

AVALIACIÓN DA SECA METEOROLÓXICA MEDIANTE O ÍNDICE ESTANDARIZADO DE PRECIPITACIÓN (SPI)

M. Álvarez Enjo, M. E. Rial Rivas e F. Díaz-Fierros Viqueira

Dpto. Edafoloxía e Química Agrícola. Facultade de Farmacia. USC
Campus Sur. 15782 Santiago de Compostela.
Correo_e: edmali@usc.es, edmitas@usc.es, eddfierr@usc.es

RESUMO

Neste estudo analizáronse as principais características dos eventos de seca meteorolóxica que lle afectaron a Galicia nos últimos 46 anos. A avaliación da seca baseouse no cálculo do índice de precipitación estandarizado (*Standardized Precipitation Index*, SPI) a escala bimensual aplicada aos meses de febreiro-marzo (SPI^{FM}) e xullo-agosto (SPI^{JA}) respectivamente. O SPI^{JA} medio do conxunto das 16 estacións analizadas en Galicia mostra unha tendencia crecente dentro do período 1961-2006 ou, o que é o mesmo, unha tendencia cara a condicións suaves ou normais de seca. Esta tendencia media inverte o seu sentido no caso do SPI^{FM} . En ambos os dous casos obsérvase un marcado sincronismo no comportamento espazo-temporal do SPI no territorio galego. Na escala temporal febreiro-marzo detectáronse nos últimos 14 anos as catro secas máis significativas de todo o período de observacións: dúas de intensidade severa nos anos 1997 e 1993 ($SPI^{FM} = -1,69$ e $-1,64$) e dúas de intensidade moderada nos anos 2000 e 2004 ($SPI^{FM} = -1,43$ e $-1,1$). En cambio, ao analizar a secuencia de xullo-agosto detectáronse tan só dous eventos de secas moderadas nos anos 1981 e 1978 ($SPI^{JA} = -1,48$ e $-1,19$) e unha destacada tendencia ascendente nos últimos 20 anos cara a condicións de normalidade na seca ($-0,99 < SPI^{JA} < 0,99$).

O SPI de Santiago de Compostela para o período 1906-2007 mostra unha seca extrema en 1953 e severa en 2007. Para o índice bimensual os valores de setembro e outubro do ano 2007 resultan extremadamente secos, cos valores máis baixos dos últimos 102 anos.

SUMMARY

This study analyzes the main characteristics of the meteorological drought events, which have affected Galicia over the last 46 years. The evaluation of droughts was based on the calculation of the Standardized Precipitation Index (SPI) during a two-month time scale applied to the months of February-March (SPI^{FM}) and July-August (SPI^{JA}) respectively. The average (SPI^{JA}) of all the 16 stations, which were analyzed in Galicia, reveals a decreasing trend within the 1961-2006 period, or rather a tendency toward mild or normal drought conditions. This average trend is inverted in the case of SPI^{FM} . In both cases, a marked synchronism has been observed in the geographical-temporal behavior of the SPI in Galicia. The most significant droughts of the entire observation period were detected during the last 14 years in the February-March time period: the intensity of two of these drought periods was severe ($SPI^{FM} = -1.69$ and -1.64) in 1997 and 1993, and the intensity was moderate ($SPI^{FM} = -1.43$ and -1.1) in 2000 and 2004.

On the other hand, when analyzing the July-August sequence, only 2 drought events were of a moderate nature, in 1981 and 1978 ($SPI^{JA} = -1.48$ and -1.19), and during the last 20 years a noteworthy upwards trend towards normal drought conditions was also detected ($-0.99 < SPI^{JA} < 0.99$).

The SPI for Santiago de Compostela for the 1906-2007 period reveals an extreme drought in the year 1953 and a severe case in 2007. With regard to the two-month period index, the values for September and October of 2007 appear to be extremely dry, with the lowest values for the last 102 years.

1. INTRODUCCIÓN E OBXECTIVOS

Dos fenómenos naturais coñecidos, a seca é un dos máis complexos, menos entendidos e que a máis persoas afecta; tende a estenderse de xeito irregular a través do tempo e do espazo e os seus efectos son acumulativos e poden permanecer aínda despois da culminación do evento. Tales características distínguena doutros fenómenos naturais (Wilhite, 2000).

Propuxéronse numerosas definicións de seca, e cada unha implica diversos factores ambientais, sociais e económicos. A carencia dunha definición de seca clara e universalmente aceptada contribúe a controversias sobre este fenómeno (Glantz e Katz, 1977). Unha ampla revisión de definicións sobre a seca foi publicada pola Organización Meteorolóxica Mundial (WMO, 1975). De acordo con Wilhite e Glantz (1985) e Chang e Kleopa (1991), a seca clasifícase en meteorolóxica, hidrolóxica e agrícola.

Para os propósitos deste traballo adóptase o uso da definición de seca meteorolóxica nos termos expostos por Wilhite e Glantz (1985):

A seca é un proceso natural errático que se orixina como resultado dunha deficiencia de precipitación durante un período de tempo extenso, xeralmente dunha estación ou máis, provocando en consecuencia un desequilibrio hídrico, afectando con iso ás actividades humanas e ambientais; trátase dunha situación deficiente de precipitación en relación cun comportamento por termo medio considerado como normal.

