis de series mensuales) o fijo (series anuales sin estacionalidad).

Los déficit se definen con referencia a un umbral que dependería de la demanda de agua y de la capacidad del sistema para abastecerla. Una simplificación utilizada es tomar el valor medio de la serie hidrológica.

El estudio de sequías identificadas según estos modelos se completa con el ajuste del modelo de distribución de variables como déficit y duraciones. Las series correspondientes a ellas pueden analizarse como series de duración parcial (serie de datos seleccionados cuya magnitud es inferior al valor umbral elegido) o como series de excedencia anual (serie de datos seleccionados de dimensión igual al número de años del periodo de análisis).

Al identificar sequías mediante umbrales suele suceder que aparecen cortos periodos húmedos entre otros de escasez que hacen que la sequía identificada aparezca fragmentada. Quedan entonces identificadas sequías cortas y dependientes (Tallaksen, 1997). Se plantean entonces diferentes métodos que puedan unificar de alguna manera estas sequías.

Con el criterio de recuperación de un volumen del déficit acumulado, la sequía comienza cuando la variable cae por debajo del valor umbral y continúa hasta que el superávit no supera un porcentaje sobre déficit total acumulado o cuando el intervalo de tiempo transcurrido entre ellas es menor que uno mínimo fijado (Tallaksen, 1997).

El criterio de la media móvil trabaja con las medias móviles de la serie original, que se comparan con el valor umbral y el valor de referencia para contabilizar déficit.

$$y_i^k = \frac{1}{k} \sum_{t=i}^{i+k-1} x_t$$

Siendo y_i^k la serie de medias móviles de orden k en el instante t y x_t la serie original. Con esta técnica se filtran los picos y las sequías se agregan, pero no permite una definición precisa del principio y fin de sequía. El orden de la

serie de medias móviles debería elegirse teniendo en cuenta la capacidad de regulación del sistema puesto que representa el tiempo que transcurre desde el intervalo t de inicio de la sequía hasta el $t+k-1$ en el que los efectos del mismo se han hecho relevantes para el sistema. Los valores habituales oscilan entre 3 y 12 con series mensuales (Menéndez, 1995).

El criterio de caudales acumulados o algoritmo del pico siguiente compara el valor acumulado de la variable con otro valor acumulado de referencia, generalmente en función de la media de la serie considerada (Menéndez, 1995), por ejemplo un porcentaje de la misma. La sequía se inicia al alcanzarse un cierto déficit entre ambos, terminando al recuperarse dicho déficit. De acuerdo con la formulación expuesta por Tallaksen, 1997, el método se expresa como:

$$w_i = \{w_{i-1} + q_0 - q_i > 0, w_{i-1} + q_0 - q_i, 0\}$$

Siendo w_i el déficit acumulado en el instante i , q_0 el valor de referencia y q_i el valor de la variable en el instante i . Como valor representativo del déficit de una sequía se toma el máximo de los ocurridos durante una sequía y como duración, la ocurrida hasta ese instante de máximo déficit acumulado a partir del cual se inicia la recuperación. Dos sequías son entonces acumuladas en una si no se ha recuperado totalmente el déficit de la anterior.

Este último método muestra similitudes con el criterio de recuperación del déficit acumulado, pero es importante destacar que a diferencia de éste, el déficit se hace depender de los valores anteriores y posteriores a la sequía al tratar con series acumuladas (Tallaksen, 1997).

Para el desarrollo de este apartado se ha escogido identificar el inicio de sequías mediante la selección de un umbral mensual o *nivel crítico* como un percentil de la curva de lluvias clasificadas de cada mes. En la evolución de la sequía se acumula un déficit hasta que se da un determinado superávit sobre la media mensual (criterio de recuperación de un volumen del déficit acumulado). Este superávit se valora en función de un porcentaje de recuperación, *parámetro crítico*, técnica que permite agrupar sequías menores en una única. Finalmente, las sequías de duración igual a 1 mes no se han considerado.

Una vez identificadas las sequías de cada región, se puede utilizar una serie de variables para caracterizar el fenómeno (Tallaksen, 1997; Estrada, 1996; Yevjevich, 1983). Estas variables dependen del umbral y porcentaje de superávit seleccionado por lo que también pueden utilizarse para su parametrización. En este trabajo se presta la atención a:

- Número de sequías identificadas, nd . Esta variable tiene una especial relevancia durante el proceso de parametrización ya que controla el efecto de agrupamiento entre sequías menores.
- Déficit máximo y medio. Los déficit se definen como el valor acumulado mensual de cada sequía, s_i . De éstos se selecciona el valor máximo que también facilita la parametrización del modelo y caracterización de las sequías de una región. El valor medio se obtiene dividiendo la suma total de déficit por el número total de sequías identificadas.

