LIBRO JUBILAR
EN HOMENAJE AL PROFESOR
ANTONIO GIL OLCINA

EDICIÓN AMPLIADA

PUBLICACIONES
UNIVERSIDAD DE ALICANTE

**LIBRO JUBILAR EN HOMENAJE
AL PROFESOR ANTONIO GIL OLCINA**

EDICIÓN AMPLIADA

**LIBRO JUBILAR
EN HOMENAJE AL PROFESOR
ANTONIO GIL OLCINA**

EDICIÓN AMPLIADA

INSTITUTO INTERUNIVERSITARIO DE GEOGRAFÍA
UNIVERSIDAD DE ALICANTE

Publicaciones de la Universidad de Alicante
03690 Sant Vicent del Raspeig
publicaciones@ua.es
<http://publicaciones.ua.es>
Teléfono: 965 903 480
Fax: 965 909 445

© los autores, 2016
© de la presente edición: Instituto Interuniversitario de Geografía y Universidad de Alicante

ISBN: 978-84-16724-09-3
DOI: <http://dx.doi.org/10.14198/LibroHomenajeAntonioGilOlcina2016>

Coordinación:
Jorge Olcina Cantos y Antonio M. Rico Amorós

Edición, composición y diseño de cubiertas:
Clotilde Esclapez Selva

Esta editorial es miembro de la UNE, lo que garantiza la difusión y comercialización
de sus publicaciones a nivel nacional e internacional

Reservados todos los derechos. Cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública o transformación de esta obra solo puede ser realizada con la autorización de sus titulares, salvo excepción prevista por la ley. Dirijase a CEDRO (Centro Español de Derechos Reprográficos, www.cedro.org) si necesita fotocopiar o escanear algún fragmento de esta obra.

SEQUÍAS CLIMÁTICAS EN LA COMUNIDAD DE MADRID Y ÁREAS CIRCUNDANTES

Encarnación Galán Gallego

Juan Labajo Montero

Departamento de Geografía
Universidad Autónoma de Madrid

1. INTRODUCCIÓN

El objetivo fundamental del presente trabajo es el estudio de la componente climática del riesgo de sequía y, más específicamente, el análisis y evaluación de la peligrosidad por sequía en la Comunidad de Madrid y áreas circundantes; una peligrosidad asociada a la frecuencia, duración e intensidad registrada por el fenómeno. La zona objeto de estudio abarca la totalidad de la Comunidad de Madrid y algunos territorios de las provincias limítrofes de Ávila, Toledo y Guadalajara. Las cuencas seleccionadas han sido: Alberche, Guadarrama, Jarama-Manzanares, Henares, Tajuña y Tajo Intermedio, todas ellas pertenecientes a la Cuenca Hidrográfica del Tajo (figura 1).

Como la mayor parte de la Península, este espacio se inserta dentro del dominio de los climas mediterráneos, zona de transición donde alternan los mecanismos propios de del mundo templado y del tropical árido. Este juego de influencias determina que la variabilidad temporal sea uno de los rasgos esenciales de las precipitaciones en nuestra región, registrándose en el caso de las anuales una notable irregularidad tal como ponen de manifiesto los valores moderadamente altos del coeficiente de variación (25% al 30% en la mayor parte de los observatorios) y del índice de irregularidad; este último muestra valores superiores a dos unidades lo que significa que la precipitación del año más lluvioso es al menos dos veces superior a la del año más seco.

Consecuencia lógica de la elevada variabilidad pluviométrica que caracteriza al ámbito mediterráneo, es la aparición de episodios de lluvias intensas, con el consiguiente riesgo de inundaciones, y de períodos con un marcado déficit pluviométrico como son las sequías. La sequía es, pues, una componente habitual del clima español y, en este sentido, cabe señalar que

la submeseta meridional es, junto el Sur y SE peninsular, los espacios que con mayor frecuencia y, efectos más negativos, padecen secuencias secas (Morales, 2001; Galán, 2004).

Debido a la compleja naturaleza del fenómeno, así como a los diversos factores que intervienen en su génesis, ocurrencia e impactos generados, el concepto de sequía admite diferentes acepciones (sequía meteorológica o pluviométrica, agrícola, hidrológica, socioeconómica). En nuestro caso, utilizamos el concepto de sequía pluviométrica, entendida ésta como un “déficit hídrico inusual, una anomalía pluviométrica negativa lo suficientemente intensa y prolongada como para generar impactos negativos sobre la sociedad que la padece” (Pita, 2007: 71). Entre los aspectos más relevantes de la sequía, que interesa conocer de cara a una gestión eficaz de la misma, se encuentran: la frecuencia con la que el fenómeno afecta a la región; la duración puesto que una elevada persistencia tiene un efecto multiplicador sobre los impactos al irse agotando las reservas de agua y la intensidad registrada por la secuencia seca, que denota la magnitud del déficit alcanzado. A este respecto, existen diversos índices o indicadores que permiten la identificación y caracterización de la sequía, así como evaluar la peligrosidad por sequía en un territorio (Marcos, 2001; Pita, *opus cit.*; Camarillo, 2012).

2. METODOLOGÍA Y FUENTES

El procedimiento lógico seguido para en nuestra investigación, queda sintetizado en cuatro fases:

- *Fase 1: Creación de la base de datos pluviométrica*, a partir de la cual vamos a ir cumplimentando las sucesivas etapas del plan de trabajo. Su configuración conlleva la recogida y posterior control de calidad de las series mensuales de precipitación originales, suministradas por la AEMET.

- *Fase 2: Caracterización estadística de las precipitaciones*, consistente en la determinación de régimen pluviométrico medio, la variabilidad y los regímenes probables de las precipitaciones anuales en cada uno de los observatorios seleccionados, así como para cada una de las series regionales generadas.

- *Fase 3: Identificación y caracterización de las sequías climáticas*. En este estudio el análisis de las sequías se ha realizado tanto a escala anual como mensual. En primer lugar, se toma como referencia inicial el año, ensayando dos aproximaciones metodológicas para delimitar el umbral de la sequía: el *Índice de Precipitación Estandarizada* (*Standardized Precipitation Index*, SPI), desarrollado por McKee y colaboradores en 1993 (MMA, 2007) y el método los cuantiles (1º y 2º quintil y primer decil). En segundo lugar, a fin de precisar mejor las características de las secuencias secas de larga duración, abordamos el estudio a escala mensual aplicando el *Índice Estan-*

darizado de Sequía Pluviométrica (IESP) propuesto por Pita López (Pita, 2000). Dicho método se basa en el cálculo y posterior estandarización de las anomalías pluviométricas acumuladas mensuales, permitiendo establecer con precisión el inicio y final de la secuencia seca.