A seca meteorolóxica, da que nos ocuparemos aquí, é, polo tanto, unha condición atmosférica caracterizada por un déficit na cantidade de precipitación que normalmente se presenta nunha rexión e nun período de tempo determinado (Guttman, 1999; Komuscu, 1999; Wilhite, 2000). Cando este déficit de precipitación se asocia con altas temperaturas, baixa humidade relativa e alta radiación solar, aumentan os niveis de evaporación e transpiración e, polo tanto, aumenta o déficit de humidade no chan e impídese ou límitase o crecemento de cultivos; esta etapa relaciónase coa seca agrícola e pode durar un ou varios meses (Quiring e Papakryiakou, 2003; Wu *et al.*, 2004; Narasimhan e Srinivasan, 2005). Pola súa parte, a seca hidrolóxica acontece cando a prolongación destas condicións atmosféricas afectan á recarga de corpos de auga superficiais e subterráneos debido á diminución do volume de escorrentura e infiltración.

En Galicia, a seca é un fenómeno que normalmente afecta só dous ou tres meses do ano, con moita menor amplitude temporal que as secas, por exemplo, do ámbito mediterráneo, que poden alcanzar a totalidade do ano. Aínda así, é un fenómeno relativamente frecuente que pode ter diferentes localizacións estacionais: secas de inverno, tradicionalmente representadas polo mínimo de febreiro (Díaz-Fierros, 1971) e que na actualidade tenden a intensificarse e a estenderse aos meses de marzo e abril; secas de verán, as máis típicas, cos meses de xullo e agosto como principais protagonistas.

O obxectivo principal deste traballo é a análise nas condicións de Galicia das secas meteorolóxicas a partir do índice de precipitación estandarizado, tomando para iso unha escala temporal de dous e tres meses, que se aplica ás épocas en que son máis frecuentes as secas en Galicia.

2. MÉTODOS

As diversas concepcións acerca da seca, as súas causas e efectos e os diferentes niveis de dispoñibilidade de información para cada rexión ou país deron como resultado distintas ferramentas para avaliar o citado fenómeno natural. As variables que comunmente están implicadas nos métodos de estimación son: precipitación, considerando diferentes períodos de tempo, temperatura, evaporación, evapotranspiración, humidade do chan, capacidade de almacenamento do chan, correntes



superficiais, niveis de auga almacenada, entre outras. Desenvolvéronse métodos simplificados que empregan unha soa variable e outros que utilizan diversos parámetros e dan unha maior confiabilidade nos resultados, pero requiren de complicados cálculos e, con frecuencia, non se dispón de datos dabondo para tal fin.

A maioría dos métodos para avaliar a seca meteorolóxica teñen a finalidade de determinar a ocorrencia de eventos anormais da precipitación nunha rexión e nun período de tempo (Chang e Kleopla, 1991; Komuscu, 1999; Guttman, 1998). Un indicador usado para este propósito é o índice de severidade de seca de Palmer (*Palmer drought severity index*, PDSI) desenvolvido por Palmer (1965). Considera o déficit de precipitación e a subministración e demanda de auga dentro dunha ecuación de balance hídrico; non obstante, o seu uso ten algunhas limitacións por requirir variables non sempre dispoñibles.

Outro índice para caracterizar a seca é o índice de precipitación estandarizado (*standardized precipitation index*, SPI), que considera a chuvia como variable única para determinar se nunha rexión e nun período hai déficit ou exceso de precipitación respecto ás condicións normais (Hayes *et al.*, 1999; Komuscu, 1999; Tadesse *et al.*, 2004). A continuación faise unha breve descrición deste último método, que é o que foi seleccionado para a súa utilización neste traballo.

2.1. Método do índice de precipitación estandarizado (SPI)

Este método foi desenvolvido por McKee *et al.* (1993) e parte da base de que un déficit de precipitación ten diferentes impactos sobre os recursos hidrolóxicos: auga subterránea, auga almacenada e humidade do chan; o SPI deseñouse para cuantificar o déficit de precipitación en diferentes períodos de tempo, asumindo que as condicións de humidade do chan son resposta ás anomalías de precipitación dun período curto de tempo, mentres que para a auga subterránea, auga almacenada e correntes de auga, o impacto se reflicte en anomalías de precipitación de períodos de longo prazo.

O SPI é un método amplamente utilizado; demóstrano así os traballos de Türkes (1996) en Turquía; Zanvettor (2000) en Argentina; Ji e Peters (2002) en Estados Unidos e outros moitos. Keyantash e Dracup (2002) realizaron unha comparación de índices de seca en Oregón (EE.UU.) e concluíron que o método SPI é o que mellor estima a severidade de seca. Komuscu (1999) destaca o método SPI pola súa rapidez, grande aproximación na análise de seca, a súa simplicidade e requirimento mínimo de datos; menciona que para escalas grandes, resulta menor frecuencia de seca pero con efecto máis prolongado; doutra forma, para escalas de tres meses, a frecuencia de secas incrementase e a súa duración diminúe. Confirma que o SPI responde rapidamente aos períodos de humidade ou seca, o que significa que cada mes ten unha forte influencia no comportamento global da precipitación. Guttman (1998) realizou unha comparación entre os métodos PDSI e SPI para diferentes escalas de tempo e concluíu que SPI é máis doado de interpretar. Na actualidade o SPI utilízase para dar seguimento á seca nos Estados Unidos a través do Centro Nacional de Mitigación contra a Seca, o Centro Climático de Colorado, o Centro Climático Rexional do Oeste e o Centro de Predición do Clima dos EUA.