$$\bar{s} = \frac{\sum_{i=1}^{nd} s_i}{nd}$$

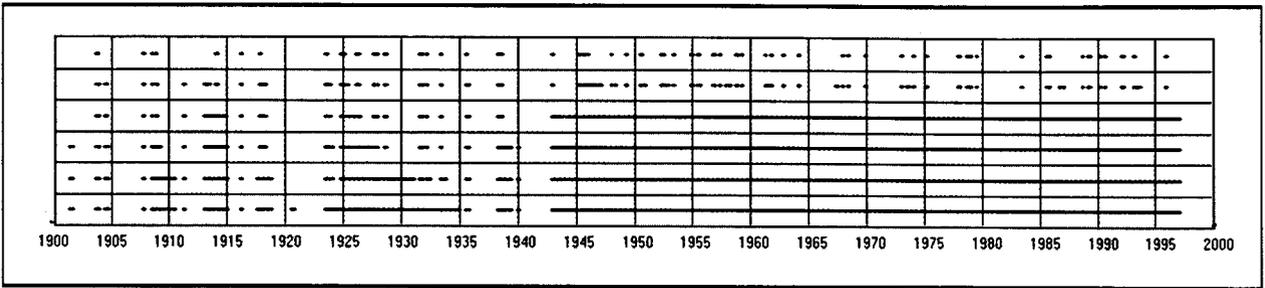


FIGURA 14. Efecto del parámetro crítico en la agregación de sequías (valores de 0,0, en la parte superior del gráfico, a 0,5, en la inferior).

• Duración máxima y media. La duración se define como el tiempo que dura una sequía desde su inicio hasta la recuperación del porcentaje de déficit sobre la media, d_i . El momento de recuperación depende del valor dado al parámetro crítico, cuya calibración depende también de las duraciones máximas identificadas. Es decir, este parámetro ha de ser consistente con la necesidad de agrupar sequías menores y no generar sequías excesivamente largas. El valor medio de la duración se obtiene dividiendo la suma de duraciones identificadas por el número total de sequías.

$$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^{nd} d_i}{nd}$$

Las sequías identificadas son función del valor adoptado para el parámetro crítico y del umbral que define el inicio de sequía. Para este trabajo se ha estudiado la posibilidad de calibrar estos parámetros en función de los datos disponibles en las regiones definidas.

Con carácter general, valores bajos del parámetro crítico suponen identificar mayor número de sequías. Al aumentar el valor del parámetro crítico, la duración media de las sequías en cada región aumenta y el número de eventos queda reducido debido al efecto de agrupación (Figura 14). El déficit medio muestra comportamientos diferentes en función del valor del parámetro crítico. Suele mostrar una ligera tendencia ascendente para valores bajos del parámetro crítico, pero llegado a un valor del déficit inicia decrementos conforme aumenten los valores del parámetro crítico.

En el comportamiento del déficit medio parecen influir dos fenómenos opuestos. En primer lugar la agregación de sequías implica que el déficit medio crece como cociente entre déficit y número de sequías identificadas. Por otro lado al crecer el parámetro crítico, se engloban periodos con superávit. Estos dos aspectos opuestos dificultan la utilización de esta variable para parametrizar el modelo.

La calibración del umbral y parámetro crítico resulta más sencilla si se apoya en el número de sequías identificado, su déficit máximo y la duración máxima en cada región. Estas variables siguen patrones comunes en todas las regiones en función de los parámetros anteriores. El número de sequías