- **Fase 4: Modelado espacial y temporal de la sequía** mediante la aplicación de técnicas geoestadísticas y de análisis espacial implementadas en un Sistema de Información Geográfica. Para ello, hemos utilizado la extensión *Spatial gAnalyst* del programa ArcGIS 9.3; el método utilizado en la interpolación ha sido el kriging ordinario y el modelo seleccionado el esférico porque es el que mejor se ajustaba a los datos de partida. Para disminuir la influencia de puntos lejanos en el proceso de interpolación y dada la marcada diferencia existente entre los registros del sector serrano y el resto de la Comunidad, consideramos, tras diversas pruebas, que el número de datos a interpolar fueran 5. En la interpolación utilizamos la información de 50 puntos de rejilla aunque a la hora de recortar la superficie interpolada por la cobertura geográfica de las cuencas hidrográficas los puntos se redujeron a 42.

En esta fase de la investigación se ha realizado, en primer lugar, el modelado espacial de los aspectos más relevantes de la sequía (duración e intensidad máxima) durante las grandes fases secas detectadas en el periodo de observación. Posteriormente, a fin de evaluar la peligrosidad por sequía tanto en el conjunto del territorio como en los diferentes sectores del mismo, se modelan las características más significativas de las secuencias secas de larga duración (longitud superior a un año); las variables consideradas han sido: número de secuencias, porcentaje de meses implicados en secuencias secas de larga duración sobre el total de meses de la serie, duración media y máxima de la secuencia e intensidad máxima registrada.

La fuente de información básica sobre la que se ha aplicado esta metodología son las series pluviométricas mensuales del período 1971-2010, correspondientes a los 42 observatorios ubicados en la zona de estudio y a los 8 externos a ella, suministradas por la AEMET. A partir ellas se han generado las diferentes *series regionales*, tanto a escala mensual como anual. Estas últimas se obtienen promediando los valores de precipitación de los distintos conjuntos espaciales, elaborándose, en concreto las series promedio correspondientes al conjunto de la Zona de Estudio, la Comunidad de Madrid y a cada una de las cuencas hidrográficas (Alberche, Guadarrama, Jarama-Manzanares, Tajo Intermedio, Tajuña y Henares). Estas *series regionales* nos permiten obtener una visión general del comportamiento de la sequía, tanto en la totalidad del territorio analizado como en el conjunto de cada cuenca hidrográfica. Por otro lado, la información referida al conjunto de cada cuenca, junto con los valores individuales correspondientes a los distintos observatorios, permite determinar las diferencias espaciales del fenómeno.

Figura 1. Zona de Estudio y localización de los observatorios.

	Media	Coficiente de variación	Máximo	Mínimo	Índice de Irregularidad	D1	Q1	Q2
Zona de Estudio	549,3	21,4	827,2	340,7	2,4	419,6	446,3	485,1
Comunidad de Madrid	579,4	22,6	937,9	369,2	2,5	433,8	467,3	515,8
Alberche	581,0	22,4	878,3	359,0	2,4	431,1	472,9	514,4
Guadarrama	796,6	24,0	1320,7	540,2	2,4	582,6	615,8	682,6
Jarama-Manzanares	557,0	23,0	905,0	340,8	2,7	424,2	444,5	481,5
Henares	494,9	21,1	763,5	261,6	2,9	367,3	415,5	471,8
Tajo Intermedio	423,6	23,6	638,0	225,5	2,8	309,6	331,9	388,6
Tajuña	468,8	22,0	682,5	275,9	2,5	335,3	392,8	425,2

Cuadro 1. Régimen medio y variabilidad de las precipitaciones anuales en las series promedio regionales (1971-2010).

3. AÑOS SECOS

Como se ha señalado en párrafos anteriores, el procedimiento seguido en la identificación de la sequía a escala anual ha consistido en la aplicación del método de los cuantiles y del *Índice de Precipitación Estandarizado* (SPI). En el primer caso hemos considerado el primer y segundo quintil para el establecimiento de los años muy secos y secos respectivamente; así mismo, siguiendo la propuesta de Gibbs y Maher se han identificado los años extremadamente secos utilizando como umbral el primer decil (Almarza, 2000).

El *Índice de Precipitación Estandarizada* (SPI) desarrollado por McKee *et al.*, (1993) es uno de los indicadores de sequía más utilizados actualmente.

En el caso que nos ocupa, el índice viene dado por la siguiente expresión:

$$SPI = X_i - \bar{X} / \sigma$$

SPI = Valor del índice de precipitación anual estandarizado

X_i = Precipitación anual del año i

$\bar{X}$ = Media de la serie de precipitaciones anuales del período 1971-2010

σ = Desviación típica de la serie de precipitaciones anuales del período 1971-2010

En nuestro trabajo hemos aplicado los umbrales de sequía establecidos por McKee, que son los utilizados por la Confederación Hidrográfica del Tago para la caracterización de las sequías en la Cuenca. Dicha caracterización constituye uno de los apartados del *Plan Especial de Actuación en Situaciones de Alerta y Eventual Sequía* de esta cuenca, publicado en el año 2007. En el citado estudio el “episodio de sequía” se define como un período en el que el índice SPI es continuamente negativo y alcanza un valor ≤ -1 . Por su parte, la intensidad y gravedad de la fase seca viene dada por la suma de los SPI de cada uno de los años que la integran (SPI acumulado); en suma, la intensidad anual de la sequía es el valor del SPI y su magnitud es la suma acumulada del índice SPI (MMA, 2007).

Tomando como criterio de clasificación el umbral de sequía establecido por McKee ($SPI \leq -1$, probabilidad de ocurrencia del 16%), a partir del cual empieza a clasificarse el período (año) de *moderadamente seco*, los resultados muestran como para el conjunto de la zona fueron años secos: 1980, 1983, 1990, 1994, 2005 y 2009. En el caso del año 2005 estaríamos ante un año muy seco, dado que su índice de SPI se sitúa en -1,77. En términos generales esta relación de años secos es coincidente con la que aparece en las otras series regionales, lo que está mostrando como una de las características más distintivas del fenómeno es su amplia extensión espacial. No obstante, se observan algunas diferencias espaciales en la ubicación temporal de algunos años secos (eso sí dentro de la misma gran fase seca) y en la intensidad registrada.