Desde o punto de vista técnico, o SPI é calculado axustando a distribución de frecuencia da precipitación dun lugar dado, na escala de tempo de interese, cunha función teórica de densidade de probabilidade. De acordo con varios autores (Young, 1992; Lloyd-Hughes, 2002; entre outros), a función máis apropiada para este axuste é a Gamma, aínda que esta ofrece algunhas dificultades nas zonas de moi pouca precipitación, debido a que non se atopa definida para valores da variable iguais a 0. A función de densidade é logo transformada a unha distribución normal estandarizada (con media igual a 0 e varianza igual a 1), sendo o SPI o valor resultante desta transformación. Este

índice representa o número de desviacións estándar en que o valor transformado da precipitación se desvía da media histórica (o cal queda representado por 0). Os valores negativos do SPI representan déficit de precipitación e, contrariamente, os valores positivos indican que a precipitación acontecida foi superior á media histórica. Na seguinte táboa móstrase a clasificación do SPI proposta por McKee *et al.* (1993, 1995).

Táboa 1. Clasificación do SPI por categorías (intensidades) da seca.

Valor SPI	Categoría da seca	Probabilidade (%)
2,00 ou maior	Extremadamente húmido	2,3
1,50 a 1,99	Moi húmido	4,4
1,00 a 1,49	Moderadamente húmido	9,2
0 a 0,99	Lixeiramente húmido	34,1
0 a -0,99	Lixeiramente seco	34,1
-1,00 a -1,49	Moderadamente seco (seca moderada)	9,2
-1,50 a -1,99	Moi seco (seca severa)	4,4
-2,00 ou menor	Extremadamente seco (seca extrema)	2,3

De acordo con McKee *et al.* (1993) e atendendo ás categorías recollidas na táboa anterior, un evento de seca acontece se o SPI é continuamente negativo e alcanza unha intensidade de -1,0 ou menor. Un evento de seca remata cando o SPI chega a ser positivo.

Este índice permite analizar diversas escalas de tempo; é dicir, os axustes e transformacións pódense facer con rexistros de precipitación acumulada nun ou en n meses, permitindo identificar a frecuencia, intensidade e duración da seca a curto, mediano e longo prazo (Guttman, 1999; Hayes *et al.*, 1999; Komuscu, 1999). Neste traballo a escala temporal que se emprega é a bimensual ($n = 2$) e aplícase a dúas variantes de análises correspondentes aos meses de febreiro-marzo e xullo-agosto, que son os meses asociados ás secas invernal e estival respectivamente que presentan polo regular un maior déficit de precipitacións.

Un problema intrinsecamente asociado ao cálculo do SPI é o que ten que ver coa calidade e fiabilidade dos rexistros dispoñibles que serán utilizados no axuste da función de distribución. McKee *et al.* (1993) recoñecen que é recomendable que o cálculo do SPI para un período de tempo dado, nun lugar determinado, se faga baseándose nos rexistros de precipitación de, como mínimo, un período de 30 anos.

Vantaxes e desvantaxes do SPI

Hayes *et al.* (1999) analizaron as vantaxes e desvantaxes da utilización do SPI para caracterizar a severidade das secas. O SPI ten tres vantaxes principais:

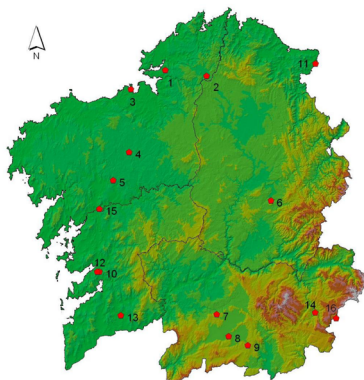
- A primeira vantaxe é a súa simplicidade. O SPI esta baseado soamente na precipitación e require só da estimación dos dous parámetros da función de distribución Gamma, comparado cos 68 termos necesarios para describir, por exemplo, o PDSI (*Palmer drought severity index*), outro índice amplamente utilizado. Ao eliminar a dependencia coas condicións de humidade do chan, o SPI pode ser utilizado efectivamente nas distintas estacións do ano. O SPI tampouco é afectado pola topografía.



- A segunda vantaxe do SPI é que pode ser calculado para escalas de tempo variables, o que o fai aplicable no ámbito da meteoroloxía, agricultura e hidroloxía superficial e subterránea. Esta versatilidade temporal é tamén útil para a análise da dinámica da seca, especialmente na determinación do comezo e a fin, o que foi difícil de recoñecer por medio doutros índices.
- A terceira vantaxe provén da estandarización, o que asegura que a frecuencia dos eventos extremos en calquera localidade e en calquera escala de tempo é consistente.

