

Evolución de los índices comunes de detección y seguimiento de sequías meteorológicas

Evolution of the common indices of detection and monitoring of meteorological droughts

Daniel Francisco Campos-Aranda¹

¹ Profesor jubilado de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, México, campos_aranda@hotmail.com

Autor para correspondencia: Daniel Francisco Campos-Aranda,
campos_aranda@hotmail.com

Resumen

Las *sequías* son un fenómeno natural recurrente caracterizado por una disminución de la precipitación. Esta condición puede ser exacerbada por las demandas de agua potable, riego y otros usos. Las *sequías*

meteorológicas (SM) implican una reducción en cantidad e intensidad de la lluvia, así como incrementos en la temperatura y evaporación, ya que aumenta la radiación solar al no haber nubosidad. Los *índices de sequías* son procedimientos operativos que emplean las variables climáticas citadas, los cuales buscan cuantificar ciertas características de las SM para asignar una *severidad* y así poder establecer su inicio, desarrollo y terminación, permitiendo con ello su comparación en climas diferentes. En este trabajo se describe cronológicamente cómo han evolucionado los índices más comunes de detección y seguimiento de las SM, para cuantificarlas cada año y en lapsos de varios meses. Lo anterior es útil para comenzar y avanzar en el estudio y caracterización de las SM de una localidad o de una región geográfica. Se recomienda progresar en el estudio y la evaluación cuantitativa de las SM, según como se describen los índices, pues su evolución histórica y complejidad computacional coinciden.

Palabras clave: sequías meteorológicas (SM), SM anuales, SM mensuales, índices de sequías (*ISP*, *IA*, RDI_{st} , *PDSI*, *IZC*, *SPI*, *SPEI* y *SPDI*).

Abstract

Droughts are a recurrent natural phenomenon characterized by a decrease in precipitation. This condition can be aggravated by the

demands of drinking water, irrigation and other uses. *Meteorological droughts* (MD) imply a reduction in the amount and intensity of rainfall, as well as an increase in temperature and evaporation, since without clouds there is an increase in solar radiation. *Drought indices* are operating procedures that use the aforementioned climatic variables, seeking to quantify certain characteristics of the MD to assign a *severity* and thus be able to establish their start, development and termination, allowing their comparison in different climates. This paper describes chronologically how the most common detection and pursuit indices of MD have evolved, allowing their annual and monthly quantification. This compilation is useful to begin and advance in the study and characterization of the MD of a locality or a geographic region. It is recommended to progress in the study and the quantitative evaluation of MD, according to how the indexes are described here, since their historical evolution and their computational complexity coincide.

Keywords: Meteorological droughts (MD), annual MD, monthly MD, drought indices (*ISP*, *IA*, RDI_{st} , *PDSI*, *IZC*, *SPI*, *SPEI* and *SPDI*).

Recibido: 30/11/2017

Aceptado: 19/03/2019

Introducción

Las *sequías* son eventos climáticos extremos recurrentes que acontecen en todas las localidades del mundo, caracterizados por una precipitación menor que la normal y cuya duración abarca varios meses o algunos años. Las sequías son una de las principales causas naturales de daños en la agricultura, en las actividades económicas y en el medio ambiente. Esta evolución de sus impactos crea su carácter de múltiples escalas de tiempo, lo cual se origina por los *retrasos* que ocurren en el aprovechamiento del agua en los diferentes sistemas hidráulicos, de manera que la escasez de precipitación primeramente es visible en la agricultura de temporal, después en el abastecimiento del riego, generación de energía hidroeléctrica y otros usos del agua, y por último, en los daños sociales, económicos y ambientales. Por lo anterior, las sequías se clasifican como: *meteorológicas, agrícolas, hidrológicas y socio-económicas*. Estas últimas incluyen los daños ambientales (Pandey, Sharma, Mishra, Singh, & Agarwal, 2008; Mishra & Singh, 2010; Fernández & Gironas, 2017).