El análisis de correlación realizado para los valores anuales del SPI entre las diferentes cuencas pone de manifiesto dos hechos: 1º) el análisis efectuado con todos los valores del período de observación muestra una covariación espacial altamente significativa, registrándose coeficientes de correlación entre 0,88 y 0,93; solo en el caso de la cuenca del Alberche se observa un valor más bajo (0,77) en su correlación con las del Henares y Tajuña. 2º) Considerando exclusivamente la situación de sequía (años con SPI negativo en la cuenca seleccionada) el grado de covariación espacial sigue siendo importante; y, a excepción del citado caso del Alberche, todas las cuencas presentan correlaciones que se sitúan entre el 0,5 y 0,83, siendo en todos los casos estadísticamente significativas al nivel del 0,01. En situaciones de sequía en la cuenca del Alberche, los valores del

coeficiente de correlación entre ésta y las cuencas del Tajuña y Henares se encuentran por debajo del 0,5; con las otras tres restantes (Guadarrama, Jarama-Manzanares y Tajo Intermedio) se sitúa entre 0,5 y 0,7. Subrayar, igualmente, que en el 76% de los años en que el SPI adopta valores negativos lo está haciendo de forma simultánea en todas las cuencas.

Mención especial merece la intensidad alcanzada por la sequía en el año 2005, resultando ser un año *muy seco* ($SPI \leq -1,5$) en la práctica totalidad de las cuencas e, incluso, *extremadamente seco* en la del Henares y el Tajo Intermedio ($SPI \leq -2$). Niveles de sequía severa (*año muy seco*) se observan igualmente en el año 1980 (Alberche), 1983 (Jarama-Manzanares y Tajuña) y 1994 en las cuencas del Tajo Intermedio y Tajuña (figura 2).

Figura 2. Evolución del SPI en el Conjunto de la Zona de Estudio, Comunidad de Madrid y las distintas cuencas (1971-2010).

La frecuencia de años secos se incrementa, lógicamente, al aplicar el método de los quintiles puesto que, en este caso, el umbral de sequía se sitúa en el valor correspondiente al Q2 de la serie (probabilidad del 40%). De esta forma y, para el conjunto de la zona de estudio, a los años secos ya señalados se sumarían: 1973, 1974, 1982, 1985, 1986, 1991, 1992, 1995, 1998, 2007 y (figura 3).

Figura 3. Años secos en las distintas cuencas hidrográficas y para el Conjunto de la Zona de Estudio (método quintiles).

Cabe destacar la especial incidencia espacial y la severidad alcanzada por la sequía en algunos años secos, todos ellos con valores de precipitación inferiores al percentil diez de la serie. Es el caso del ya referido 2005, el

más seco de toda la serie promedio de la zona de estudio y de las distintas cuencas, a excepción de la del Guadarrama donde ocupa el segundo lugar. El porcentaje de reducción de la precipitación experimentado, respecto al valor normal en la cuenca, se eleva hasta el 47% en el Tajo Intermedio y Henares, 41% en el Tajuña, 39% en el Jarama-Manzanares, 38% en el Alberche y 30% en el Guadarrama. Para el conjunto de la zona de estudio este porcentaje se sitúa en un 38%.

Dos años implicados en la fase seca de los años ochenta muestran un carácter extraordinariamente seco, son 1980 y 1983. El primero en las cuencas del Alberche y Guadarrama, con mermas de precipitación del 36% y 27% respectivamente; el segundo (1983) en las cuencas del Jarama-Manzanares, Tajuña y Henares, donde los porcentajes de reducción de la precipitación registrados se sitúan en un 37% (Jarama-Manzanares) 40% (Tajuña) y 29% (Henares). Valores de precipitación inferiores al P10 se observan, igualmente, en algunos años involucrados en la gran fase seca de la primera mitad de los noventa, como es el caso de 1990 y 1994.

Estos dos años aparecen entre los cuatro más secos de la serie promedio del conjunto de la zona y en la de todas las cuencas, a excepción de la del Henares (en esta cuenca el volumen de precipitación recogido se encuentra entre los valores correspondientes al P10 y P20). El año 1994 se configura como el más seco en la cuenca del Guadarrama y ocupa el segundo lugar en las cuencas del Alberche, Tajo Intermedio y Tajuña; en la del Jarama-Manzanares se sitúa como el tercer año más seco del periodo analizado. Los porcentajes de reducción registrados en los volúmenes de precipitación, respecto a la media de la serie respectiva, se cifra en un 38% en el Tajo Intermedio, 33% en el Tajuña, 32% en el Guadarrama y Jarama-Manzanares y 26% en el Alberche.

En resumen, los años con cantidades de precipitación inferiores al percentil diez de la serie en las diferentes cuencas seleccionadas han sido los siguientes: a) en la cuenca del Guadarrama: 1980, 1990, 1994, y el 2005; b) en la cuenca del Alberche: 1980, 1990, 1994, 2005; c) en la cuenca del Jarama-Manzanares: 1983, 1990, 1994, 2005; d) en la cuenca del Tajo Intermedio: 1990, 1994, 2005 y 2007; e) en la cuenca del Henares: 1983, 2005, 2007 y 2009; f) en la cuenca del Tajuña: 1983, 1990, 1994, 2005. Respecto a los porcentajes de reducción de lluvias experimentados en estos años se sitúan en torno al 30% en el Guadarrama, entre el 26% y 38% en el Alberche, el 25% y 39% en el Jarama-Manzanares, el 28% y 47% en el Tajo Intermedio, el 26% y 47% en el Henares y, entre el 30% y 41% en el Tajuña.