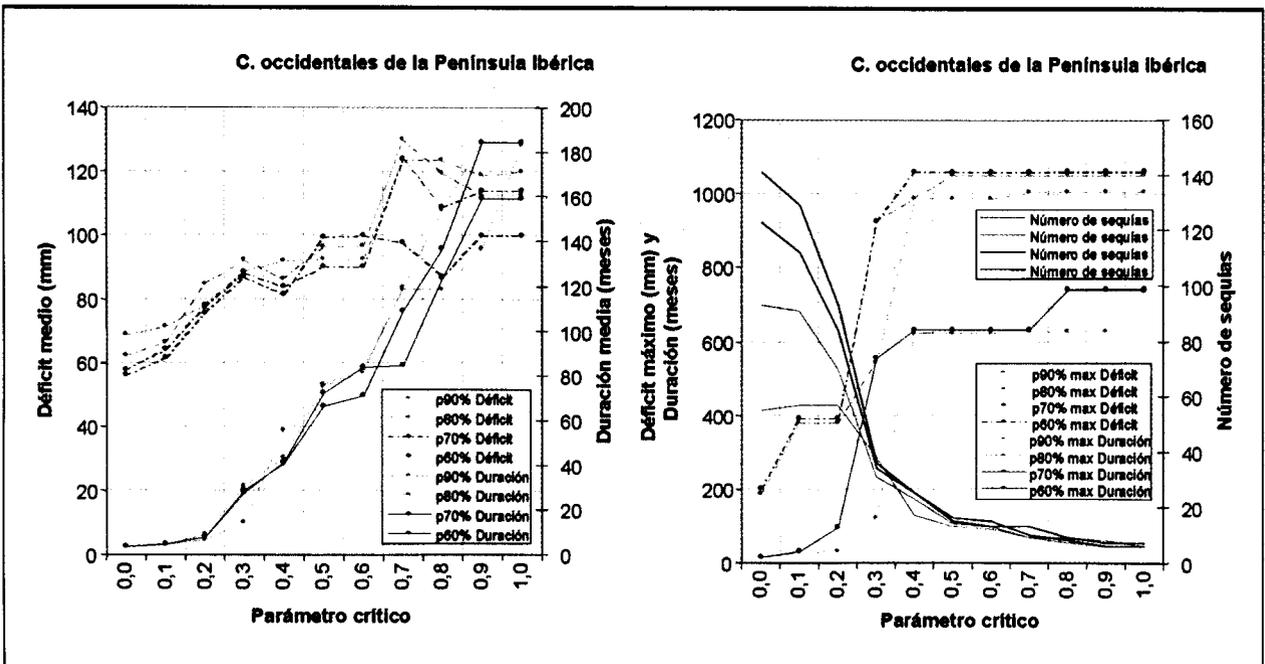


FIGURA 15. Gráficos de evolución de las variables déficit, duración y número de sequías para las cuencas occidentales de la península Ibérica.

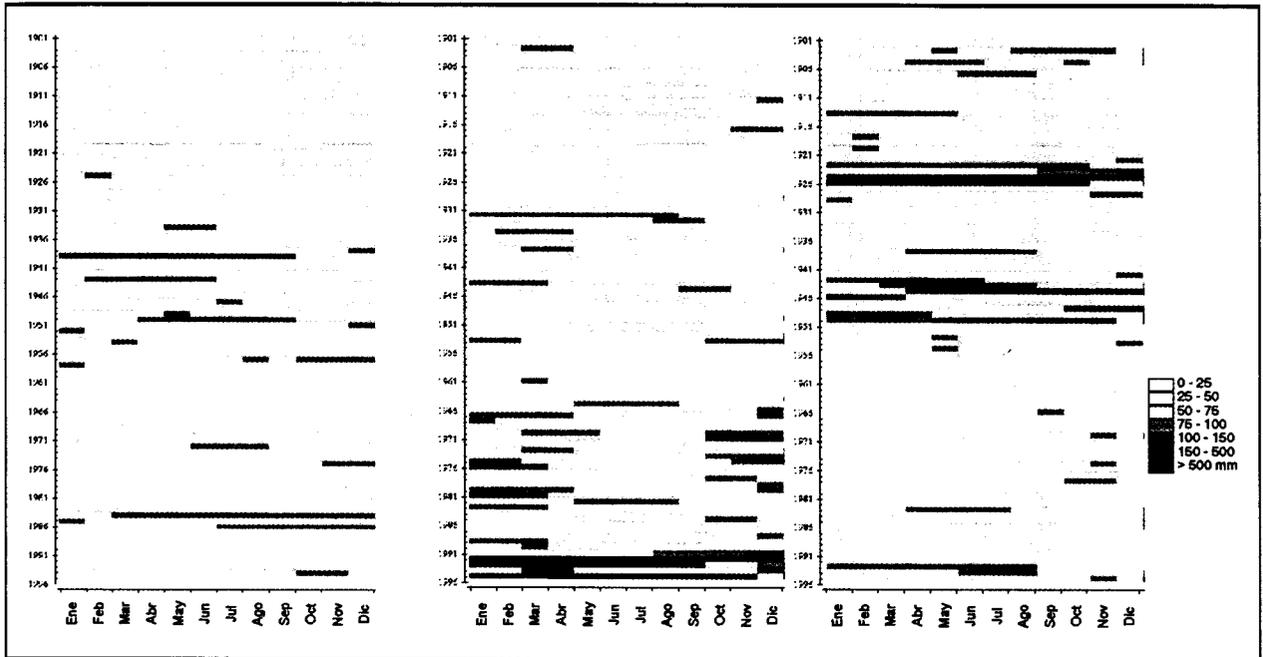


FIGURA 16. Evolución de déficit en cuencas orientales de Europa y mediterráneas de la Península Ibérica.

identificadas presenta una tendencia descendente en todos los casos. El déficit y duración máxima de sequía tienen tendencia ascendente y parecen relativamente insensibles al umbral seleccionado. El cambio de pendiente registrado entre los valores $0,1$, $0,2$ ó $0,3$ orienta la selección del valor del parámetro crítico. En las figuras siguientes se muestran las relaciones entre las variables mencionadas y los parámetros del modelo. En el eje x se encuentran los valores del parámetro crítico y en el eje y se representa cada una de las variables mencionadas. La gama de curvas de cada variable representa su evolución para diferentes umbrales.

Las siguientes figuras muestran la evolución de los déficit de sequías identificadas en cada región. El eje x representa la evolución mensual de cada año, que aparecen ordenados en el eje y . Estas evoluciones han sido obtenidas utilizando parámetros de calibración comunes. El nivel crítico se seleccionó en el 90% de la serie de lluvias clasificadas. El valor óptimo del parámetro crítico estaría entonces alrededor de $0,1$ donde ocurren cambios significativos en la evolución de las variables resaltadas por un excesivo efecto de agregación entre sequías menores. En ciertos casos podría escogerse valores entre $0,2$ y $0,3$ pero los resultados de identificación de sequías a escala europea no varían excesivamente si se toma $0,1$ para todas las regiones. Los déficit se han establecido sobre la media lo que puede ser una condición pésima para generar déficit elevados con la consiguiente dificultad para su recuperación.