Las *sequías meteorológicas* (SM) de una zona es el lapso de meses o años durante el cual la precipitación que ocurre es inferior a la que comúnmente acontece. Por su evolución lenta, es difícil precisar su inicio y final, así como estimar sus características de severidad y extensión territorial. Por otra parte, debido al crecimiento sostenido de la demanda de agua para todos los usos y a la amenaza del cambio climático, en años recientes los impactos negativos de las sequías se han intensificado (Panu & Sharma, 2002; Sene, 2010; Vicente-Serrano, Beguería, & López-Moreno, 2010; Fuchs, Svoboda, Wilhite, & Hayes, 2014).

La ocurrencia y severidad de las SM está relacionada con los parámetros climáticos regionales, entre los más impactantes están la *precipitación media anual (PMA)* y la *evapotranspiración potencial media anual (ETP)*. La *PMA* es el abastecimiento atmosférico y depende principalmente de las siguientes ocho características geográficas: latitud; factores orográficos; corrientes oceánicas; circulación del viento atmosférico; proximidad de océanos y grandes lagos; presión atmosférica, color y textura de la superficie terrestre; y condicionantes atmosféricos de origen natural o de las actividades humanas. En cambio, la *ETP* es la demanda atmosférica y depende de manera preponderante de las siguientes cuatro características atmosféricas y físicas: radiación solar neta, déficit de humedad ambiental, rugosidad de la superficie e índice de área foliar. La *ETP* está relacionada de manera

estrecha con las temperaturas diurnas y nocturnas del aire (Ponce, Pandey, & Ercan, 2000).

PMA y *ETP* son dos *variables climáticas* que tienen relación con las deficiencias en la precipitación que ocurren durante las SM. En cambio, un *índice de sequías* es un método basado en cálculos estadísticos que emplea variables climáticas y busca cuantificar las SM, permitiendo con ello su comparación en climas diferentes; además, favorecen el desarrollo de acciones de mitigación correctas y eficientes de sus impactos negativos (Pandey *et al.*, 2008; Sene, 2010; Fuchs *et al.*, 2014).

El *objetivo* de este trabajo consiste en exponer de forma breve la evolución que han tenido los índices comunes de SM desde la detección de sus valores anuales hasta llegar a los de duración mensual de diversos periodos, comenzando con índices que sólo empleaban la precipitación anual (*PA*), continuando con los que introdujeron la temperatura media y llegando a los que ahora usan la *ETP*. Respecto a los índices más recientes (*PDSI*, *SPI*, *SPEI* y *SPDI*), no se exponen sus procedimientos operativos, pero se indica dónde se pueden consultar, y se describe y analiza su enfoque o particularidades, destacando sus ventajas.

DetECCIÓN DE SM ANUALES

Técnica basada en la PA

Pandey y Ramasastri (2001; 2002) establecieron que cuando en un año su PA es menor de 75% de la media anual (PMA) ha ocurrido una SM. El número de sequías (NS) anuales, es decir las veces en que PA es menor que 0.75 por PMA , dividido entre el tamaño (n) de la serie o muestra de PA y expresado en porcentaje, es en realidad su *probabilidad de ocurrencia* (% O), ya que cumple con la definición básica de la probabilidad: cociente entre el número de casos favorables al número de casos posibles. Estos autores prefieren emplear el recíproco (n/NS) y lo designan *periodo de retorno promedio* (PRP) en años de las SM. El indicador de severidad de las sequías es su *intensidad media* (IM), definida como el déficit relativo medio, cuya expresión es (Ponce *et al.*, 2000; Pandey & Ramasastri, 2001; Pandey & Ramasastri, 2002):

$$IM = \frac{1}{NS} \sum_{i=1}^{NS} \frac{(PMA - PA_i)}{PMA} \quad (1)$$

Una gráfica con *PMA* en las abscisas y la *IM* en las ordenadas, muestra por lo general un decaimiento exponencial, o bien una curva hiperbólica. Esta gráfica construida para una cierta región geográfica permite la estimación en cualquier localidad de tal zona, de su *IM* de las SM, con sólo disponer del valor de su *PMA*.

Campos-Aranda (2018c) procesó 32 registros de *PA* del estado de San Luis Potosí, México, con amplitudes que variaron de 45 a 65 datos, y definió la gráfica mostrada en la Figura 1. Este método es el procedimiento más simple de caracterización de las SM anuales.