Circunscribiendo el análisis a la Comunidad de Madrid, apreciamos como los años deficitarios en agua en los que el índice SPI rebasa el umbral de sequía fijado han sido: 1980, 1983, 1990, 1994, 2005 y 2009 (figura 2). Tomando en consideración los resultados obtenidos en el método de los

quintiles, se calificarían como años secos, además de los ya citados, los siguientes: 1973, 1974, 1985, 1986, 1991, 1992, 1995, 1998 1999 y 2007 (figura 4). En el caso de los años 1983, 1994, 2005 y 2009 el volumen de precipitación recogido fue inferior al valor del primer decil de la serie y, por tanto, entrarían dentro de la categoría de años extremadamente secos según la propuesta de Gibbs y Maher. El descenso de la precipitación acaecido en estos años representa entre el 27 % (2009) y el 36% (2005) del valor medio anual registrado en nuestra Comunidad.

Año	Método SPI	Método Quintiles	Años con precipitación $\leq$ D1
1971			
1972			
1973			
1974			
1975			
1976			
1977			
1978			
1979			
1980			
1981			
1982			
1983			
1984			
1985			
1986			
1987			
1988			
1989			
1990			
1991			
1992			
1993			
1994			
1995			
1996			
1997			
1998			
1999			
2000			
2001			
2002			
2003			
2004			
2005			
2006			
2007			
2008			
2009			
2010			

Clasificación año (SPI)	Clasificación año (Quintiles)	Pi $\leq$ D1 (percentil 10)
Moderadamente seco (SPI $\leq$ -1)	Seco (Pi entre Q1 y Q2)	Extremadamente seco
Muy seco (SPI $\leq$ -1,5)	Muy Seco (Pi $\leq$ Q1)	
Extremadamente seco (SPI $\leq$ -2)		
P _i : Precipitación registrada en el año i		

Figura 4. Años secos en la Comunidad de Madrid

Una vez identificados los años secos con mayor incidencia espacial en nuestra región es necesario saber si los años deficitarios en agua forman secuencias temporales cortas o largas, puesto que ello nos informa sobre otra de las características fundamentales de la sequía: su duración. Este parámetro, importante por sí mismo, reviste especial interés, además, porque incide en la severidad de la sequía. Es evidente que los déficit hídricos al irse acumulando en el tiempo van profundizándose y ganando intensidad.

Si se observa las secuencias configuradas por los años secos, clasificados éstos según el método de los quintiles, la persistencia de éstos es manifiesta en todas las cuencas; el porcentaje de años secos implicados en secuencias secas de dos o más años de duración se eleva hasta el 81% en el Tajo Intermedio y Henares; al 63% en el Alberche y Guadarrama, al 56% en el Jarama –Manzanares y al 50% en el Tajuña. Para el conjunto de la Zona Estudio y de la Comunidad de Madrid dichos porcentajes se sitúan en el 69% (figuras 3 y 4). A similares conclusiones llegamos observando los gráficos de evolución del SPI, donde puede apreciarse como se concatenan los años deficitarios en agua, conformando periodos secos de dos o más años de duración. Centrándonos en la Comunidad de Madrid se identifican claramente tres períodos secos de dos o más años: 1980-1983, 1990-1995 y 2004-2005. Los dos primeros resultaron ser extremadamente secos, con valores de SPI acumulado inferiores a -2 (-3,07 y -4,96); en el caso del periodo seco más reciente el SPI acumulado alcanza un valor de -1,79, calificándose por tanto de severo. Es importante subrayar que la marcada irregularidad interanual de las precipitaciones, junto con la elevada persistencia de las situaciones deficitarias en agua, dotan a nuestra zona de un notable grado de peligrosidad por sequía. Ello exige, necesariamente, una gestión planificada del recurso hídrico en la que se incluye la gestión del riesgo de sequía.

4. CARACTERIZACIÓN DE LAS SECUENCIAS SECAS DE LARGA DURACIÓN: ANÁLISIS TEMPORAL Y ESPACIAL DE LAS GRANDES FASES SECAS

En todas las consideraciones realizadas hasta este momento sobre el fenómeno de la sequía se ha tomado como período de referencia inicial el año; sin embargo, esta opción puede resultar poco precisa dado el alto nivel de agregación de este. A lo largo de los doce meses pueden presentarse situaciones pluviométricas muy diferentes y, no es raro, que un año inicie su andadura como seco para terminar como húmedo o viceversa, de tal forma que, en muy pocas ocasiones, las secuencias secas están constituidas por años completos. Por tanto, a fin de determinar con mayor precisión las secuencias secas registradas en nuestro ámbito de estudio, hemos

considerado oportuno descender a la escala mensual y delimitar las secuencias a partir de los déficits de precipitación acaecidos en cada uno de los meses del período de observación.

La identificación y caracterización de la sequía pluviométrica a escala mensual se ha llevado a cabo mediante la aplicación del *Índice Estandarizado de Sequía Pluviométrica* (IESP) propuesto por Pita López en su estudio sobre las sequías en la Cuenca del Guadalquivir (Pita, 2000 y 2001) y, posteriormente, ha sido aplicado en diferentes ámbitos espaciales del territorio español (Pita *et al.*, 2002; Gómez, 2002; Galán, 2004; García *et al.*, 2006; Labajo, 2011). El procedimiento de cálculo del *Índice Estandarizado de Sequía Pluviométrica* comprende tres etapas:

1ª) Cálculo de la anomalía pluviométrica de cada uno de los meses de la serie (AP_i), a partir de la siguiente expresión:

$$AP_i = P_i - P_{MED}$$

Donde:

AP_i = anomalía pluviométrica mensual

P_i = precipitación mensual

P_{MED} = mediana del mes correspondiente

2ª) Cálculo de las anomalías pluviométricas acumuladas (APA_i)

$$APA_i = \sum AP_i$$

desde $i=1$ hasta $APA_i < 0$ y $APA_{i-1} \geq 0$

siendo APA_i = anomalía pluviométrica acumulada del mes i

3ª) Obtención del índice a partir de la estandarización de las anomalías pluviométricas acumuladas, mediante su conversión en puntuaciones Z

$$ZAPA_i = \frac{(APA_i - \overline{APA})}{\sigma_{APA}}$$

Donde:

$ZAPA_i$ = Anomalía pluviométrica acumulada estandarizada del mes i (IESP del mes i)

APA_i = Anomalía pluviométrica acumulada en el mes i

$\overline{APA}$ = Media de las anomalías pluviométricas acumuladas de todos los meses de la serie

σ_{APA} = Desviación típica de las anomalías pluviométricas acumuladas de todos los meses de la serie

Respecto a la delimitación de las secuencias secas de larga duración, se han tenido en consideración las que presentan una duración superior al año, ya que secuencias de menor longitud apenas generan impactos en una sociedad mínimamente adaptada a su medio natural.