Non obstante, o SPI ten tres potenciais desvantaxes.

- A primeira desvantaxe depende da calidade dos datos de precipitación utilizados. Datos erróneos conducen a SPI erróneos.
- Unha segunda limitación do SPI xorde da natureza estandarizada do mesmo índice, é dicir, que as secas extremas (ou calquera outro tipo de secas) teñen a mesma probabilidade de ocorrencia en calquera lugar. Polo tanto, o SPI non é capaz de identificar rexións que son máis propensas que outras á ocorrencia de secas.
- Un terceiro problema pode xurdir cando o SPI é empregado nas escalas de tempo máis curtas (1, 2 ou 3 meses), en rexións de baixa precipitación estacional. Nestes casos, poden acontecer valores positivos (ou negativos) altos que son susceptibles de ser erroneamente interpretados. Nestas situacións, un bo coñecemento da climatoloxía destas rexións mellora a interpretación do SPI.



Estación	Ide	X	Y	Período
Fene	1	568758.60	4812681.29	1961 - 2006
Areosa - Ás Pontes	2	593077.60	4809270.80	1961 - 2006
A Coruña	3	548615.37	4801399.72	1961 - 2006
Montaos	4	547522.93	4764373.19	1961 - 2006
Santiago - Obs.	5	538110.79	4747656.86	1961 - 2006
Sarria	6	630912.72	4735837.55	1961 - 2006
Allariz	7	599126.31	4668671.51	1961 - 2006
Xinzo	8	606204.78	4655817.97	1961 - 2006
Viladerrei	9	617331.18	4650440.59	1961 - 2006
Salcedo	10	530176.84	4693947.29	1961 - 2006
Ribadeo	11	657228.30	4816527.91	1961 - 2006
Lourizán	12	528805.17	4693941.50	1961 - 2005
Ponteareas	13	542679.13	4668103.81	1961 - 2004
Viana do Bolo	14	656951.73	4669721.90	1961 - 2003
Herbón	15	530016.62	4730960.01	1961 - 2003
San Sebastián	16	669432.08	4666307.52	1961 - 2001

Figura 1. Localización das estacións pluviométricas na zona de estudo.

3. DISPONIBILIDADE DE INFORMACIÓN

O ámbito deste estudo enmárcase dentro dos límites da comunidade galega; polo tanto, a información pluviométrica utilizada correspóndese coas estacións situadas no seu territorio. Para o cálculo do SPI utilizáronse un total de 16 estacións cuxo período de observacións ininterrompido, dadas as exigencias da aplicación do SPI, se enmarca entre os anos 1961 e 2006. Deste conxunto de estacións só 10 abranguen integramente o citado período e teñen un rexistro de 46 anos. As restantes seis estacións presentan lonxitudes de series de entre 41 e 45 anos contados a partir do ano 1961. A distribución espacial por provincias é a seguinte: A Coruña (6), Pontevedra (3), Ourense (5) e Lugo (2). Para todas elas foron realizados os correspondentes tests de homoxeneidade e idoneidade dos datos.

De todas as estacións dispoñibles para este estudio as da Coruña e Santiago-Observatorio dispoñen dun período de observacións cuxos inicios se remontan a principios do século pasado, o que fai que estas resulten, xunto a outras poucas estacións en toda a península Ibérica, as series históricas de maior antigüidade. Por esta razón, á marxe do período de análise común que se define neste estudo para o conxunto das 16 estacións (1961-2006), analízanse complementariamente estas dúas estacións cos seus respectivos “períodos longos” que están comprendidos entre 1906 e 2006 cun total de 101 anos. *A posteriori*, isto permitiranos, aínda que sexa só sobre a base destas dúas estacións, poder comprobar o efecto da lonxitude do período de observacións sobre os resultados que se obteñen no cálculo do SPI baseándose en series de diferentes tamaños como as utilizadas neste estudo, ou sexa, 46 anos (serie curta) e 101 anos (serie longa) respectivamente.

4. RESULTADOS

Calculáronse os valores do SPI a unha escala temporal bimensual considerando dous períodos diferentes: febreiro-marzo (SPI^{FM}) e xullo-agosto (SPI^{XA}) para o conxunto das 16 estacións seleccionadas dentro dos límites de Galicia cun período común de 46 anos de observacións.

Os valores do SPI^{FM} e SPI^{XA} obtivéronse a partir do axuste da función de distribución Gamma. Os correspondentes parámetros desta función, alfa e beta respectivamente, foron estimados polo método da máxima verosimilitude. Co obxectivo de verificar en que medida a función de distribución empregada se axusta aos datos ou os describe correctamente, utilizouse a bondade de axuste de Kolmogorov-Smirnov (K-S) para un nivel de significación do 5%. De acordo con esta proba, os 36 axustes analizados (16 do SPI^{FM} e 16 do SPI^{XA} correspondentes ao período 1961-2006 e 4 do SPI^{FM} e SPI^{XA} para o período 1906-2006 nas estacións de Santiago de Compostela e A Coruña respectivamente) mostraron unha boa correspondencia entre os valores empíricos e os teóricos ao nivel de significación seleccionado.

