

LOCAL ANALYSIS OF CHARACTERISTICS AND FREQUENCY OF EXTREME DROUGHTS IN MALAGA BY USING THE SPI (STANDARDIZED PRECIPITATION INDEX)

Ayuso Munoz, J. L.; García Marín, A.; Ayuso, P.; Estévez Gualda, J.; Rodriguez, F.

Universidad de Córdoba

Drought is a natural and worldwide phenomenon that has significant economic, social and environmental impacts. It is characterized by persistent time periods with registered rainfall data below the mean, and is one of the major climate related hazard. The SPI (Standardized Precipitation Index) is simple and probabilistic meteorological index widely used to identify the duration and severity of droughts. It can be used in risk management and decision analysis, and can be tailored to time periods of user's interest. It only needs rainfall data. In this work, the duration, intensity and magnitude of extreme droughts for the period 1945-2011 have been characterized in Malaga (Airport) by using monthly rainfall data. The frequency of the events has been also obtained. The drought events were identified and characterized using the SPI applied to time scales of 1, 3, 6 and 12 consecutive months.

Keywords: *Rainfall; SPI; Drought*

ANÁLISIS LOCAL DE LAS CARACTERÍSTICAS Y FRECUENCIA DE LAS SEQUIAS EXTREMAS EN MÁLAGA, UTILIZANDO EL SPI (STANDARDIZED PRECIPITATION INDEX).

La sequía es un fenómeno natural que ocasiona importantes impactos económicos, sociales y medioambientales, caracterizado por periodos persistentes de tiempo en los que la precipitación registrada es menor que la precipitación media y constituye uno de los principales riesgos naturales relacionados al clima. El SPI (Standardized Precipitation Index) es un índice meteorológico ampliamente usado para identificar la duración y la gravedad de las sequías debido a su simplicidad, a su naturaleza probabilística pudiéndose utilizar en la gestión del riesgo y en el análisis de decisiones y adaptable a distintos periodos de tiempo de interés. Solo requiere datos de precipitación. En este estudio se ha caracterizado la duración, intensidad y magnitud de las sequías extremas, así como la frecuencia de estos eventos en el periodo 1945-2011, basado en los datos de precipitación mensual de Málaga (Aeropuerto), Los eventos de sequía fueron identificados y caracterizados usando el SPI aplicado a las escalas temporales de 1, 3, 6 y 12 meses consecutivos.

Palabras clave: *Precipitación; SPI; Sequía*

Correspondencia: amanda.garcia@uco.es

1. Introducción

Las sequías son reconocidas como un desastre ecológico y han atraído la atención de ambientalistas, ecologistas, hidrólogos, meteorólogos, geólogos e ingenieros agrónomos. Las sequías constituyen uno de los riesgos naturales más importantes que condiciona fuertemente las actividades humanas y el desarrollo económico (AMS, 2004). De todos los desastres naturales acaecidos en el siglo XX, las sequías han sido los que mayor impacto perjudicial han ocasionado (Obasi, 1994). La sequía es una característica normal y recurrente del clima, que ocurre virtualmente en todos los regímenes climáticos y se refiere principalmente a la reducción en la cantidad de precipitación recibida durante un período prolongado de tiempo, tal como una estación o un año. Es una anomalía temporal, en contraste con la aridez, que es una característica permanente del clima regional y se limita a las zonas de baja precipitación (Wilhite, 1992),

En los últimos años, intensas sequías a gran escala se han observado en todos los continentes afectando a grandes áreas. En un estudio a escala continental de los posibles impactos del cambio global sobre las futuras frecuencias de avenidas y sequías en Europa, bajo los escenarios propuestos de cambio global, Lehner et al. (2006) indican para el sur y sureste de Europa un aumento significativo de la frecuencia de las sequías. Durante los últimos 30 años, Europa se ha visto afectada por un número de eventos de sequía importantes, siendo los más notables los de 1976 (Norte y Europa Occidental), 1989 y 1991 (la mayoría de Europa), y más recientemente la sequía de 2003, ocurriendo la sequía más grave de los últimos 60 años en la en la península Ibérica en 2005 (Mishra y Singh, 2010).

No existe una definición única de sequía. Mishra y Singh (210) en una excelente revisión de los conceptos fundamentales de las sequías describen exhaustivamente sus muchas definiciones. En general, puede convenirse en que la sequía es un fenómeno natural que se produce cuando existe un periodo de tiempo con deficiencia sostenida y extendida de la precipitación en relación a los niveles normales registrados en dicho periodo. Las sequías pueden definirse en términos meteorológicos, agrícolas, hidrológicos y socio-económicos (Wilhite y Glantz, 1985; [American Meteorological Society, 2004](#)). Las sequías meteorológicas se basan en un déficit de precipitación respecto a lo que se considera "normal" y expresan una de las principales causas de la sequía; las sequías agrícolas se basan en un déficit del agua disponible para las plantas; las sequías hidrológicas se basan en un déficit de los caudales de las corrientes, reflejando los efectos e impactos de las sequías; y las sequías socioeconómicas se basan en un déficit en el abastecimiento de agua respecto a la demanda. Los diferentes tipos de sequías han propiciado el desarrollo de un gran número de índices para cuantificar la sequía. En Heim (2002) y Mishra y Singh (2010) pueden consultarse una detallada relación de los diversos índices utilizados y descritos en la literatura. Prácticamente todos los índices de sequía utilizan la precipitación ya sea individualmente o en combinación con otras variables hidrometeorológicas (p.e., la evapotranspiración), dependiendo del tipo de requisitos. Dificultades históricas en la cuantificación de las posibles variables que acompañen a la precipitación limitan el uso y aplicación de estos índices. De hecho, los índices basados únicamente en datos de precipitación realizan un buen desempeño en comparación con índices más complejos (Guttman, 1998).