La aplicación del *Índice Estandarizado de Sequía Pluviométrica* (IESP) al conjunto de observatorios ubicados en la zona de estudio, así como a las correspondientes *series regionales* (figura 5), revela la existencia de varias secuencias secas (tramos con valores de IESP negativos) aproximadamente coincidentes en el tiempo. Estas secuencias secas se enmarcarían, en términos generales, dentro de las denominadas por Olcina Cantos “*sequías ibéricas*” (Olcina, 2001). A modo de ejemplo, en el cuadro 2 se muestran las características de cada una de las secuencias secas de larga duración acaecidas en la Comunidad de Madrid durante el período 1971-2010.

	SECUENCIA 1	SECUENCIA 2	SECUENCIA 3	SECUENCIA 4	SECUENCIA 5
INICIO	1980/11	1983/1	1991/12	1993/12	2004/12
FINAL	1982/8	1984/10	1993/9	1995/12	2006/10
DURACIÓN (meses)	22	22	22	25	23
INTENSIDAD MÁXIMA	-1,638	-1,915	-1,495	-2,690	-1,988
Nivel de sequía (valor IESP): leve ($-1 < \text{IESP} < 0$), moderada ($\text{IESP} \leq -1$), severa ($\text{IESP} \leq -1,5$), extrema ($\text{IESP} \leq -2$).					

Cuadro 2. Secuencias secas de larga duración en la Comunidad de Madrid (1971-2010).

4.1. Las grandes fases secas

Atendiendo a las características más significativas de las secuencias secas identificadas y, muy especialmente, a su extensión espacial destacan las fases secas de los años ochenta, noventa y la más reciente de la última década. Como puede apreciarse en la figura 5, todas las cuencas hidrográficas se han visto afectadas, en mayor o menor grado, por estos períodos secos (figura 5).

A) La fase seca de los años ochenta (1979-1984)

La década de los ochenta comienza con una de las grandes fases de indigencia pluviométrica registradas durante la segunda mitad del siglo XX en la práctica totalidad del territorio peninsular, tal como ponen de manifiesto los distintos estudios realizados al respecto, tanto con carácter general como a escala regional. En nuestra zona esta sequía tuvo una apreciable duración e intensidad.

Figura 5. Evolución del Índice Estandarizado de Sequía Pluviométrica (IESP) (1971-2010).

Centrando el análisis en las diferentes series promedio de las cuencas (figura 5), es la secuencia que presenta una mayor diversidad espacial en lo referente al momento temporal en el que se configuran las secuencias más largas de forma simultánea. La conformación de la secuencia seca superior a un año se inicia a finales del año 1979 en las cuencas del Alberche y el Tajo Intermedio, un año después en el Guadarrama y a principios de 1983 en el Jarama-Manzanares, Tajuña y Henares. En la cuenca del Alberche la gran fase seca de los ochenta aparece dividida en dos secuencias de longitud superior a un año por un hiato de un mes en el que el IESP adopta un valor positivo, pudiéndose considerar, por tanto, como un único período seco;

la primera secuencia se extiende desde noviembre de 1979 a octubre de 1982 (36 meses) y la segunda desde diciembre de 1982 a febrero de 1984 (15 meses). En la cuenca del Guadarrama la duración de la secuencia seca se eleva hasta los 49 meses (octubre de 1980 a octubre de 1984), configurándose otra secuencia más corta (17 meses) en el inicio de la segunda mitad de la década de los ochenta (mayo de 1986-septiembre 1987). Esta secuencia seca se erige como la más larga del todo el periodo analizado, tanto en la serie promedio del Alberche como en la del Guadarrama y, en ambas, el nivel de sequía alcanzado en el momento de mayor déficit pluviométrico acumulado se califica de extremo con valores del IESP < -2 ; es la sequía que registró la intensidad máxima de todo el periodo estudiado en el caso del Alberche y ocupa el segundo lugar en el del Guadarrama.

La duración de la secuencia seca es algo inferior en las otras tres cuencas, situándose en dos años y medio en el Tajo Intermedio, casi dos en el Jarama-Manzanares y Tajuña (enero 1983-octubre 1984) y en 16 meses en el Henares (enero 1983-abril 1984). En el caso de la cuenca del Jarama-Manzanares se observa una segunda secuencia, de extensión idéntica a la primera (22 meses), que se inicia en septiembre de 1985 y concluye en junio de 1987. La intensidad máxima de la fase seca reviste un carácter extremo en el Tajuña, severo en el Jarama-Manzanares y moderado en el Henares y Tajo Intermedio si bien, en este último está muy próximo al severo. Finalmente señalar, como visión de conjunto para la Comunidad de Madrid, que durante la sequía de los años ochenta se configuran dos secuencias de larga duración, separadas por un hiato pluviométrico de cuatro meses, cuyas intensidades máximas denotan niveles de sequía severa e, incluso, muy cercana a extrema (cuadro 2)

Los resultados obtenidos en el modelado espacial de esta fase seca aparecen plasmados en las figuras 6a y 6b. Respecto a la duración de la secuencia, la mayoría de territorio (57%) está bajo los efectos de la sequía entre 2 y 3 años. El 36 % del territorio presenta secuencias entre los tres y cuatro años, localizándose éstas en los enclaves del sur de las cuencas del Alberche y del Guadarrama, el corredor del Henares, sureste de los páramos y la campiña. Las zonas que registran una duración superior a los 4 años, son núcleos que corresponden a la delimitación anterior, concretamente la parte sur de las cuencas del Alberche y Guadarrama y puntos del corredor del Henares ocupando el 7% de la superficie territorial (figura 6a).

En cuanto a la intensidad máxima registrada, el hecho más destacado es la profundidad alcanzada por esta fase seca en la mayor parte territorio: el 79% del mismo, mostrando en el momento de máximo déficit pluviométrico acumulado, un nivel de sequía severo. A grandes rasgos, la localización de los valores más elevados de intensidad, coinciden con lo observado en el mapa de la duración; el sur de la cuenca del Alberche y Guadarrama,

el corredor del Henares y la campiña son las zonas que mayores intensidades presentan (figura 6b). El porcentaje de reducción de lluvias respecto al promedio registrado en algunos de los años involucrados en esta fase seca supera o se sitúa cerca del 50%; a modo de ilustración podríamos citar las disminuciones observadas en los observatorios madrileños de Casarrubuelos (51%, en el año 1980), Torrejón de Ardoz (48%), Pezuela de las Torres (52%) y Rascafría (56%) en el año 1983.