O valor teórico da desviación máxima na proba de K-S correspondente ao nivel de significación do 5% para unha serie cun rexistro de 46 anos é igual 0,201. Se este valor ou limiar é superado, o axuste non se considera bo e, por conseguinte, a función de distribución non é adecuada para describir o comportamento probabilístico dos rexistros dispoñibles. Na seguinte táboa destácanse, de acordo coa proba de K-S, as máximas diferenzas observadas ao axustar a función de distribución Gamma entre as probabilidades teóricas e as empíricas.



Táboa 2. Diferenzas máximas observadas no axuste da función Gamma entre as probabilidades teóricas e empíricas segundo a proba de Kolmogorov-Smirnov.

Estación	SPI ^{FM}	SPI ^{XA}
Fene	0,043	0,198
Areosa - As Pontes	0,072	0,049
A Coruña	0,085	0,069
Montaos	0,078	0,078
Santiago Obs.	0,066	0,122
Sarria	0,072	0,117
Allariz	0,066	0,092
Xinzo	0,087	0,073
Viladerrei	0,113	0,153
Salcedo	0,058	0,121
Ribadeo	0,123	0,054
Lourizán	0,068	0,126
Ponteareas	0,105	0,168
Viana do Bolo	0,009	0,117
Herbón	0,083	0,136
San Sebastián	0,095	0,127

Obsérvase claramente como o citado limiar non foi superado en ningún caso. No caso do SPI^{FM} a diferenza media observada do conxunto das 16 estacións foi de 0,075, mentres que para o SPI^{XA} resultou igual a 0,104. En ambos os dous casos, o limiar máximo non foi alcanzado.

A continuación faise unha análise detallada para cada unha das dúas escalas temporais empregadas no estudo.

4.1. SPI^{XA}

A media do SPI^{XA} do conxunto de estacións analizadas en Galicia mostra unha tendencia crecente dentro do período 1961-2006 ou, o que é o mesmo, unha tendencia cara a condicións suaves ou normais de seca (figura 2a). O ano 1981 resultou o máis destacable desde o punto de vista da intensidade da seca, cun SPI^{XA} medio de -1,475, o que indica unha intensidade da seca moderada, seguido do ano 1978 (SPI^{XA} = -1,188). Por último, en terceiro lugar está o ano 1969 (SPI^{XA} = -0,861), que, aínda que non pode ser considerado como un evento de seca (recórdese que un evento de seca se define cando este alcanza valores do SPI de -1,0 ou menos), resulta o terceiro en magnitude dentro do período analizado. Despois do ano 1981 e ata a data en Galicia, destacan claramente unhas condicións suaves ou de normalidade cun marcado acento cara a unha tendencia crecente con condicións normais ou moderadamente húmidas do SPI^{XA}.

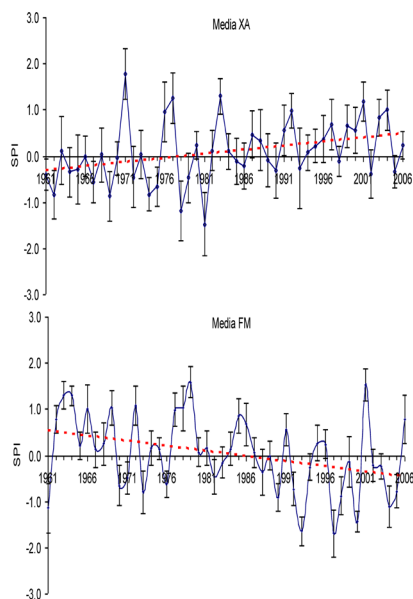


Figura 2. Comportamento histórico medio do SPI^{XA} (a) e SPI^{FM} (b) representados en escalas temporais de dous meses para o período de observacións 1961-2006.

En xeral, entre o conxunto de todas as estacións analizadas obsérvase, ademais da tendencia, un marcado sincronismo ou variación espacial do SPI^{XA} . Por outra banda, os resultados que ofrece a matriz de correlación obtida a partir de 10 estacións que presentan un período completo de 46 anos (1961-2006) avalan, en xeral, tamén a existencia dunha marcada relación espacial do SPI^{XA} no territorio galego (táboa 3). Só dúas estacións da zona sur (Xinzo e Viladerrei) manifestan correlacións moderadas coas da zona norte (A Coruña, Montaos ou Fene) que poderían xustificar a súa separación nun subconxunto. De todos os xeitos, isto complicaría o estudo que polo momento e, coas excepcións citadas, vai seguir considerando Galicia como un conxunto único. A escala individual aprécianse oscilacións nos graos de intensidade das secas entre as diferentes estacións analizadas. Se tomamos como referencia o ano 1981, o máis afectado desde o punto de vista da seca, vemos como as estacións de Salcedo e Fene presentan unha seca extrema ($SPI^{XA} = -2,146$ e $-2,071$ respectivamente), mentres que as estacións de Santiago de Compostela, Montaos, Allariz, A Coruña e Viladerrei presentan unha seca severa con valores do SPI^{XA} que oscilan entre $-1,94$ e $-1,61$. Unha seca moderada obsérvase na estación de Sarria ($SPI^{XA} = -1,370$).