Índice de Sequías de Pedj (*ISP*)

Elagib y Elhag (2011) indican que la *variabilidad anual* del registro o serie de *PA* se puede detectar y analizar por medio de su *índice de anomalía estandarizada (IAE)*, definido por las dos expresiones siguientes:

$$IAE_i^{PA} = \frac{PA_i - PMA}{DEP} \quad (2)$$

siendo PA la precipitación anual en milímetros; PMA su valor medio, y DEP su desviación estándar no sesgada, con n igual al número de años del registro procesado:

$$DEP = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (PA_i - PMA)^2}{(n-1)} \right]^{1/2} \quad (3)$$

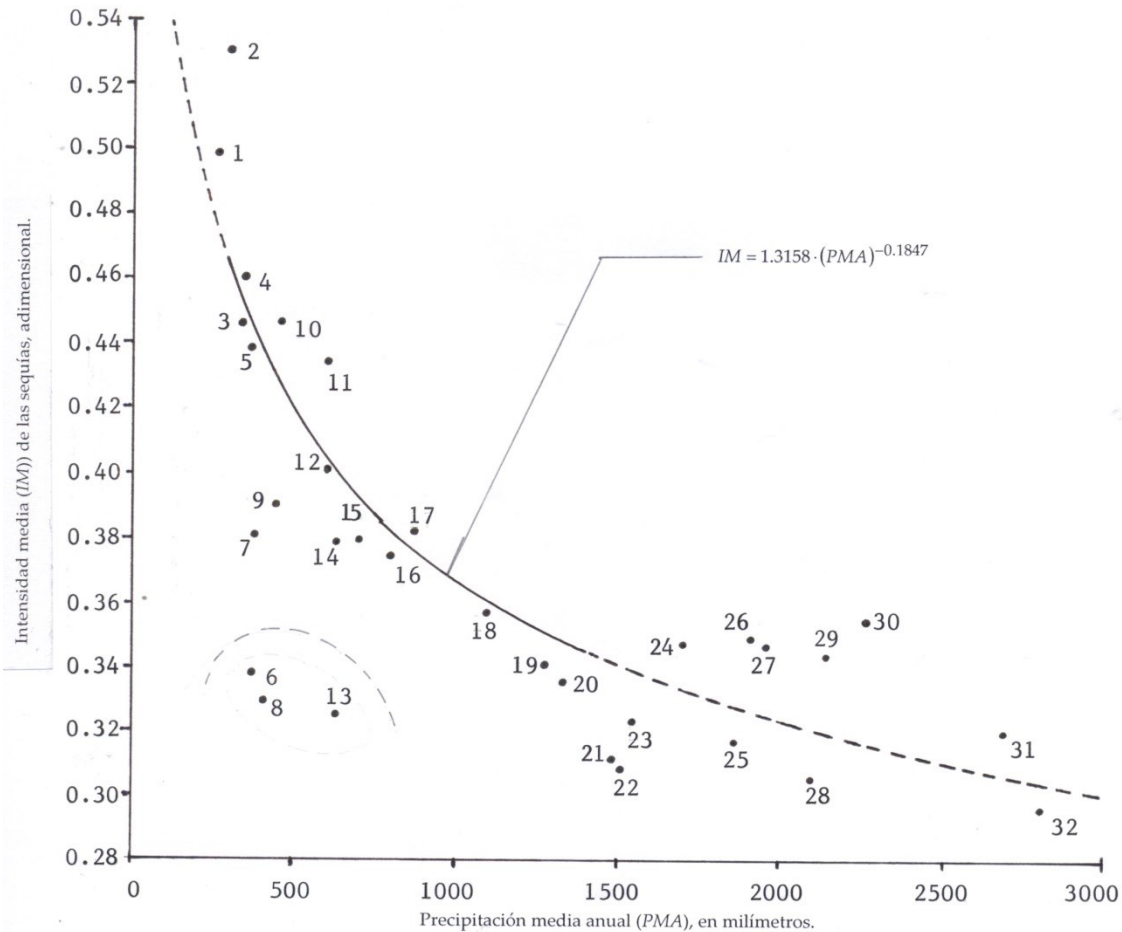


Figura 1. Evolución de la *IM* de las SM con la *PMA*, en 32 estaciones pluviométricas del estado de San Luis Potosí, México.