B) La fase seca de los años noventa (1990-1996)

La sequía de este periodo, que presentó un carácter generalizado en España, se clasifica como una de las más largas e intensas de los últimos 50 años. La severidad alcanzada generó fuertes impactos sobre los ecosistemas hídricos de la cuenca del Tajo, la agricultura y los abastecimientos urbanos (Morales, 2001; Galán, 2004). Tal como puede apreciarse en la figura 5, tanto en la serie regional de la Comunidad de Madrid como en las de las correspondientes subcuencas (a excepción de la del Henares) la gran fase seca de los noventa aparece fragmentada en dos secuencias de duración superior a un año, separadas por un hiato pluviométrico de longitud variable según las zonas. En la serie promedio de la Comunidad de Madrid la extensión temporal de ambas secuencias es muy similar, siendo respectivamente de 22 y 25 meses (diciembre 1991-septiembre 1993; diciembre 1993-diciembre 1995) y el hiato pluviométrico de solo dos meses; este esquema se repite en las cuencas del Guadarrama y Jarama-Manzanares, aunque en esta última la sequía se alarga hasta finales 1996 (diciembre 1991-septiembre 1993; diciembre 1993-noviembre 1996). El hiato de octubre y noviembre de 1993 aparece reflejado, igualmente, en los observatorios de Madrid-Retiro y Barajas si bien los valores del IESP se sitúan en cero, o ligeramente por encima, y las anomalías pluviométricas acumuladas se mantienen negativas; pueden considerarse, por tanto una misma secuencia y, así lo hemos hecho para los dos observatorios a la hora de modelar la longitud de la secuencia más larga.

En las cuencas del Alberche, Tajo Intermedio y Tajuña el lapsus temporal entre las dos secuencias es bastante mayor, a la vez que la duración de las mismas es algo inferior. En los dos últimas la conformación de la primera secuencia se inicia en febrero de 1990 finalizando en agosto (Tajuña) y febrero (Tajo Intermedio) de 1991; a partir de marzo del 1994 aparece un nuevo período que se prolonga hasta diciembre de 1995. Por su parte, la cuenca del Alberche presenta dos secuencias de 17 y 15 meses respectivamente (mayo 1991-septiembre 1992; octubre 1994-diciembre 1995). Por último, en la serie promedio del Henares solo se detecta una secuencia seca de larga duración que se prolonga desde junio de 1994 hasta noviembre de 1995 (18 meses).

En lo referente a la magnitud registrada por esta sequía y, en consecuencia, su peligrosidad, es la fase seca que, indiscutiblemente se coloca a la cabeza de todas las acontecidas durante el período de estudio. Es el ciclo seco donde se registra la máxima intensidad de sequía en la práctica totalidad de las series promedio regionales, con valores del IESP < -2 . En todos los casos, el momento de mayor severidad de la sequía se alcanza en octubre de 1995; de hecho, el 56% de los observatorios muestran en la referida fecha el nivel de sequía más elevado de todo el periodo analizado.

El comportamiento espacial de la sequía en nuestra zona durante la fase seca de los noventa aparece representado en las figuras 6c y 6d. En cuanto la extensión temporal de la secuencia, puede apreciarse como en el 82% del territorio, el episodio seco se alarga más de dos años, superándose incluso los cuatro en el 12% del mismo; la práctica totalidad de este 12% se localiza en la Comunidad de Madrid. Un análisis espacial más pormenorizado pone de relieve que la franja transversal del centro de la región es el espacio donde se registra la racha seca de mayor duración (longitud de la secuencia superior a los cuatro años), ubicándose dentro de este sector la ciudad de Madrid y su área metropolitana (figura 6c).

La intensidad máxima se sitúa en valores de sequía extrema en la mayor parte del territorio, solo la cuenca del Alberche y una pequeña franja de la cuenca del Guadarrama registran intensidades algo inferiores (sequía severa) (figura 6d). El año 1994 fue extremadamente seco o muy seco en la práctica totalidad de las cuencas hidrográficas mostrando mermas de precipitación superior al 40% del valor normal, tal es el caso de los observatorios madrileños de Presa de San Juan (46%), Torrelodones (45%), Arganda (44%) y Casarrubuelos (54%).

En el Plan Especial de Sequías de la Cuenca del Tajo puede encontrarse un detallado análisis de los impactos provocados por esta sequía excepcional en los diferentes sistemas de explotación de la cuenca, así como las medidas adoptadas en su gestión (MMA, *opus cit*). A este respecto, destacar la difícil situación atravesada por el sistema de abastecimiento a Madrid, resultado de la conjunción de, por un lado, la escasez de las aportaciones y, por otro, el fuerte incremento de la demanda experimentado en los años precedentes; ello provocó una situación de riesgo real de no poder atender las demandas de agua potable a Madrid y, ante tal circunstancia, se puso en marcha la conexión con el Alberche, posibilitando la aportación de recursos complementarios al sistema. También hubo de transferirse agua desde el río Sorbe al sistema de abastecimiento a Madrid durante los años hidrológicos 1992-93 y 1993-1994.

C) La fase seca de los años 2004-2007

La fase seca más reciente identificada se caracterizó por ser un período de persistente sequía en buena parte del territorio español. En la cuenca del Tajo, la situación fue especialmente delicada en el sistema de cabecera donde las reservas se encontraban próximas al límite legal de los 240 hectómetros cúbicos, a partir del cual no era posible trasvasar agua para ningún uso, viéndose, por tanto, muy comprometido el abastecimiento a la cuenca del Segura.

En nuestra Zona de Estudio, la serie promedio de todo el conjunto espacial muestra la conformación de una secuencia seca cuya longitud roza los dos años (23 meses), extendiéndose desde diciembre del 2004 hasta octubre del 2006. Idéntica duración del ciclo seco encontramos cuando circunscribimos el análisis a la serie promedio de la Comunidad de Madrid. El nivel de sequía alcanzado en el momento de máxima intensidad del fenómeno se sitúa justo en el límite entre la sequía severa y extrema (figura 5).