Táboa 3. Matrices de correlación do SPI^{XA} e SPI^{FM} para un conxunto de 10 estacións cun período de 46 anos (1961-2006).

Estación Id	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
					SPI^{XA}					
1	1,00									
2	0,82	1,00								
3	0,84	0,85	1,00							
4	0,82	0,85	0,82	1,00						
5	0,74	0,73	0,72	0,90	1,00					
6	0,52	0,61	0,55	0,70	0,67	1,00				
7	0,62	0,63	0,51	0,70	0,72	0,82	1,00			
8	0,52	0,63	0,43	0,58	0,56	0,68	0,79	1,00		
9	0,52	0,56	0,46	0,64	0,69	0,78	0,89	0,79	1,00	
10	0,76	0,70	0,71	0,85	0,84	0,66	0,73	0,64	0,72	1,00
Estación Id	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
					SPI^{XA} SPI^{FM}					
1	1,00									
2	0,83	1,00								
3	0,88	0,92	1,00							
4	0,82	0,88	0,91	1,00						
5	0,83	0,84	0,87	0,94	1,00					
6	0,72	0,83	0,82	0,88	0,82	1,00				
7	0,77	0,80	0,83	0,88	0,86	0,88	1,00			
8	0,63	0,73	0,75	0,81	0,77	0,86	0,91	1,00		
9	0,70	0,68	0,74	0,82	0,80	0,78	0,93	0,83	1,00	
10	0,80	0,84	0,87	0,96	0,93	0,89	0,88	0,84	0,83	1,00

Se tomamos como referencia a estación da Coruña, unha das dúas estacións máis antigas de Galicia, a outra é a de Santiago-Observatorio, e analizamos o comportamento do SPI^{XA} durante o período 1906-2006 (101 anos), vemos como esta presenta tamén unha tendencia crecente, aínda que moito máis suave que a observada dentro do período máis curto 1961-2006 (46 anos), que resulta máis pronunciada. Os cálculos realizados sobre as series desta estación con diferentes lonxitudes (101 e 46 anos respectivamente) mostran valores do SPI^{XA} practicamente iguais (figura 3a) dentro do período de observacións común a ambas as dúas series (1961-2006), o que evidencia a pouca variabilidade observada no axuste dos parámetros da función de distribución Gamma malia a diferenza na lonxitude dos rexistros de ambas as dúas series.

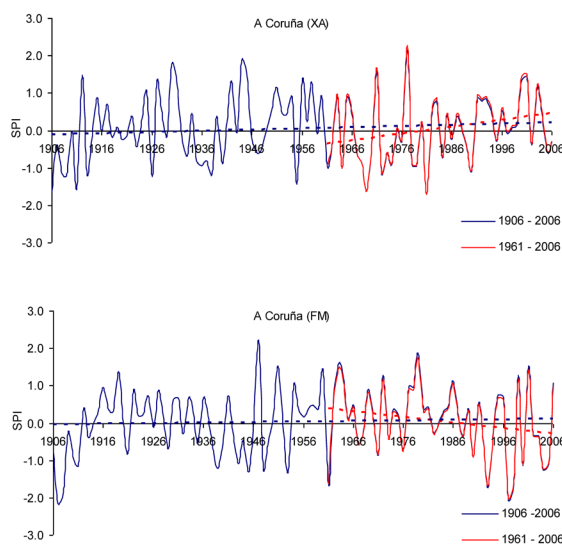


Figura 3. Comparación do SPI^{XA} (a) e SPI^{FM} (b) obtidos a partir de rexistros de diferente lonxitude correspondentes ao observatorio da Coruña.

4.2. SPI^{FM}

Ao contrario do que sucede co comportamento do SPI^{XA} , o valor medio do SPI^{FM} correspondente ao mesmo período (1961-2006) mostra unha tendencia decrecente (figura 2b). Dentro do período analizado destacan catro secas significativas que tiveron lugar nos últimos 14 anos: as de 1997 e 1993, ambas as dúas de intensidade severa ($SPI^{FM} = -1,69$ e $-1,64$ respectivamente), e as de 2000 e 2004, de intensidade moderada con valores do $SPI^{FM} = -1,43$ e $-1,11$.

Se tomamos novamente como referencia a estación da Coruña e analizamos o comportamento do SPI^{FM} durante o período longo de observacións 1906-2006, vemos como esta presenta tamén unha tendencia crecente pouco pronunciada igual que a observada co SPI^{XA} para o mesmo período. Non obstante, no período 1961-2006 correspondente á serie curta, a tendencia que se observaba no SPI^{FM} medio de toda Galicia inverteuse, o que provoca que esta tendencia tenda a decrecer en dirección a valores do SPI inferiores a 0 cunha pendente máis pronunciada que a correspondente ao período longo da estación analizada. Por outra parte, obsérvase tamén un destacado sincronismo en cada unha das estacións (figura 4) dos valores do SPI^{FM} ao longo do período de observacións. Este carácter sincrónico reflíctese tamén nos aceptables valores de r que se recollen na matriz de correlación do SPI^{FM} (táboa 2).