Las gráficas anteriores muestran cierta dispersión entre las sequías identificadas en cada una de las regiones. No obstante, del análisis de similitud entre las series binarias de sequías ocurridas en cada una de las regiones (1 : estado con sequía; 0 : estado sin sequía) se infiere el predominio de cierta concurrencia entre determinadas regiones que subrayan sus relaciones de vecindad, tal como era de esperar. Es decir, se conservan relaciones de vecindad entre regiones reflejando la ocurrencia de determinadas sequías que afectan a más de una región.

Las medidas de similitud entre cada dos series binarias valoran el número de concurrencias con y sin sequías respecto al total de sucesos. El mayor grado de similitud se da entre cuencas del Mediterráneo central y Danubio y entre cuencas atlánticas y las del Po y Ródano. Si se ordenan estas concurrencias con criterios del *cluster* para obtener una visión global aparecen grupos formados por cuencas del Mediterráneo central y cuencas medias y bajas del Danubio e incluso del Mediterráneo oriental. El Mediterráneo occidental en la península Ibérica da el mayor acuerdo con las cuencas atlánticas de la península Ibérica. Las cuencas del Po y el Ródano, con las cuencas atlánticas francesas y británicas a las que se añade el resto de centro europeas. Entre las cuencas escandinavas y costeras noruegas también aparece una similitud mantenida con diferentes medidas. Lo mismo ocurre entre las regiones del norte y este de Europa. No obstante, se puede tener como referencia que permita valorar la concurrencia de sequías detectadas que solamente en el caso de las cuencas del Danubio con las del Mediterráneo central se alcanza escasamente el 50% de meses con sequía del primero respecto al total del segundo grupo. Lógicamente los límites de ocurrencia de sequías derivados de la regionalización no son estrictos sino que en determinados casos las sequías se esparcen por varias regiones a la vez. La Figura 5 mostraba ejemplos de sequías anuales que abarcaban varias regiones al mismo tiempo.

Pueden surgir dudas respecto a que los anteriores resultados han sido obtenidos con series a las que se han filtrado las tendencias lineales que aparecían en los datos de *CRU*. Inicialmente cabría plantearse que pueden deberse a efectos naturales o a la disponibilidad y tratamiento de datos. No obstante, si se tratara de efectos naturales, una tendencia decreciente durante 96 años no sólo se relacionaría con las sequías, más frecuentes en los últimos años, sino también con procesos distintos como la aridez. Para una aplicación consistente de la teoría de rachas a las series de precipita-