La distribución espacial de la duración de esta secuencia pone de manifiesto como en la casi totalidad del territorio (91%) se registra una longitud superior a los dos años. Las áreas donde la racha seca abarca un intervalo temporal más largo se ubican en el sector norte de la cuenca de Guadarrama y en algunos puntos del valle del Lozoya, Tajuña y Henares, donde se sobrepasan los tres años (figura 6e). En lo concerniente a la intensidad máxima registrada, el 87% del territorio alcanza niveles de sequía severa, llegando a ser calificada de extrema en algunos enclaves del extremo suroccidental y de la Alcarria (figura 6f). Desde el punto de vista del porcentaje de reducción de lluvia respecto a la media de la serie, destaca, como ya hemos indicado en párrafos anteriores, el año 2005 con reducciones por encima del 45% en diferentes observatorios de la Comunidad de Madrid (46% en Rozas de Puerto Real y Aranjuez, 47% en Tielmes y 50% en Arganda).

Tal como se apunta en el informe elaborado por el Ministerio de Medio Ambiente sobre *la gestión de la sequía de los años 2004-2007* el sistema de abastecimiento a Madrid y su área de influencia hidráulica se encontró durante todo el año hidrológico 2005-2006 en situación de sequía severa lo que obligó a tomar medidas encaminadas a reducir el consumo de agua (Estrela *et al.*, 2008). De hecho, el acusado déficit de precipitación experimentado en el año 2005 provocó que el sistema entrara en fase de alerta de sequía, según los umbrales establecidos por el Canal de Isabel II. Poco después, el Consejo de la Comunidad de Madrid promulgó el decreto 97/2005 del 29 de septiembre donde se aprobaban una serie de medidas restrictivas del uso del agua para el abastecimiento, como la prohibición del riego de parques y jardines, llenado de piscinas, baldeo de calles, etc.

En el transcurso de esta sequía diferentes localidades de la Cuenca del Alberche (Cadalso de los Vidrios, Cenicientos, Rozas de Puerto Real) sufrieron a lo largo de todo el año hidrológico 2005-2006 restricciones de agua durante las horas nocturnas; a fin de paliar la situación en la medida de lo posible se habilitaron pozos y se efectuaron prospecciones para proporcionar recursos subterráneo y, asimismo, se llevó agua hasta estos municipio mediante camiones cisternas desde el embalse de Picadas (Estrela, *opus cit.*).

Un hecho especialmente relevante a señalar, en relación con esta fase seca, es que los Protocolos de Actuación en Sequía elaborados en el segundo semestre del año 2005, constituyen el antecedente más inmediato de los Planes Especiales de Sequía, publicados en el 2007 por el Ministerio de Medio Ambiente y donde, por primera vez, se establece una gestión planificada de las sequías.

Figura 6. Duración e intensidad máxima de las grandes fases secas: A) duración secuencia seca años 80. B) intensidad máxima secuencia años 80. C) duración secuencia seca años 90. D) intensidad máxima secuencia años 90. E) duración secuencia seca 2004-2007. F) intensidad máxima secuencia 2004-2007.

4.2. Evaluación de la peligrosidad

Para completar el análisis de las secuencias secas de larga duración y, a fin de aproximarnos algo más al conocimiento del comportamiento espacial de la sequía en nuestra zona, hemos cartografiado algunos de los rasgos más significativos de estos episodios secos. La evaluación de la peligrosidad por sequía se deriva del análisis de los siguientes parámetros: a) porcentaje de meses implicados en periodos secos de larga duración, b) la longitud media y máxima de las secuencias, c) la intensidad máxima registrada.

En la mayor parte del territorio (83%) el porcentaje de meses implicados en secuencias secas de larga duración se sitúa por encima del 25% del total analizado, lo que otorga un notable grado de peligrosidad por sequía al conjunto regional; aspecto que debería ser tomado muy en consideración a la hora de gestionar el recurso hídrico. Destacado el aspecto general, cabe señalar las diferencias espaciales observadas. En este sentido, podemos apreciar como la zona metropolitana de Madrid y el corredor del Henares están dotadas de un mayor riesgo por este concepto: la frecuencia de acaecimiento rebasa el 30%. (figura 7a).

Figura 7. Evaluación de la peligrosidad por sequía. A) porcentaje de meses implicados en secuencias secas de duración superior a un año. B) duración media de las secuencias secas. C) longitud máxima de la secuencia seca.

La duración media de las secuencias, en el 66% de la superficie territorial supera los dos años y medio. Esta longitud media de la fase seca se presenta en la práctica totalidad de las superficies de las cuencas del Guadarrama, Alberche y Jarama-Manzanares (figura 7b).

La longitud máxima de las secuencias secas se sitúa entre los cuatro y cinco años en el 66% del territorio; las zonas que han padecido secuencias más largas se localizan en: parte central de la región, valle del Lozoya, zona sur-centro de la cuenca del Tajuña y Tajo Intermedio y suroeste de la cuenca del Alberche (7c).

A estas conclusiones se suma otra ya reseñada en el análisis de las grandes fases secas, como es el hecho de que todas las cuencas, sin excepción, han experimentado niveles de sequía extrema en algún momento. Por todo ello, puede afirmarse que la Comunidad de Madrid y su área circundante está dotada de un elevado grado de peligrosidad por sequía, resaltando, además, que Madrid y su área metropolitana se configura como uno de los sectores dotados de mayor peligrosidad con lo que ello supone de incremento del riesgo (sector de mayor vulnerabilidad y exposición).

5. CONSIDERACIONES FINALES

Los resultados obtenidos en nuestra investigación ponen de manifiesto que la Comunidad de Madrid y áreas circundantes están dotadas de un notable grado de peligrosidad por sequía, directamente relacionado con la alta irregularidad interanual de las precipitaciones y la persistencia de situaciones deficitarias en agua que se observa en nuestra región. La persistencia de los años secos es manifiesta en todas las cuencas; el porcentaje de años secos implicados en secuencias secas de dos o más años de duración se eleva hasta el 81% en el Tajo Intermedio y Henares; al 63% en el Alberche y Guadarrama, al 56% en el Jarama –Manzanares y al 50% en el Tajuña. Para el conjunto de la Zona Estudio y de la Comunidad de Madrid dichos porcentajes se sitúan en el 69%.