A estimación dos valores do SPI^{FM} a partir das series longa e curta respectivamente mostrou, igual que no caso do SPI^{XA} , que non existen diferenzas notables entre estas dentro dos límites do período concorrente (véxase a figura 3b) de observacións de ambas as dúas series (1961-2006).



4.3. Comportamento das escalas trimensuais SPI^{XXA} e SPI^{FMA}

Opcionalmente, analizouse o comportamento do SPI a escala trimensual nos meses correspondentes ao estío invernal e estival. As variantes analizadas correspóndense cos meses de febreiro-marzo-abril (SPI^{FMA}) e xuño-xullo-agosto (SPI^{XXA}). En ambos os dous casos o SPI garda unha estreita relación coas dúas variantes bimensuais analizadas nos puntos anteriores, dado que en cada unha delas se conservan os dous meses inicialmente considerados.

Na figura 4 destácase o comportamento media do SPI^{JJA} e SPI^{FMA} para o conxunto das 16 estacións analizadas. En ambos os dous casos obsérvanse as mesmas tendencias que no SPI bimensual: tendencia crecente cara a condicións normais de seca do SPI^{JJA} e tendencia decrecente, con pendente máis pronunciada, do SPI^{FMA} .

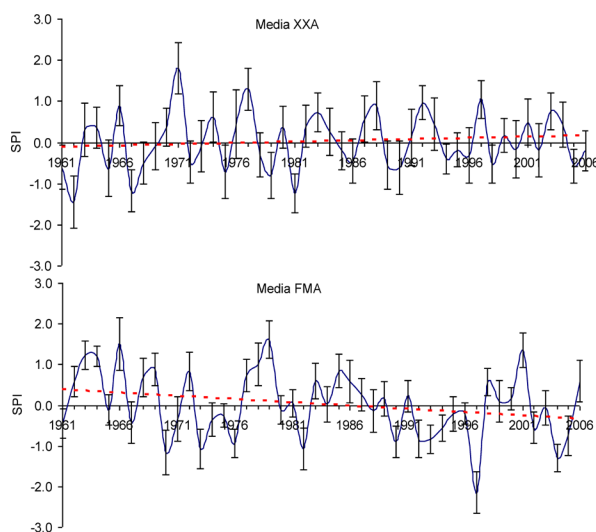


Figura 4. Comportamento histórico medio do SPI^{XXA} (a) e SPI^{FMA} (b) representados en escalas temporais de tres meses para o período de observacións 1961-2006.

Nos últimos 20 anos os valores do SPI^{XXA} non superaron en ningún caso o limiar de -1, o que é un claro indicador das condicións de normalidade da seca. En cambio, si resultan destacables as secas observadas nos anos 1997 e 2004, con valores de SPI^{FMA} de -2,14 (seca extrema) e -1,29 (seca moderada) respectivamente.

A non coincidencia no tempo das secas con diferente escala temporal e, en especial, a escalas pequenas de dous e tres meses como as que nos ocupan, tal e como sinalan McKee *et al.* (1993), explícase pola grande influencia que exerce cada novo mes que se engade á precipitación acumulada dos meses analizados, polo que resulta relativamente doado que os valores do SPI respondan rapidamente e se movan de condicións secas a húmidas de seca e viceversa.

5. CONCLUSIÓNS

- A función de distribución Gamma de dous parámetros mostrou un bo axuste en todas as estacións pluviométricas analizadas tal e como demostra o feito de que en ningún caso foi excedido o valor crítico correspondente ao nivel de significación do 5% da bondade de axuste de Kolmogorov-Smirnov.
- Analizouse o efecto que ten sobre o SPI a lonxitude dos rexistros de observacións no exemplo das estacións da Coruña e Santiago de Compostela. Nos dous casos púidose constatar que dentro do período concorrente (1961-2006) das series longa e curta de ambas as dúas estacións os valores do SPI resultan practicamente os mesmos con coeficientes de correlación iguais á unidade. Isto débese fundamentalmente á pouca variabilidade observada no axuste dos parámetros da función de distribución Gamma e á escasa incidencia sobre estes do tamaño dos rexistros das dúas series.
- A media do SPI^{XA} do conxunto de estacións analizadas en Galicia mostra unha tendencia crecente dentro do período 1961-2006 ou, o que é o mesmo, unha tendencia cara a condicións suaves ou normais de seca. Esta tendencia media inverte o seu sentido no caso do SPI^{FM} . En ambos os dous casos obsérvase un marcado sincronismo no comportamento espazo-temporal do SPI no territorio galego.
- O SPI^{FM} calculado baseándose no período longo de observacións das series da Coruña e Santiago de Compostela presenta unha tendencia lixeiramente crecente e non resulta concordante coa tendencia observada nestas dúas estacións no período curto, onde esta é decrecente. No caso do SPI^{XA} , nun e outro período as tendencias son crecentes, aínda que resultan moito máis acusadas no período curto de ambas as dúas estacións.
- Na escala temporal bimensual (febreiro-marzo) detectáronse nos últimos 14 anos as catro secas máis significativas de todo o período de observacións: dúas de intensidade severa nos anos 1997 e 1993 ($SPI^{FM} = -1,69$ e $-1,64$) e dúas de intensidade moderada nos anos 2000 e 2004 ($SPI^{FM} = -1,43$ e $-1,1$).
- Ao analizar a secuencia de xullo-agosto, detectáronse tan só dous eventos de secas moderadas nos anos 1981 e 1978 ($SPI^{XA} = -1,48$ e $-1,19$) e unha destacada tendencia ascendente nos últimos 20 anos cara a condicións de normalidade na seca ($-0,99 < SPI^{XA} < 0,99$).
- As escalas trimensuais (febreiro-marzo-abril) e (xuño-xullo-agosto) presentan tendencias similares ás bimensuais, aínda que un pouco máis atenuadas.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Chang T. J. and Kleopa X. A. (1991). A proposed method for drought monitoring. *Water Res. Bull.*, **27**(2), 275-281.
- Díaz-Fierros F. (1971). *Contribución a la climatología agrícola de Galicia*. Universidade de Santiago. Santiago de Compostela.
- Glantz M. and Katz R. W. (1977). When is a drought a drought? *Nature*, **267**, 192-193.
- Guttman N. B. (1998). Comparing the Palmer drought Index and the Standardized Precipitation Index. *Journal of American Water Resources Association*, **34**(1), 113-121.