El Índice de Precipitación Normalizada (SPI) desde su propuesta por McKee et al., (1993, 1995) es amplia y universalmente utilizado para estudiar la sequía meteorológica (e.g. Edwards y McKee, 1997; Guttman, 1998, 1999; Bonaccorso et al., 2003; Vicente-Serrano,

2006: Santos et al., 2011; Raizei et al., 2012) y ha demostrado ser una herramienta útil en la estimación de la intensidad, magnitud y duración de los eventos de sequía.

El trabajo propuesto se centra en el análisis de la sequía meteorológica en Málaga utilizando el SPI como índice para cuantificar la severidad, magnitud y duración de las sequías, utilizando la serie de datos mensuales registrados en el observatorio del Aeropuerto. De las series temporales del SPI para las diferentes escalas temporales seleccionadas se extraerán los eventos máximos anuales para constituir las series de valores máximos anuales de las sequías, con las que se procederá al análisis de frecuencias para determinar los cuantiles, de las sequías, para distintos periodos de retorno, lo que proporcionará una evaluación del riesgo de sequía local.

2. Área de estudio y datos de lluvia utilizados

Se ha dispuesto de los datos de precipitación mensual del observatorio localizado en el Málaga-Aeropuerto (36° 40' 00" N, 04° 29' 17" W; 7 m.s.n.m) de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) registrados durante el periodo 1945 a 2011. La zona se caracteriza por poseer un clima mediterráneo con una temperatura media anual de 18°C. La provincia de Málaga está sometida desde antiguo a ciclos de inundaciones y sequías, motivadas por las irregularidades de su clima mediterráneo. La precipitación media anual en Málaga-Aeropuerto es de 553 mm (periodo 1945-2011) y el 80,8 % de la lluvia media anual ocurre desde principios de octubre a finales de marzo (otoño e invierno), destacando el predominio de la precipitación invernal con el 43,6 % de la precipitación media anual. Es de destacar la elevada irregularidad interanual de las precipitaciones, registrándose años muy lluviosos junto a años extraordinariamente secos. En consonancia con esta alta variabilidad se registran numerosos extremos pluviométricos por defecto y por exceso.

3. Metodología

Se exponen seguidamente los enfoques metodológicos aplicados en este trabajo sobre análisis de sequías meteorológicas mediante el SPI, y sobre el análisis de frecuencias de la intensidad y gravedad de las sequías mediante los momentos-L.

3.1 Series temporales de la precipitación mensual

El primer paso para el cálculo del SPI es conformar las series temporales de precipitación mensual acumulada a las diversas escalas temporales consideradas: 1, 3, 6 y 12 meses. Para cada uno de los doce meses se calcula la precipitación acumulada, separadamente, para cada escala seleccionada. La precipitación acumulada $P_{i,j}^m$ en un mes j y año i dados, depende de la escala temporal elegida, m . Por consiguiente, $P_{i,j}^m$, la precipitación total en el mes j del año i en los $m-1$ meses consecutivos anteriores, con $m \leq 12$, se calcula como (Capra y Scicolone, 2012)

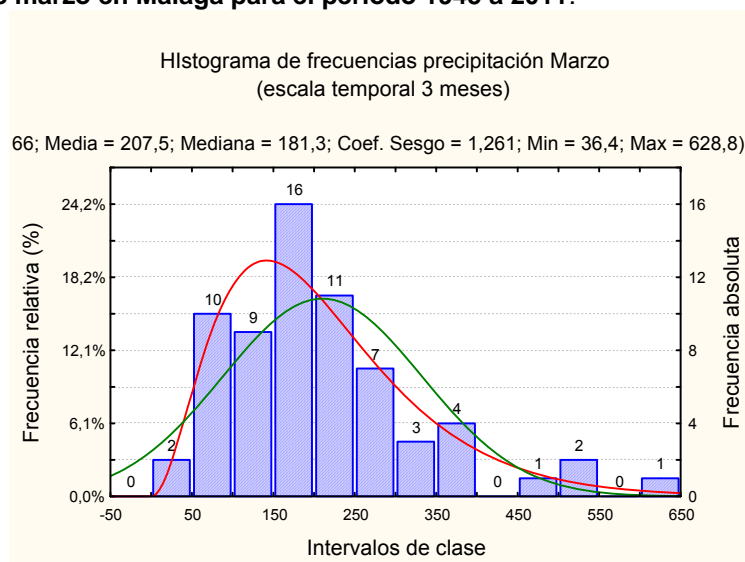
$$P_{i,j}^m = \sum_{k=13-m+j}^{12} p_{i-1,k} + \sum_{k=1}^j p_{i,k} \quad \text{si } j < m \quad (1)$$

$$P_{i,j}^m = \sum_{k=j-m+1}^j p_{i,k} \quad \text{si } j \geq m \quad (2)$$

donde $p_{i,k}$ es la precipitación en el primer mes del año i (mm).