Las conclusiones extraídas en la caracterización y modelado espacial de las secuencias secas de larga duración, tanto en diferentes momentos temporales como para el conjunto del periodo de estudio, ratifican la significativa peligrosidad por sequía experimentada en la zona. Una peligrosidad fundamentada en tres aspectos muy concretos: 1º) en el 83% del territorio el porcentaje de meses implicados en secuencias secas de longitud superior al año se sitúa por encima del 25% del total de meses analizados; 2º) En el 66% del territorio la duración media de la secuencia seca rebasa los dos años y medio y la racha máxima se sitúa entre los cuatro y cinco años; 3º) todas las cuencas han padecido alguna secuencia seca donde la intensidad máxima registrada califica al nivel de sequía como extremo. Todo ello exige una gestión planificada del recurso hídrico en la que, necesariamente, debe contemplarse la gestión del riesgo de sequía.

Por último, dos consideraciones en relación con las aproximaciones metodológicas ensayadas: 1ª) el estudio a escala anual es una buena aproximación al tema, constatada por los dos métodos aplicados: *Índice de*

Precipitación Estandarizada (SPI) y quintiles. En ambos casos se obtiene una visión del fenómeno bastante completa, si bien consideramos que la aplicación del SPI tiene una ventaja añadida porque nos permite ver más fácilmente la intensidad anual de la sequía y la magnitud de la misma, mediante el cálculo del SPI acumulado. 2ª) Pese a la utilidad del estudio a escala anual, creemos necesario descender a la escala mensual y delimitar las secuencias secas a partir de los déficit de precipitación acaecidos en cada uno de los meses del período de observación. En este sentido, y a tenor de los resultados obtenidos en nuestro trabajo, el *Índice Estandarizado de Sequía Pluviométrica* es un método muy adecuado para caracterizar las secuencias secas de larga duración, dado que permite establecer con precisión el inicio y final de la secuencia, la duración y la intensidad registrada en cada momento de la misma.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Jorge Alcaide Muñoz, becario del Laboratorio de Geografía Aplicada del Departamento de Geografía de la UAM, la ayuda prestada en la elaboración de los mapas.

BIBLIOGRAFÍA

- ALMARZA MATA, C. (2000): "Sequías: indicadores de alerta, intensidad y seguimiento". *Revista de Real Academia de Ciencias Exact. Fis. Nat.*, vol. 94, nº 2, págs. 149-157
- CAMARILLO NARANJO, J.M. (2012): *Diseño, metodología y modelo de datos para el cálculo, seguimiento, predicción y difusión del Índice Estandarizado de Sequía Pluviométrica en Andalucía*. Tesis Doctoral.
- ESTRELA, T. y RODRIGUEZ, A. (Coord.) (2008): *La gestión de la sequía de los años 2004 a 2007*. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid, 199 pág.
- GALÁN GALLEGU, E. (2004): "Sequías climáticas en la Meseta Meridional" en *Historia, Clima y Paisaje*. Estudios geográficos en memoria del profesor Antonio López Gómez. Universidad de Valencia, Autónoma de Madrid y Universidad de Alicante, págs. 337-352.
- GARCÍA, R. y CONESA, C. (2006): "Secuencias secas de larga duración en la Cuenca del Guadalentín (Murcia-Almería)", en CUADRAT *et al.* (Eds.): *Clima, Sociedad y Medio Ambiente*, Zaragoza, AEC, serie A, nº 5, págs. 371-382
- GÓMEZ NAVARRO, L. (2002): "Aproximación metodológica al estudio de secuencias secas de larga duración: el caso de las Islas Baleares" en GUIJARRO J.A. *et al.* (Eds.): *El clima y el agua*. Palma de Mallorca, AEC. Serie A, nº3, págs 427-436.

- LABAJO MONTERO, J. (2011): *Sequías climáticas en la Comunidad de Madrid y áreas circundantes*. Trabajo de investigación presentado para la obtención del DEA, bajo la dirección de Encarna Galán Gallego, Madrid, Dpto. de Geografía UAM, (inédito).
- MARCOS VALIENTE, O. (2001): "Sequía: definiciones, tipologías y métodos de cuantificación" en *Investigaciones Geográficas*, Alicante, nº 26, págs. 59-80.
- MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE (2007): *Plan Especial de Actuación en Situaciones de Alerta y Eventual Sequía de la Cuenca Hidrográfica del Tajo*. MMA. Madrid, 138 págs.
- MORALES GIL, A. (2001): "Sequías y sobreexplotación de acuíferos en la Submeseta Sur", en GIL, A. y MORALES, A. (Eds.): *Causas y consecuencias de las sequías en España*. Alicante. Caja de Ahorros del Mediterráneo e Instituto Universitario de Geografía de la Universidad de Alicante, págs. 389-420.
- OLCINA CANTOS, J. (2001): "Tipología de sequías en España" en *Ería*, nº 56, págs. 201-227.
- PITA LÓPEZ, M.F. (2000): "Un nouvel indice de sécheresse pour les domaines méditerranéens. Application au bassin du Guadalquivir (Sud-Ouest de l'Espagne)", en *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, vol. 13, págs. 225-234.
- PITA LÓPEZ, M.F. (2001): "Sequías en la Cuenca del Guadalquivir", en GIL OLCINA, A. y MORALES GIL, A. (Eds.): *Causas y consecuencias de las sequías en España*. Alicante, Caja de Ahorros del Mediterráneo e Instituto Universitario de Geografía de la Universidad de Alicante, págs. 303-344.
- PITA LÓPEZ, M.F. (2007): "Recomendaciones para el establecimiento de un sistema de indicadores para la previsión, el seguimiento y la gestión de la sequía", en *La Sequía en España. Directrices para minimizar su impacto*, Comité de Expertos en Sequía, Ministerio de Medio Ambiente, págs. 107-132.
- PITA, M.F., AGUILAR, M., CAMARILLO, J.M., ÁLVAREZ, J, FERNÁNDEZ, C., RUIZ. M.C., ABREU, L. (2002): "La covariación espacial de la precipitación en la Península Ibérica y su contribución al establecimiento de mecanismos de compensación interterritorial como instrumento de ayuda en la gestión de las sequías", en *Actas del III Congreso Ibérico sobre la Planificación y Gestión del Aguas*, Sevilla, págs 110-115.