El *IAE* de la serie de temperatura media (*TM*) anual se calcula con dos ecuaciones similares. Pedj propuso en 1975 en Rusia un índice para

detección de sequías anuales que está definido por la diferencia entre los *IAE* de la temperatura media menos el de la precipitación. El *Índice de Sequías de Pedj (ISP)*, cuyo valor anual clasifica al clima como húmedo ($ISP < 0$) o de sequía ($ISP > 0$), fue verificado de manera empírica, encontrando que tiene correlación negativa con la anomalía de la precipitación, y varía directamente con la anomalía de la temperatura media; pero lo más importante es que captura ambas direcciones o tendencias. Las SM anuales leves, moderadas, severas y extremas se tienen conforme el *ISP* varía entre 0 y 1, 1 y 2, 2 y 3, y más de 3, respectivamente (Elagib & Elhag, 2011).

Campos-Aranda (2018a) aplicó el *ISP* en el estado de Zacatecas, México, integrando 16 series anuales, con 65 valores en el periodo común de 1950-2014; con base en su análisis estadístico, establece el comportamiento local y regional de las SM anuales. Concluye que el *ISP* es una técnica simple y precisa para caracterización de las SM anuales, la cual incorpora a la temperatura media.

Índice de Aridez (IA)

El Programa Ambiental de las Naciones Unidas (UNEP, por sus siglas en inglés) propuso al inicio de los años noventa el cociente PMA/ETP para caracterizar las zonas desérticas y le llamó *Índice de Sequedad*. A partir de este siglo, tal cociente se denomina *Índice de Aridez (IA)* y define los climas áridos cuando IA varía entre 0.200 y 0.050, y los hiperáridos con IA es menor de 0.050 (Elagib, 2009). El índice de aridez anual ($IA = PA/ETP$) se ha utilizado en estudios de SM, debido a que conceptualmente es correcto al relacionar el abastecimiento y la demanda de la atmósfera. Debido a su sencillez de cálculo, el IA se ha empleado en estudios regionales y de grandes territorios (Elagib, 2009). Por lo común, la estimación de la ETP se realiza por medio de métodos empíricos, como los de Thornthwaite y Hargreaves-Samani, que utilizan datos de la temperatura del aire (Vangelis, Tigkas, & Tsakiris, 2013; Campos-Aranda, 2016; Campos-Aranda, 2018b; Campos-Aranda, 2018d).

La serie cronológica de valores anuales de IA se ordena de mayor a menor, conservando el año respectivo, y se obtiene la *mediana*, para definir con los valores menores que ella los años con sequía. Después se trabaja con tales datos para asignar porcentajes de tipos de SM (leves, moderadas, severas y extremas) y encontrar sus años respectivos.

Campos-Aranda (2016) describe los análisis estadísticos realizados con base en el IA en 16 estaciones climatológicas del estado de Zacatecas, México, en un periodo común de 65 años, para monitorear

las SM anuales de manera puntual y regional. El *IA* representó un avance conceptual al incorporar a la *ETP*; sin embargo, ha sido sustituido por el RDI_{st} del inciso siguiente, que se aplica en lapsos mensuales.

Detección de SM mensuales

Índice de Reconocimiento de Sequías (RDI)

Tsakiris y Vangelis (2005) exponen una generalización del *IA* en los dos aspectos siguientes: (1) se aplica en lapsos de k meses y (2) se estandariza. Lo anterior condujo a un nuevo cociente designado RDI de *Reconnaissance Drought Index*. Su cálculo inicia evaluando el cociente (a_i) entre la precipitación mensual acumulada y la respectiva evapotranspiración potencial (*ETP*), en los k meses considerados como *duración* de la SM de cada año i del registro procesado. Tsakiris y