Las series temporales de la precipitación para las diversas escalas temporales (mensual, estacional, anual, etc.) no siguen la distribución normal sino más bien distribuciones sesgadas hacia los mayores valores de la precipitación (distribuciones sesgadas a la derecha). Esto implica que la precipitación media para un periodo dado es mayor que la mediana. Por consiguiente más de la mitad del tiempo, los totales de la precipitación están por debajo de la media. Por ejemplo, la figura 1 muestra el histograma de la distribución de frecuencias de los totales de precipitación de marzo a escala temporal de 3 meses (enero, febrero y marzo), en Málaga (Aeropuerto) para el periodo 1945 a 2011. Puede observarse el sesgo de la distribución de la frecuencia de la precipitación, así como el ajuste a las distribuciones gamma y normal. El valor de la media es superior al valor de la mediana y el coeficiente de sesgo positivo y mayor que cero, lo cual indica que las distribución de frecuencias es sesgada a la derecha y no sigue la distribución normal

Figura 1. Distribución de frecuencia de la precipitación acumulada de tres meses para el mes de marzo en Málaga para el periodo 1945 a 2011.



3.2 Evaluación de la sequía mediante el SPI.

La precipitación es el factor primario que controla la formación y persistencia de la sequía junto con otras variables como la evapotranspiración. Para identificar caracterizar y cuantificar los atributos de los diversos componentes de la sequía se han propuesto diversos índices. Entre estos el Standardized Precipitation Index (SPI) propuesto por McKee (1993, 1995), aunque relativamente reciente, es considerado como el índice más fiable para medir la intensidad, duración y magnitud de la sequía (Guttman, 1998; Keyantash y Dracup, 2002; Lloyd-Hughes y Saunders, 2002).

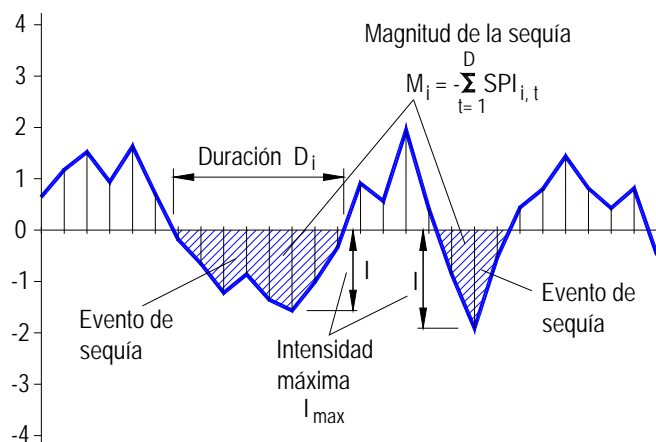
Tabla 1. Clasificación de las sequías según el SPI (Hayes et al., 1999)

Valor del SPI	Tipo de Sequía	Ocurrencia (%)
---------------	----------------	----------------

$\geq 2,00$	Extremadamente húmedo	2,3
1,5 a 1,99	Muy húmedo	4,4
1,00 a 1,49	Moderadamente húmedo	9,2
-0,99 a 0,99	Casi normal	68,2
-1,00 a -1-1,49	Moderadamante seco	9,2
-1,50 a -1,99	Severamente seco	4,4
$\leq -2,00$	Extremadamente seco	2,3

La caracterización de un evento de sequía supone la identificación de la fecha de inicio y de finalización, su intensidad y su magnitud (McKee, 1993). Un evento de sequía se asume como un número de meses consecutivos en que los valores del SPI permanecen negativos. Basado en el rango de valores del SPI los eventos de sequía se clasifican de suaves a extremos (Tabla 1). La duración de un evento de sequía, D_i , es el periodo de tiempo entre el comienzo de la sequía y su finalización y se toma como el número de intervalos (meses) consecutivos de SPI negativo. Puesto que el evento de sequía es definido como agregación a la escala temporal mensual, la duración mínima es 1 mes. La intensidad de la sequía es el mayor valor del SPI durante el evento de sequía, I_i , y la magnitud, M_i , es la suma acumulada de los valores del SPI durante el evento de sequía. (Figura 2).

Figura 2 Definición de las propiedades de la sequía basadas en el índice SPI



Cálculo del SPI

El cálculo del SPI requiere el conocimiento de la distribución de frecuencias de los datos de las series temporales de precipitación mensual acumulada a las diversas escalas temporales consideradas con al menos 30 años de datos. Una función de distribución gamma se ajusta a cada una de las distribuciones empíricas de frecuencia de las series temporales de precipitación acumulada establecidas para las escalas temporales seleccionadas según la metodología indicada en la sección 2.1. Posteriormente, se realiza una transformación de equiprobabilidad de la distribución gamma a la distribución normal. Los valores negativos de la variable normal estandarizada se comparan con los límites de las diferentes clases de sequía establecidas en la Tabla 1. Este último paso identifica el nivel de gravedad de un evento de sequía.

La función de densidad de probabilidad de la distribución Gamma es

$$g(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} \quad (3)$$

donde α es el parámetro de forma ($\alpha > 0$), β es el parámetro de escala ($\beta > 0$), x es la cuantía de la precipitación ($x > 0$) y $\Gamma(\alpha)$ es la función gamma. El ajuste de la distribución a los datos requiere la estimación de los parámetros α y β para cada escala temporal seleccionada (1, 3, 6, y 12 meses) y para cada mes del año. La función de distribución acumulada $G(x)$ será (Rao y Hamed, 2000)

$$G(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \int_0^x t^{\alpha-1} e^{-t/\beta} dt \quad (4)$$

Expresión que no puede obtenerse de forma directa. Haciendo el cambio $y = x/\beta$, se obtiene

$$G(y) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^y y^{\alpha-1} e^{-y} dy \quad (5)$$

La estimación de los parámetros α y β mediante el método de los momentos lineales requiere los siguientes pasos (Hosking y Wallis, 1997)