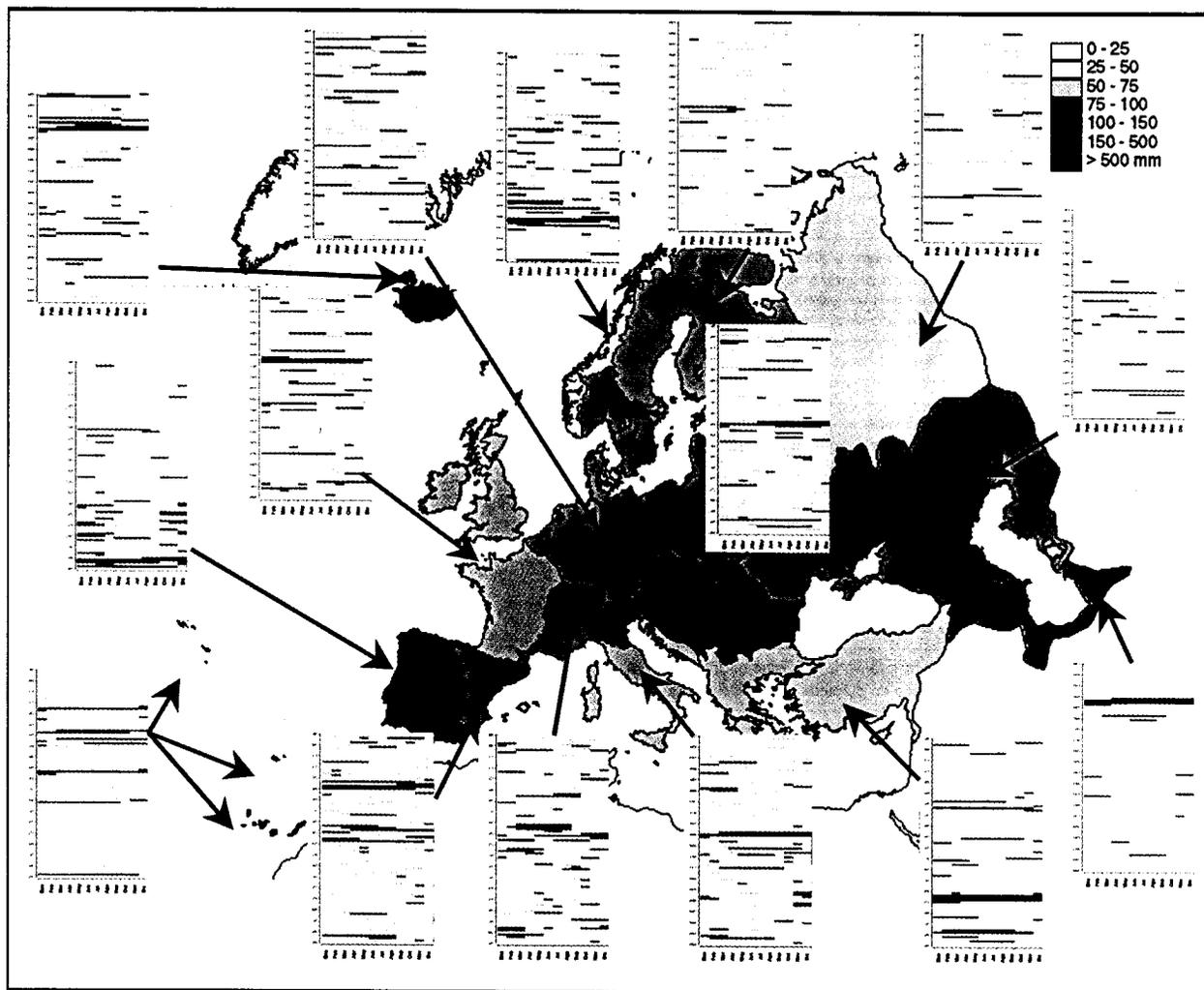


FIGURA 17. Evolución de déficit en las regiones europeas definidas.

ción, se ha determinado finalmente identificar las sequías una vez filtradas las tendencias lineales de larga escala.

6. CONTRASTE DE RESULTADOS

Existen dificultades para contrastar los resultados anteriores (Tabla 2) con sequías identificadas y recopiladas por otros autores (IH, 1999; Vermes, 1998). La definición e identificación de sequías depende no solo de variables climáticas, modelos e índices utilizados, sino también de factores socioeconómicos y la sensibilidad existente a las sequías. Este estudio se ha centrado en la utilización de datos de lluvia como agente principal del que se puede derivar la escasez de agua en una región y ningún otro factor hidrológico como la capacidad de retención del suelo, del acuífero, embalses superficiales o hielo que pueda disminuir o aumentar la disponibilidad de agua se ha considerado (Hisdal et al, 1999, sobre la definición de sequías). Además, no se ha de olvidar el efecto de las escalas temporal y espacial escogida para este trabajo.

No obstante, las sequías identificadas dan un acuerdo razonable con fuentes revisadas. Ejemplos de esta información de contraste son la recopilación de sequías del actual CEH (IH, 1999; hoy *Centre for Ecology and Hydrology* de Wallinford en el Reino Unido) (Tabla 3) que abarca eventos

ocurridos Europa desde finales de los años 70. Como ejemplos de coincidencias se pueden citar las sequías ocurridas en 1976 e identificadas desde septiembre de 1974 hasta 1976 en cuencas del norte de Europa, desde diciembre de 1975 en Europa Central, desde mayo de 1976 en las cuencas atlánticas francesas y británicas y desde agosto de 1976 en cuencas escandinavas. Otras sequías se mencionan entre 1988 a 1992 y destacable por su intensidad es la acaecida en cuencas de la península Ibérica entre 1991 y 1995. ICID (*Comisión Internacional de Riegos y Drenajes*) también ha recopilado eventos ocurridos en Europa, principalmente en Europa Oriental (Vermes, 1998). La comparación con la Tabla 2 muestra coincidencias y diferencias que se valoran en función de las notas precedentes (Tabla 4).

Por último, debe destacarse que en este trabajo se han identificado sequías bajo un criterio de homogeneidad en cuanto a las variables utilizadas, la metodología y la fuente de datos desde principios de siglo. Este último aspecto permite dotar al estudio de consistencia al identificar sequías respecto a un periodo más largo que el de recopilaciones que abarquen periodos más cortos en el que la gravedad de las sequías aparece relativizada respecto al periodo y sequías identificadas. Así, sequías identificadas en este estudio como