Vangelis (2005), y Tsakiris, Tigkas, Vangelis y Pangalou (2007) encuentran que los valores de a_i siguen una distribución Log-normal y entonces los valores de RDI estandarizados se obtienen con la ecuación siguiente:

$$RDI_{st}^i = \frac{y_i - \bar{y}}{S_y} \quad (4)$$

en la cual y_i es el logaritmo natural de a_i , \bar{y} , y S_y son la media aritmética y la desviación estándar de y_i . Los valores positivos del RDI_{st} indican años húmedos y los negativos SM anuales, con la severidad siguiente: leves hasta -1.00; moderadas fluctuando de -1.00 a -1.50; severas variando de -1.50 a -2.00; por último, extremas, menores que -2.00. Vangelis *et al.* (2013) encuentran que el método empírico de estimación de la ETP no tiene influencia en los resultados del RDI_{st} .

Campos-Aranda (2018a) contrasta el índice RDI_{st} con el ISP en 16 estaciones climatológicas del estado de Zacatecas, México. El contraste se basó en los porcentajes de cada tipo de sequías y en su número total. Sugiere la aplicación sistemática de ambos índices para mejorar la estimación de las series cronológicas de sequías, orientado esto último a su pronóstico (Mishra & Singh, 2011).

Índice de Severidad de Sequías de Palmer (PDSI)

Propuesto a mediados de los años sesenta (Palmer, 1965), el PDSI de *Palmer Drought Severity Index* realiza un balance mensual de precipitación y *ETP* en el suelo que lo considera integrado por dos capas; por ello, es quizás el primer índice multivariado (Hao & Singh, 2015). El PDSI ha sido criticado por no tener un cálculo simple; aplicar varias reglas empíricas; no permitir considerar la duración en meses de las SM; y no ser suficientemente sensitivo a los cambios inducidos en la precipitación y temperatura, al intentar caracterizar las SM futuras según el cambio climático probable de una localidad o región (Alley, 1984; Karl, 1986; Wells, Goddard, & Hayes, 2004; Ma *et al.*, 2014).

Índice Z de China (IZC)

Introducido por el Centro Nacional de Meteorología de China a inicios de la década de 1990, asume que la precipitación mensual procede de una distribución Pearson tipo III y por ello emplea la aproximación Wilson-Hilferty (Zelen & Severo, 1972) para relacionar al índice estadístico Z (IEZ) con este índice, según la expresión siguiente (Wu, Hayes, Weiss, & Hu, 2001; Morid, Smakhtin, & Moghaddasi, 2006; Dogan, Berktaş, & Singh, 2012):

$$IZC_{k,j} = \frac{6}{Cs_k} \left(\frac{Cs_k}{2} IEZ_{k,j} + 1 \right)^{1/3} - \frac{6}{Cs_k} + \frac{Cs_k}{6} \quad (5)$$

siendo Cs_k el coeficiente de asimetría, cuya ecuación es:

$$Cs_k = \frac{\sum_{j=1}^{NS} (x_{k,j} - \bar{x}_k)^3}{NS \cdot (S_k)^3} \quad (6)$$

en la cual $x_{k,j}$ es la precipitación de la secuencia móvil j y de una duración k en meses. La media y desviación estándar de la Ecuación (6) son:

$$\bar{x}_k = \frac{1}{NS} \sum_{j=1}^{NS} x_{k,j} \quad (7)$$

$$S_k = \left[\frac{1}{NS} \sum_{j=1}^{NS} (x_{k,j} - \bar{x}_k)^2 \right]^{1/2} \quad (8)$$

El IEZ proviene de la variable normal estandarizada (Z) y se define como:

$$IEZ_{k,j} = \frac{x_{k,j} - \bar{x}_k}{S_k} \quad (9)$$

Definida la *duración* de la SM en meses (k), que puede ser 1, 3, 6, 9, 12, 18, 24, 30, 36, 48, 60 y 72, se comienza por obtener todas las *secuencias* posibles de tal duración en el registro, las cuales se obtienen como *sumas móviles*. Por ejemplo, para una sequía estacional con $k = 4$, la primera secuencia será la suma del mes uno al cuarto; la segunda secuencia será la suma del mes dos al quinto, y así de forma sucesiva. El número de secuencias o datos (NS) por procesar será:

$$NS = 12 \cdot NA - k + 1 \quad (10)$$

siendo NA el número de años del registro completo disponible (NA > 30), los cuales por lo común inician en enero y terminan en diciembre.