- a) Ordenación de la serie de datos a ajustar en orden ascendente
- b) Obtención de los momentos de probabilidad ponderada b_0 y b_1 de la serie ordenada mediante las expresiones

$$b_0 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j \quad b_1 = \frac{1}{n} \sum_{j=2}^n \frac{(j-1)}{(n-1)} x_j$$

- c) Estimación de los momentos-L, $l_1 = b_0$ y $l_2 = 2b_1 - b_0$ y del cociente de variación-L, $t = l_2/l_1$
- d) Estimación de los parámetros α y β de la distribución Gamma mediante las siguientes expresiones

$$\text{Si } 0 < t < 1/2 \text{ entonces } z = \pi t^2 \text{ y } \alpha = \frac{1-0,3080 z}{z-0,05812 z^2+0,01765 z^3} \quad (6)$$

$$\text{Si } 1/2 < t < 1 \text{ entonces } z = 1 - t \text{ y } \alpha = \frac{1-0,3080 z}{z-0,05812 z^2+0,01765 z^3} \quad (7)$$

$$\text{Finalmente, el parámetro } \beta \text{ es } \beta = l_1/\alpha \quad (8)$$

Puesto que las muestras de datos de precipitación pueden contener diversos valores cero, para tener en cuenta la probabilidad del valor cero, y dado que la distribución Gamma no está definida en $x = 0$, la función de probabilidad acumulada de la distribución Gamma se modifica como

$$H(x) = q + (1 - q)G(x) \quad (9)$$

donde q es la probabilidad de precipitación cero. Si m es el número de ceros en una serie temporal de datos de precipitación entonces q puede estimarse como m/n . La distribución

Gamma es luego transformada en una distribución normal tipificada de media cero y varianza unidad, resultando el valor del SPI la probabilidad transformada. La transformación de probabilidad se realiza mediante las siguientes expresiones (Abramowitz y Stegun, 1965) que convierten la probabilidad acumulada a la variable aleatoria normal tipificada Z

$$Z = SPI = - \left(t - \frac{C_0 + C_1 t + C_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right) \quad \text{for } 0 < H(x) \leq 0.5 \quad (10)$$

$$Z = SPI = + \left(t - \frac{C_0 + C_1 t + C_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right) \quad \text{for } 0.5 < H(x) \leq 1.0 \quad (11)$$

siendo

$$t = \sqrt{\ln \left(\frac{1}{(H(x))^2} \right)} \quad \text{for } 0 < H(x) \leq 0.5 \quad (12)$$

$$t = \sqrt{\ln \left(\frac{1}{(1.0 - H(x))^2} \right)} \quad \text{for } 0.5 < H(x) \leq 1.0 \quad (13)$$

$$C_0 = 2.515517; C_1 = 0.802853; C_2 = 0.010328 \\ d_1 = 1.432788; d_2 = 0.189269; d_3 = 0.001308$$

Una vez normalizados los valores de la precipitación, la tipología de la sequía se indica en la Tabla 1. Los valores positivos del SPI indican valores mayores que la precipitación media (periodo húmedo) y valores negativos indican menos que la precipitación media (periodo seco).

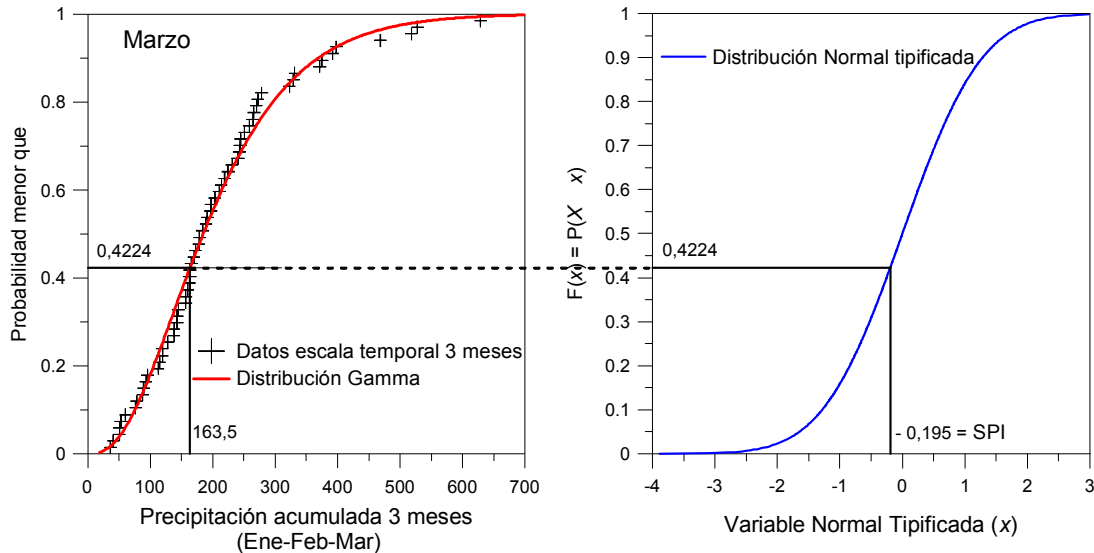
Para el análisis de la sequía mediante el SPI se requiere un registro de precipitación mensual de al menos 30 años (McKee y col., 1993). Posteriormente, Guttman (1994) investigó el efecto del tamaño de la muestra sobre la distribución de la precipitación ajustada por los momentos-L y halló que se requieren de 40 a 60 años de registro para una estimación estable de los parámetros en la parte central de la distribución y de 70 a 80 años de registro para estabilidad en las colas, las cuales son importantes en el uso del SPI. En este trabajo se ha dispuesto de 67 años de registro de datos mensuales de precipitación.