| Fecha | Sequías identificadas |
|-----------|--|
| 1904-1905 | Periodo seco más dilatado en cuencas centroeuropeas |
| 1916-1917 | Sequía más intensa en Islandia (con sequías intermitentes desde 1911) |
| 1917-1920 | Sequía más intensa en cuencas del sur del mar Caspio |
| 1921 | Periodo seco severo en cuencas centroeuropeas (continúa durante los primeros meses de 1922) Sequía severa en las cuencas del Po y Ródano |
| 1924-1926 | Sequía más severa y dilatada en las cuencas mediterráneas de la península Ibérica (precedida de otra severa sequía iniciada en los primeros meses de 1922 y 1923) |
| 1929-1930 | La más dilatada sequía en las islas atlánticas occidentales |
| 1933-1934 | Peor sequía en las cuencas atlánticas de Francia y Gran Bretaña Severa sequía en cuencas del Mediterráneo oriental |
| 1937-1938 | Sequías menores en cuencas del norte de Europa |
| 1938-1939 | Periodo más seco en las cuencas orientales de Europa |
| 1939-1940 | Periodo seco en cuencas del interior de las península Escandinava |
| 1942-43 | Sequía más dilatada en el Po y Ródano (seguida de otras menores a finales de los 40) |
| 1945-1946 | Sequía más larga e intensa en cuencas del Mediterráneo central Sequía severa en cuencas mediterráneas de la península Ibérica (precedida de otras menores desde 1942) Sequía más intensa y dilatada en cuencas medias y bajas del Danubio seguidas de otras menores. |
| 1948 | Sequía más intensa en las islas atlánticas occidentales (precedida y seguida de otras menores) Periodo seco en cuencas orientales de Europa (precedida y seguida de otras menores) |
| 1949 | Sequía más intensa en las islas atlánticas occidentales (precedida y seguida de otras menores) |
| 1961 | Periodo seco en cuencas del sur del mar Caspio |
| 1965 | Periodo seco en Islandia |
| 1968-1969 | Sequía severa en las cuencas costeras noruegas (seguida de otras durante 1970) |
| 1972 | Severo periodo seco en cuencas centroeuropeas (precedida de sequías menores durante 1971) |
| 1973-1975 | Peor sequía en cuencas del Mediterráneo oriental |
| 1975-1976 | Periodo más severo en cuencas del norte de Europa |
| 1976 | Periodo más severo en cuencas centroeuropeas Sequía severa en cuencas atlánticas francesas y británicas |
| 1976-1980 | Peor sequía en las cuencas costeras noruegas |
| 1984 | Periodo más dilatado de sequía en cuencas orientales de Europa (continúa en años anteriores y posteriores) |
| 1985 | Periodo seco en Islandia |
| 1989-1990 | Periodo seco en cuencas del Mediterráneo oriental Sequías menores en cuencas atlánticas francesas y británicas |
| 1989-1993 | Periodo seco en cuencas del Danubio medio y bajo |
| 1991-1995 | Peor sequía en cuencas occidentales de la península Ibérica (precedida por otras menores durante finales de los 80) |

TABLA 2. Sequías identificadas.

las ocurridas durante los años 70 en las cuencas del Mediterráneo oriental, otras a principios de los años 30 en Francia y Gran Bretaña y las de los años 40 en las cuencas del Po y Ródano, cuencas mediterráneas ibéricas y del Mediterráneo centrales relativizan la ocurrencia de periodos secos ocurridos en momentos más cercanos.

7. CONCLUSIONES

A lo largo del presente estudio se ha analizado la ocurrencia de sequías a escala europea desde principios de siglo utili-

zando los datos elaborados por CRU. Este estudio se ha llevado a cabo utilizando datos mensuales por su aplicabilidad en la planificación de recursos hídricos.

Dos son los resultados de interés obtenidos. El estudio de sequías está intrínsecamente relacionado con los estudios de regionalización. Por tanto, en primer lugar se obtuvo una regionalización consistente de Europa teniendo en cuenta la evolución de las precipitaciones mensuales en cuencas hidrográficas. Cabe destacar que este resultado se alcanzó utilizando la información subyacente en las series de precipita-

REGIONALIZACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE SEQUÍAS EN EUROPA