- Guttman B. N. (1999). Accepting the standardized precipitation index: a calculation algorithm. *J. Am. Water Res. Assoc.* **35**(2), 311- 322.
- Hayes M., Svoboda M. D. and Wilhite D. A. (1999). Monitoring the 1996 drought using the Standardized Precipitation Index. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **80**(3), 29-438.
- Ji L. and Peters, A. J. (2002). Assessing vegetation response to drought in the northern Great Plains using vegetation and drought index. *Remote Sensing of Environment*, **87**(1), 85-98.
- Keyantash, J. and Dracup, J. A. (2002). The quantification of drought: an evaluation of drought indices. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **83**(8), 1167-1180.
- Komuscu, A. U. (1999). Using the SPI to analyze spatial and temporal patterns of drought in Turkey. *Drought Network New*, **11**(1), 7-13.
- Lloyd-Hughes, B. and Saunders, M. (2002). A Drought Climatology for Europe. *International Journal of Climatology*. *Int. J. Climatol.*, **22**, 1571-1592.
- McKee, T. B. and Kleist, J. (1995). Drought Monitoring with Multiple Scales. *Preprint. 9th Conference on applied climatology*, January, 15-20. Dallas, Texas. pp. 233-236.
- McKee, T. B., Doesken, N. J. and Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Preprint. Eight Conference on applied climatology*, January 17-22. Anaheim: California. pp. 179-184.
- Narasimhan, B. and Srinivasan, R. (2005). Development and evaluation of Soil Moisture Deficit Index and Evapotranspiration Deficit Index for agricultural drought monitoring. *Agric. For. Meteorol.*, **133**, 69-88.
- National Drought Mitigation Center (2003). ¿What is Drought?, In: *Understanding and defining Drought*; University of Nebraska, Lincoln, pp. 1-3.
- Palmer W. C. (1965). *Meteorological Drought Research*, paper No. 45, U.S. Department of Commerce Weather Bureau, Washington, D.C.
- Quiring M. S. and Papakryiakou T. N. (2003). An evaluation of agricultural drought indices for the Canadian prairies. *Agric. For. Meteorol.*, **118**, 49-62.
- Tadesse T., Wilhite D. A., Harms S. K., Hayes M. J. and Goddard S. (2004). Drought monitoring using data mining techniques: A case study for Nebraska, USA. *Natural Hazards*, **33**(1), 137-159.
- Türkes M. (1996). Meteorological Drought in Turkey: A historical Perspective, 1930-1993. *Drought Network News*, **8**(3), 17-21.
- Wilhite D. A. and Glantz M. H. (1985). Understanding the drought phenomenon: The role of definitions. *Water International*, **10**, 111-120.
- Wilhite D. A. (2000). Drought as a natural hazard. In: *Drought: A Global Assessment*, Wilhite, D. A. (ed.) Routledge Publishers, London, UK, pp. 3-18.
- WMO (World Meteorological Organization) (1975). *Drought and Agriculture*. WMO Technical Note Number 138. Report of CAg WorkingGroup on the Assessment of Drought. Geneva, Switzerland.
- Wu H., Hubbard K. G. and Wilhite D. A. (2004). An agricultural drought risk assessment model for corn and soybeans. *Int. J. Climatol.*, **24**, 723-741.

- Young K. C. (1992). A three-way model for interpolating for monthly precipitation values. *Monthly Weather Rev.*, **120**, 2561-2569.
- Zanvettor R. (2000). Using the SPI to monitor the 1999-2000 Drought in Northeastern Argentina. *Drought Network News*, **12**(3), 2-4.