El proceso de transformación de los valores dados por la distribución Gamma a la distribución Normal tipificada para obtener los correspondientes valores del SPI se ilustra en la Figura 3, como un ejemplo, para el SPI del mes de enero a la escala temporal de 3 meses. La gráfica de la izquierda de la figura muestra la distribución empírica de probabilidad acumulada de los datos de precipitación acumulada de tres meses (enero-febrero-marzo) correspondiente a los meses de marzo de la serie temporal de los años 1946 a 2011, junto con la distribución teórica de probabilidad acumulada de la distribución Gamma ajustada. La segunda gráfica corresponde a la distribución normal tipificada. Para convertir un determinado valor de precipitación a su correspondiente valor de SPI, se localiza la cuantía de la precipitación sobre el eje de abscisas de la gráfica de la izquierda y a continuación trazando una línea perpendicular hasta interceptar con la distribución teórica ajustada (distribución Gamma) se localiza el punto que da la probabilidad teórica

de la cuantía de la precipitación. Trazando la línea horizontal por este punto hasta interceptar a la distribución normal tipificada se obtiene un punto cuya proyección sobre el eje de abscisas de la distribución normal proporciona el valor del SPI de la precipitación considerada. En la figura 3 a la precipitación de 163,5 mm de precipitación corresponde un SPI de $-0,195$.

El SPI tiene la capacidad de cuantificar el déficit de precipitación para diversas escalas temporales, el cual refleja el impacto de la sequía en la disponibilidad de los recursos hídricos. Los caudales, el agua subterránea y el almacenamiento en los embalses reflejan las anomalías de la precipitación a escalas temporales a largo plazo, mientras que las condiciones de humedad del suelo responden a anomalías de la precipitación en escalas temporales relativamente cortas (Tsakiris y Vangelis, 2004.). Las escalas temporales cortas son relevantes por ser indicativas de sequías meteorológicas y agrícolas. Así, el SPI a escala temporal de 3 meses proporciona una estimación estacional de la precipitación, la cual refleja las condiciones de humedad a corto y medio plazo. El SPI de 6 meses estima la precipitación a medio plazo, la cual puede estar asociada con caudales y niveles de embalse anómalos, mientras que el SPI con una escala temporal más larga de 12 meses refleja los patrones de precipitación a largo plazo y está probablemente relacionado a los caudales, niveles de embalse e incluso a niveles de agua subterránea, permitiendo identificar la sequía hidrológica y detectar los principales periodos secos (Vicente-Serrano et al., 2004), resultando apropiado para el seguimiento de las sequías hidrológicas (Hayes et al., 1999)

Figura 3. Ejemplo de transformación equiprobable de la distribución ajustada Gamma a la distribución normal tipificada