| Fechas | Región | Características |
|-----------|---|--|
| 1968 | Hungría | Precipitación (feb-jul): 10% de lo normal |
| 1969 | Suecia, Gran Bretaña y Dinamarca | Verano muy seco |
| 1971 | Mayoría de Europa | Año excepcionalmente seco En España, lluvia de invierno más baja en 30 años; en Polonia, intensa sequía en verano; los más bajos niveles en el Rin desde 1818 |
| 1972 | URSS | Los niveles más bajos en 50-80 años |
| 1973 | Norte y este de Europa | Primavera muy seca en el este de Gran Bretaña; reducida lluvia y nieve en Austria, Alemania y Checoslovaquia |
| 1974 | Escandinavia, Francia, Holanda y Austria | Primavera seca en Noruega (abril más seco en ciertas áreas), Dinamarca, Holanda, Austria; sequía de 9 semanas durante la primavera de Suecia; baja precipitación durante abril-agosto en Francia |
| 1975 | Norte y este de Europa | Invierno seco en Europa oriental con bajos niveles en los ríos; la lluvia más reducida del siglo entre febrero y agosto en Irlanda y Gran Bretaña; registro mínimo de lluvia en verano en Suecia; mínimo registro de lluvia en octubre en Bélgica |
| 1976 | Norte de Europa (desde Escandinavia hasta Francia) También efectos sobre Europa oriental | Sequía severa especialmente en el sudeste de Inglaterra y norte de Francia. Verano caluroso y seco seguido de un invierno seco. Se registran déficit de lluvia. Déficit de escorrentía superficial y subterránea Gran Bretaña: duración de 16 meses, intensidad sin precedentes. Verano muy seco en Escocia; el peor impacto se da en el sudeste de Inglaterra con restricciones en el abastecimiento Mínimos registros de lluvia de marzo a septiembre en Países Bajos, Dinamarca, Noruega, Suecia, Escocia y norte de Francia. Muy baja humedad del suelo en Irlanda. |
| 1977 | Gran Bretaña | Verano seco desde mayo a agosto Escocia – el verano más seco desde 1868 Norte de Irlanda – séptimo verano sucesivo con lluvia inferior a la media |
| 1978 | Sudeste de Gran Bretaña | Sudeste de Inglaterra – el otoño más seco desde 1752 Oeste de Francia – el más seco periodo oct/nov desde inicio de registros |
| 1984 | Norte y oeste de Gran Bretaña | Primavera y verano muy secas. Escorrentía superficial afectada |
| 1988-1992 | Mayoría de Europa | Prolongado y anormal patrón de circulación atmosférica causante de déficit de lluvia con cortos periodos de lluvia en vastas área geográficas, altas temperaturas en verano; invierno con temperaturas sobre la media y lluvia reducidas. Duraciones y severidad de los déficit de escorrentía variables. Problemas de recursos de agua exacerbados en Europa por incremento de demandas, p.e. en Francia a finales de 1990 de desecan 3000 ríos, restricciones para riego. Sequía severa en verano en el nordeste de Alemania durante 1992, con reducciones en la producción de cultivos del 22%. Lluvias sobre la media en Noruega y Escocia |
| 1990-1995 | España y Portugal | Sequía prolongada sobre toda España excepto en la costa del norte. Mayor intensidad entre septiembre de 1994 y agosto de 1995 |
| 1992-1993 | Bulgaria, Hungría | Verano de 1992 muy caluroso y seco. Seguido de lluvias por debajo de valores normales hasta octubre de 1993. Graves pérdidas agrícolas en Bulgaria. La peor sequía en Rusia en 10 años |
| 1995 | Irlanda y Gran Bretaña, Noruega y Suecia | Verano y otoño secos y calurosos. Sequedad en el suelo. Impacto en recursos hídricos superficiales, pero no en los subterráneos Bajas temperaturas y escasez en invierno de nieve en los países nórdicos |
| 1996 | Bulgaria | Verano seco y caluroso en todo el país |
| 1997 | Francia, Gran Bretaña, Irlanda, Portugal y Alemania | Muy bajas precipitaciones |

TABLA 3. Sequías identificadas por IH, 1999.

ciones de cada cuenca, es decir, de las anomalías, de los ciclos anuales y de las tendencias.

En segundo lugar, una vez establecida la anterior regionalización se pasó a la identificación y caracterización de las sequías en cada una de las regiones delimitadas, mostrando los resultados como evolución de déficit mensuales. La metodología utilizada para identificar las sequías se apoya en la

teoría de rachas. Se seleccionó como nivel crítico para definir el inicio de una sequía el percentil 90% en cada uno de las 12 series mensuales. Identificado el inicio, la sequía durará hasta que se cumpla un criterio de recuperación para el volumen de déficit. El parámetro crítico finalmente escogido es de 0,1 para todas las regiones.

En resumen, se obtuvieron regiones y una caracterización

| Periodo analizado | Región | Índice | Sequías identificadas |
|-------------------|--|--------------------------------------|---|
| 1931-1990 | Gran llanura y río Tisza en Hungría y algunas zonas de países cercanos | Índice de Palmer (escala plurianual) | Años extremadamente secos: 1904, 1935, 1952, 1990. Secuencias de tres años secos: 1921-23, 1945-4. |
| 1923/24-1995/96. | Región de Novi Sad en la provincia de Vojvodina en Yugoslavia | Precipitación total | Año más seco: 1942/43 Extremadamente seco: 1989/90, 1951/52, 1991/92 y 1970/71 Invierno seco: 1971/72 Estación de crecimiento. Escasas lluvias durante el verano: 1928, 1971 y 1962. Sequía severa: 1950 |
| | Yugoslavia | Distribución de la precipitación | Sequías intensas: 1988, 1990 y 1992. |
| 1973-1992 | Croacia | Precipitación anual | Las sequías son más intensas desde 1981 |

TABLA 4. Resumen de sequías recopiladas por ICID, 1998.

de sequías en cada una de estas regiones a través de variables asociadas como déficit y duración. Las regiones parecen independientes unas de otras, dándose sequías con distintas intensidades en diferentes momentos. El contraste con recopilaciones de sequías históricas realizadas por autores como *IH* e *ICID* da resultados razonables teniendo en cuenta las metas diferentes de cada evaluación, extensiones abarcadas, escalas y periodos de tiempo o las variables utilizadas.

El conjunto de resultados obtenidos, regionalización y análisis de sequías, constituye, además, una posible base para la elaboración de políticas y aplicación de estrategias de actuación. Una vez delimitadas las regiones climáticamente homogéneas a escala europea y caracterizados las sequías, se muestra una valoración comparativa entre ellas y se hace factible la elaboración de indicadores y herramientas de seguimiento de las sequías. Además, dadas la escala geográfica utilizada se permite la evaluación de los impactos socio-económicos, institucionales o políticos.