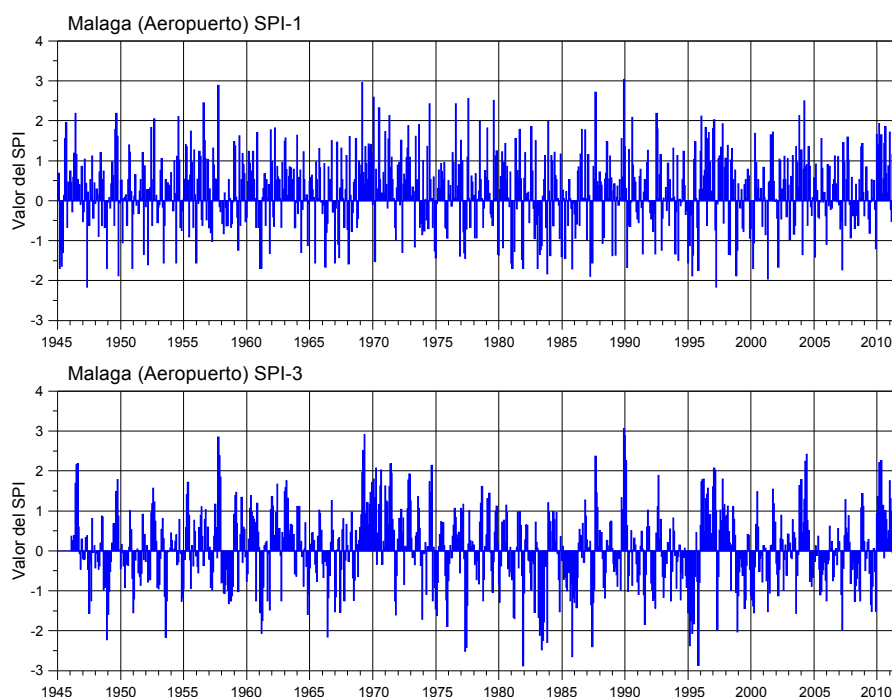
4. Resultados

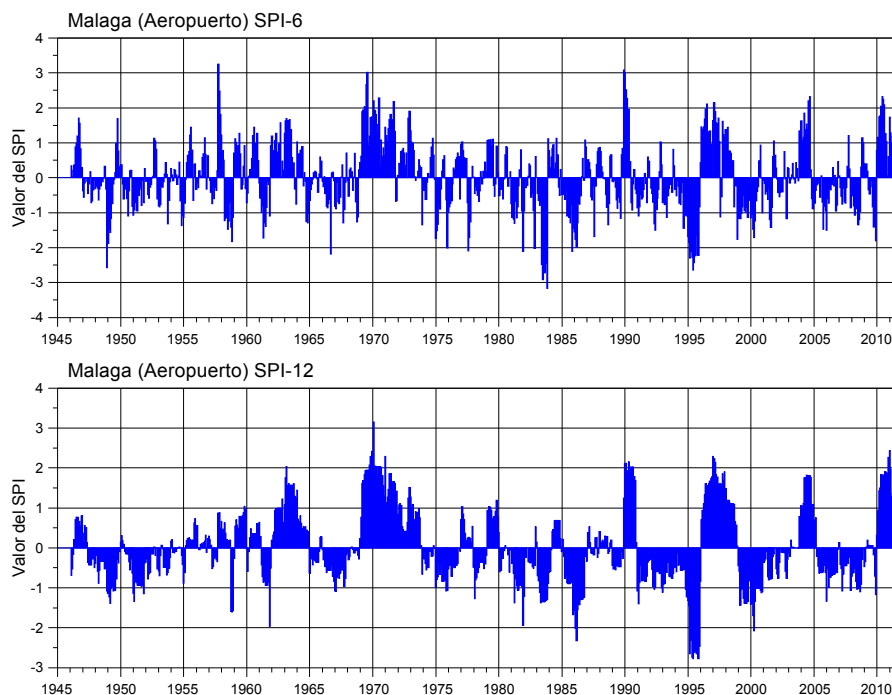
Para la realización de este estudio, los autores han desarrollado un software en Visual Fortran para el cálculo del SPI y el análisis de las sequías. El software incluye el cálculo de los valores del SPI a las escalas temporales de 1, 3, 6 y 12 meses, el ajuste de estas series temporales de la precipitación a la distribución Gamma y su posterior transformación a la distribución Normal tipificada. Como resultado muestra la probabilidad acumulada versus la precipitación y finalmente especifica las características de duración, intensidad y magnitud los episodios de sequía identificados.

En la Figura 4 se muestran gráficamente los resultados del SPI, para las cuatro escalas temporales seleccionadas, calculados mediante el ajuste a la distribución Gamma y su posterior transformación de equiprobabilidad a la distribución normal tipificada.

Una vez identificados todos los episodios de sequía en cada una de las escalas temporales consideradas se procedió a seleccionar aquellos episodios considerados como graves o extremos, según la cuantía de su magnitud. En la Tabla 2 se especifican los valores de los tres atributos característicos de la sequía: duración, intensidad y magnitud.

Figura 4 Valores del SPI para las escalas temporales de 1, 3, 6 y 12 meses





Una vez identificados todos los episodios de sequía en cada una de las escalas temporales consideradas se procedió a seleccionar aquellos episodios considerados como graves o extremos, según la cuantía de su magnitud. En la Tabla 2 se especifican los valores de los tres atributos característicos de la sequía: duración, intensidad y magnitud.

Tabla 2 Características de los eventos graves y extremos de sequía

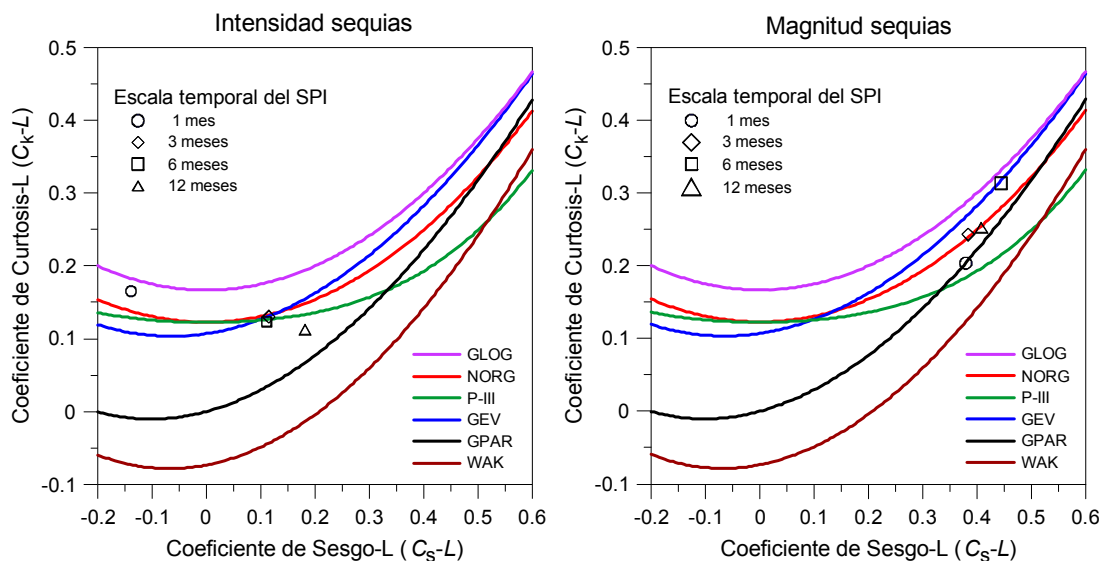
SPI	Nº Eventos	Duración (meses)			Intensidad			Magnitud			%
		Minim	Media	Máx	Minim	Media	Máx	Minim	Media	Máx	
SPI-1	48	1	2,17	8	0,74	1,53	2,17	1,51	2,69	7,76	29,81
SPI-3	61	2	4,82	14	0,46	1,52	2,82	1,51	4,31	15,23	55,45
SPI-6	46	2	8,15	24	0,55	1,40	3,17	1,68	6,30	32,14	60,53
SPI-2	23	3	18,43	61	0,52	1,26	2,77	1,67	12,87	62,77	63,89

(*) % sobre el total de episodios de sequía registrados a la escala temporal correspondiente

4.1 Análisis probabilístico de los mínimos de los valores extremos anuales del SPI

La información sobre las magnitudes y frecuencias de las sequías extremas es esencial para la planificación y gestión de los recursos hídricos. Para este propósito, es importante analizar los valores extremos anuales de las intensidades y magnitudes de las sequías en las diversas escalas temporales analizadas. Consecuentemente, se hace necesario el análisis de frecuencias de estos valores extremos anuales mediante la selección y ajuste de la función de distribución de probabilidad (FDP) más adecuada para cada una de las escalas temporales de interés.