El estudio presentado se ha elaborado utilizando datos de lluvia por lo que una conceptualización adecuada del ciclo hidrológico y de las actividades humanas sobre el agua permitiría una mejora del mismo. Por otro lado, este tipo de contribuciones es aplicable a otras escalas de trabajo, por ejemplo en el nivel de cuenca, donde además se dispondría de un buen conocimiento de datos históricos.

8. AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer a D. Manuel Menéndez Prieto, Coordinador Técnico Científico del Área de Hidrología del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX, su amabilidad en la supervisión de este artículo y a D. Teodoro Estrela Monreal, actual Jefe de la Oficina de Planificación de la Confederación Hidrográfica del Júcar y antiguo Coordinador del mismo Área de Hidrología del CEDEX, la labor de dirección que llevó a cabo durante el desarrollo del proyecto ARIDE.

9. REFERENCIAS

ARIDE. Assessment of the Regional Impact of Droughts in Europe. Environment and Climate Programme implemented under the Fourth Framework Programme. <http://www.hydrology.uni-freiburg.de/forsch/aride/>
 Cancelliere, A., Ancarani, A., y Rossi, G (1995). Identification of drought periods on streamflow series at different time scales. In: Water Resources Management under Drought or Water shortage Conditions, (editor Tsiourtis). Balkema, Rotterdam.
 Dracup, J. A., Lee, K. S. y Paulson, E. G. Jr. (1980). On the definition of Droughts. Water Resources Research, 16 (2) pág. 297-302.

Estrada, F. (1996). Caracterización y análisis de sequías. Máster Internacional de Hidrología General y Aplicada. Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX. Madrid. España.
 Estrela, T., F. Cabezas y F. Estrada, (1999). La evaluación de recursos hídricos en el Libro Blanco del Agua en España. Revista de Ingeniería del Agua. Volumen 6. nº 2. pág 125 - 138. Junio 1999.
 Frich, P., Rosenørn, S., Madsen, H. y Jensen, J.J., 1997: Observed Precipitation in Denmark, 1961-90. Danish Meteorological Institute. DMI Technical Report 97-8.
 Frich, P., Alexandersson H., Ashcroft J., Dahlström B., Demarée G.R., Drebs A., van Engelen A.F.V., Forland E., Hanssen-Bauer I., Heino R., Jónsson T., Jonasson K., Keegan L., Nordli P.O., Schmidt T., Steffensen P., Tuomenvirta H., Tveito O.E. (1996). North Atlantic Climatological Dataset (NACD Version 1). Final Report, Scientific Report 96-1, Danish Meteorological Institute.
 Hisdal, H., Tallaksen, L.M., Peters, L., van Lanen, Stahl, K.& Demuth, S. (1999) Drought Event Definition. Technical Report nº. 6 for ARIDE project.
 Institute of Hydrology (IH). (1999). Drought Events in Europe. Wallingford & Space Applications Institute (SAI), Ispra.
 Menéndez, M. (1995). Aspectos Hidrológicos de las Sequías. Curso sobre sequías. Las sequías en España. Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX. Madrid. España.
 Ministerio de Medio Ambiente de España, 2000. Libro Blanco del Agua en España. Madrid. España.
 New, M., Hulme, M., Jones, P. Representing twentieth century space-time climate variability. I Developing of a 1961-90 mean monthly terrestrial climatology. Climate Research Unit. School of Environmental Sciences de la Universidad de East Anglia. Norwich, NR4 7TJ, Gran Bretaña.
 New, M., Hulme, M., Jones, P. Representing twentieth century space-time climate variability. II Development of 1901-96 monthly grids of terrestrial surface climate. Climate Research Unit. School of Environmental Sciences de la Universidad de East Anglia. Norwich, NR4 7TJ, Gran Bretaña.
 Ruiz, J. M., 1999. Modelo distribuido para la evaluación de recursos hídricos. Monografías (M-67) CEDEX. Ministerio de Fomento. Madrid. España.
 Salas, J. D., Delleur, J. W., Yevjevich V. y Lane W. L. (1985). Applied Modelling of Hydrologic Time Series. Water Resources Publications. SPSS, 1997. SPSS Base 7.5 Applications Guide. EE.UU.
 Stahl, K. y Demuth, S. (1999) Method for Regional Classification of Streamflow Drought Series: Cluster Analysis. Technical Report no. 1, ARIDE project.
 Tallaksen, L.M., Madsen, H., y Clausen, B. (1997). On the definition and modelling of streamflow drought duration and deficit volume. Hydrological Science Journal, 42 (1), Feb., 1997.
 Vermes, Laszlo. (1998). How to work out a drought mitigation strategy. ICID guide. Comisión Internacional de Riegos y Drenajes. Guidelines for water management.
 Wallen C.C. (1970). Climates of Northern and Western Europe. Elsevier Publishing Company.
 Yevjevich V.; Cunha, L.; Vlachos, Evan. 1983. Coping with droughts. Water Resources Publications.