Figura 5. Diagramas de los momentos-L de los valores máximos anuales del SPI de 1, 2, 3, 6 y 12 meses.



La selección de la FDP más adecuada para cada escala temporal del SPI se realiza mediante el procedimiento gráfico del diagrama de los cocientes de los momentos-L (Vogel y Fennessey, 1993) ya que son ampliamente utilizados en el análisis de frecuencias en la fase de selección de la distribución más apropiada. Ejemplos de la utilidad y aplicación de estos diagramas pueden hallarse en Hosking and Wallis (1997), Kumar et al. (2003), Modarres (2008), Saf (2010), Nuñez et al. (2011) y Eslamian et. al. (2012).

En la Figura 5 se muestran los valores de los coeficientes de sesgo-L y de curtosis-L de las series de intensidad y magnitud de las sequías extremas anuales para las diferentes escalas temporales del SPI, y las relaciones teóricas entre los coeficientes de sesgo-L y curtosis-L para las distribuciones normal generalizada (NORG), logística generalizada (GLOG), Pearson tipo III (P-III), generalizada de valores extremos (GEV), Pareto generalizada (GPAR) y Wakeby (WAK). Puede observarse que para la intensidad de las sequías la distribución Pearson tipo III puede ser apropiada por la proximidad de dicha curva a los puntos representativos de los C_S-L y C_K-L de las series de extremos anuales de las cuatro escalas temporales del SPI de interés. En cuanto a la magnitud de las sequías se ha seleccionado la distribución de Pareto generalizada (GPAR) por la proximidad de los puntos representativos de los coeficientes C_S-L y C_K-L a dicha distribución, aunque la serie de extremos anuales del SPI-6 puede ser ajustada por la generalizada de valores extremos (GEV), y las series de SPI-3 y SPI-12 podrían ajustarse por la normal generalizada (GNOR).

Tabla 3. Cuantiles de intensidad de la sequía

SPI	Periodo de retorno (años)					
	2	5	10	25	50	100
SPI-1	-1,60	-1,83	-1,93	-2,02	-2,06	-2,10
SPI-3	-1,59	-2,09	-2,39	-2,74	-2,99	-3,22
SPI-6	-1,38	-1,94	-2,27	-2,66	-2,93	-3,19
SPI-12	-1,18	-1,17	-2,15	-2,61	-2,95	-3,27

Una vez identificadas las FDP apropiadas para cada escala temporal, se han estimado los cuantiles para diversos periodos de retorno (Tablas 3 y 4). Los cuantiles son usados para proporcionar una estimación de las características de la sequía (intensidad y/o magnitud) para determinados periodos de retorno o niveles de probabilidad.

Tabla 3. Cuantiles de magnitud de la sequía

SPI	Periodo de retorno (años)					
	2	5	10	25	50	100
SPI-1	-2,30	-3,51	-4,51	-5,93	-7,10	-8,35
SPI-3	-3,79	-6,70	-9,10	-12,56	-15,42	-18,51
SPI-6	-4,58	-9,17	-13,35	-20,00	-26,05	-33,14
SPI-12	-8,53	-20,27	-30,35	-45,48	-58,47	-72,96

5. Conclusiones

Se ha analizado el fenómeno natural de la sequía en Málaga mediante el índice de precipitación normalizada SPI por ser el más popular y simple de los índices existentes para identificación y caracterización de las sequías. Aunque existen diversos índices alternativos, ninguno posee la aplicabilidad universal del SPI (Tsakiris et al., 2007). Su naturaleza probabilística determina su uso en la gestión del riesgo y en el análisis de decisiones.

En este trabajo se ha tratado el SPI a las escalas temporales de 1, 3, 6 y 12 meses. Identificándose en cada una de ellas todos los episodios de sequía acontecidos en Málaga entre 1945 y 2011, cuantificando sus duraciones, intensidades y magnitudes.

La aplicación de la metodología del análisis de frecuencias con los momentos-L permitió identificar las funciones de distribución más apropiadas para el ajuste de las series de valores extremos anuales de las sequías a las diversas escalas temporales consideradas en este estudio. La estimación de cuantiles de la intensidad y magnitud de los episodios de sequía para diversos periodos de retorno permite evaluar el riesgo de sequía lo que será de gran utilidad para la previsión y gestión de estos fenómenos climáticos en la política de gestión de los recursos hídricos en la localidad de Málaga.

Aunque en este trabajo no se ha tratado de modelizar estadísticamente la duración de los episodios de sequía, como trabajo futuro sería necesario un análisis de frecuencias bivariado para abordar el análisis de las variables magnitud y duración de las sequías por ser ambos aleatorios en la naturaleza y mutuamente correlacionados.

Agradecimientos:

Los autores agradecen a la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) el suministro de los datos de precipitación utilizados en el trabajo. Asimismo, manifiestan su agradecimiento al

Proyecto P08-AGR-03925, "Manejo y conservación del agua y el suelo en sistemas agrícolas a escala de cuenca hidrográfica", financiado por la Junta de Andalucía, dentro del cual se realizó este estudio.

6. Bibliografía

- Abramowitz M y I A Stegun, 1965. *Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables*. Dover Publications, Inc., New York
- American Meteorological Society (AMS), 2004. *Statement on meteorological drought*. Bulletin American Meteorological Society, 85, 771–773
- Bonaccorso B., I. Bordi, A. Cancelliere y G. Rossi, 2003. *Spatial variability of drought: An analysis of the SPI in Sicily*. Water Resources Management, 17: 273-296
- Capra A y B Scicolone, 2012. *Spatiotemporal variability of drought on a short–medium time scale in the Calabria Region (Southern Italy)*. Theor Appl Climatol, DOI 10.1007/s00704-012-0720-0
- Edwards D.C, T.B. McKee, N.J. Doesken and J. Kleist, 1997. *Historical analysis of drought in the United States*. Seven Conference on Climate Variations, pp:129-139. 2-7 February, Long Beach, California
- Eslamian S., H. Hassanzadeh, J. Abedi-Koupai and M. Gheysari, 2012. *Application of L-Moments for Regional Frequency Analysis of Monthly Drought Indexes*. Journal of Hydrologic Engineering, 17(1): 32-42
- Guttman N B, 1998. *Comparing the palmer drought index and the Standardized Precipitation Index*. J. Am. Water Res. Assoc., 34:113–121
- Guttman NB, 1999. *Accepting the standardized precipitation index: a calculation algorithm*. J Am Water Resour Assoc (JAWRA) 35(2):311–322
- Hayes M, Wilhite DA, Svoboda M, Vanyarkho O., 1999. *Monitoring the 1996 drought using the standardized precipitation index*. Bull Am Meteorol Soc 80:429–438
- Heim, R., 2002. *A review of twentieth-century drought indices used in the United States*. Bulletin American Meteorological Societ., 83: 1149–1165
- Hosking J R M y J R Wallis, 1997. *Regional frequency analysis. An approach based on L-moments*. Cambridge University Press,
- Keyantash J y J Dracup, 2002. *The quantification of drought: an evaluation of drought indices*. Bull Am Meteorol Soc., 83:1167–1180
- Kumar R., C. Chatterjee, S. Kumar , A.K. Lohani and R.D. Singh, 2003. *Development of Regional Flood Frequency Relationships Using L-moments for Middle Ganga Plains Subzone 1 of India*. Water Resources Management, 17: 243-257.
- Lehner, B., Doll, P., Alcamo, J., Henrichs, T., Kaspar, F., 2006. *Estimating the impact of global change on flood and drought risks in Europe: a continental, integrated analysis*. Climate Change 75, 273–299.
- Lloyd-Hughes B, Saunders MA, 2002. *A drought climatology for Europe*. Int J Climatol., 22:1571–1592
- McKee, T.B., Doesken, N.J., Kleist, J., 1993. *The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales*, Paper Presented at 8th Conference on Applied Climatology. American Meteorological Society, Anaheim, CA.
- McKee, T.B., Doesken, N.J., Kleist, J., 1995. *Drought Monitoring with Multiple Time Scales*, Paper Presented at 9th Conference on Applied Climatology. American Meteorological Society, Dallas, Texas
- Mishra A.K. y V.P. Singh, 2010. *A review of drought concepts*. J. Hydrology, 391: 202-216
- Modarres, R., 2008. *Regional Frequency Distribution Type of Low Flow in North of Iran by L-moments*. Water Resources Management, 22:823–841

- Núñez J.H., K. Verbist, J.R. Wallis , M.G. Schaefer, L. Morales y W.M. Cornelis, 2011. *Regional frequency analysis for mapping drought events in north-central Chile. Journal of Hydrology*, 405: 352-366
- Obasi, G.O.P., 1994. *WMO's role in the international decade for natural disaster reduction. Bull. Am. Meteorol. Soc.* 75 (9), 1655–1661
- Rao A R y K H Hamed, 2000. *Flood frequency analysis*. CRC Press, Boca Ratón
- Raziei T., I. Bordi y L.S. Pereira, 2012. *Regional Drought Modes in Iran Using the SPI: The Effect of Time Scale and Spatial Resolution*. *Water Resources Management*, DOI 10.1007/s11269-012-0120-3
- Saf B., 2010. *Regional Flood Frequency Analysis Using L-Moments for the West Mediterranean Region of Turkey. Water. Resour. Manage.*, 23:531–551
- Santos J.F., M.M. Portela y I. Pulido-Calvo, 2011. *Regional Frequency Analysis of Droughts in Portugal. Water Resources Mangement*, 25:3537–3558
- Tsakiris G, Vangelis H., 2004. *Towards a drought watch system based on spatial SPI. Water Resour Manag* 18(1):1–12
- Tsakiris G, Pangalou D, Vangelis H., 2007. *Regional drought assessment based on the Reconnaissance Drought Index (RDI). Water Resour Manag* 21(5):821–833
- Vicente-Serrano S M, González-Hidalgo J C, De Luis M y Raventós J, 2004. *Drought patterns in the Mediterranean area: the Valencia region (eastern Spain). Climate Research*, 26: 5-15.
- Vicente-Serrano SM., 2006. *Differences in spatial patterns of drought on different time scales: an analysis of the Iberian Peninsula. Water Resources Management*, 20:37–60
- Vogel, R. M., and Fennessey, N. M. 1993. L-moment diagrams should replace product-moment diagrams. *Water Resources Research*, 29(6):1745-1752
- Wilhite, D.A., Glantz, M.H., 1985. *Understanding the drought phenomenon: the role of definitions. Water International*, 10: 111–120.
- Wilhite, D.A., 1992. *Preparing for Drought: A Guidebook for Developing Countries*, Climate Unit, United Nations Environment Program, Nairobi, Kenya.