Campos-Aranda (2017) contrasta los resultados del índice Z de China (IZC) y del índice de precipitación estandarizada (SPI), en tres localidades climáticas disímiles del estado de San Luis Potosí, México. Encuentra que sus valores son bastante similares y se puede decir que el primero es una simplificación numérica del segundo. El IZC es más simple de aplicar, pero algunas veces falla su cálculo, cuando IEZ es negativo y el Cs grande, el paréntesis de la Ecuación (5) resulta negativo.

Índice de Precipitación Estandarizada (SPI)

Este índice, denominado SPI de *Standardized Precipitation Index*, se basa en un enfoque probabilístico de la precipitación mensual propuesto por McKee, Doesken y Kleist (1993). Ha mostrado un uso eficiente de la información disponible. Su crítica principal radica en utilizar sólo tales

datos, ignorando con ello otros indicadores de las sequías, como temperatura y *ETP*.

Calculadas las sumas móviles de duración k , se ajusta la función de distribución de probabilidades gamma mixta de dos parámetros a la serie de NS (Ecuación (10)) calculada, ya que tal muestra puede contener ceros. Guttman (1999) propone utilizar la distribución Pearson tipo III. Stagge, Tallaksen, Gudmundsson, Van Loon y Stahl (2015) ratifican el uso de la distribución gamma mixta. Después se emplea una aproximación numérica racional para convertir la probabilidad acumulada estimada con distribución gamma mixta en la variable normal estandarizada Z de media cero y varianza unitaria, la cual define el índice SPI. La definición de SM leves, moderadas, severas y extremas se realiza con base en los valores numéricos citados para el RDI_{st} , al igual que en el índice IZC expuesto, y en los índices SPEI y SPDI siguientes.

Cacciamani, Morgillo, Marchesi y Pavan (2007), y Campos-Aranda (2017) han expuesto la formulación matemática necesaria para el cálculo del SPI. En cambio, Wu, Hayes, Wilhite y Svoboda (2005), y Wu, Svoboda, Hayes, Wilhite y Wen (2007) tratan dos aspectos importantes de la aplicación del SPI: la amplitud del registro y su uso en climas áridos. Cheval (2015) ha expuesto una evolución exhaustiva del SPI en sus aspectos teóricos, prácticos y de sus perspectivas. Campos-Aranda (2017) expone la gráfica de evolución del SPI, con duración de 6, 12 y

24 meses, en las estaciones climatológicas Villa de Arriaga, Río Verde y Xilitla del estado de San Luis Potosí, México, de climas disímiles.

Índice SPEI

La tendencia actual busca la caracterización de las SM a través de índices basados en múltiples variables (Hao & Singh, 2015). Los principales enfoques de construcción de estos nuevos *índices multivariados* son el uso del balance de humedad en el suelo y de las *variables ocultas*. Una variable oculta o latente se forma con una diferencia o cociente de variables que tienen gran significado físico en las SM; por ejemplo, la precipitación y la *ETP*, y así se propuso el RDI con el cociente de tales variables y el SPEI de *Standardized Precipitation Evapotranspiration Index* con su diferencia, que implica una condición de déficit o exceso de agua (Vicente-Serrano *et al.*, 2010).

El SPEI es de cálculo similar al SPI y además sensitivo a las alteraciones inducidas en los registros históricos de precipitación y temperatura, de acuerdo con las expectativas que presenta el cambio climático en tal zona o región para el estudio de las SM futuras. Al igual

que el SPI, las gráficas de evolución de sus valores calculados para una cierta duración (k) permiten la definición exacta del inicio y la terminación de los periodos de sequía, y de la fecha de ocurrencia de sus valores extremos, al usar la Ecuación (10). En la Figura 2 se muestra la gráfica de evolución del SPEI, en la estación climatológica Fresnillo del estado de Zacatecas, México, cuyo registro abarca 66 años, de 1949 a 2014; por lo cual, cuando $k = 12$ meses, su número de secuencias procesadas es de 781.

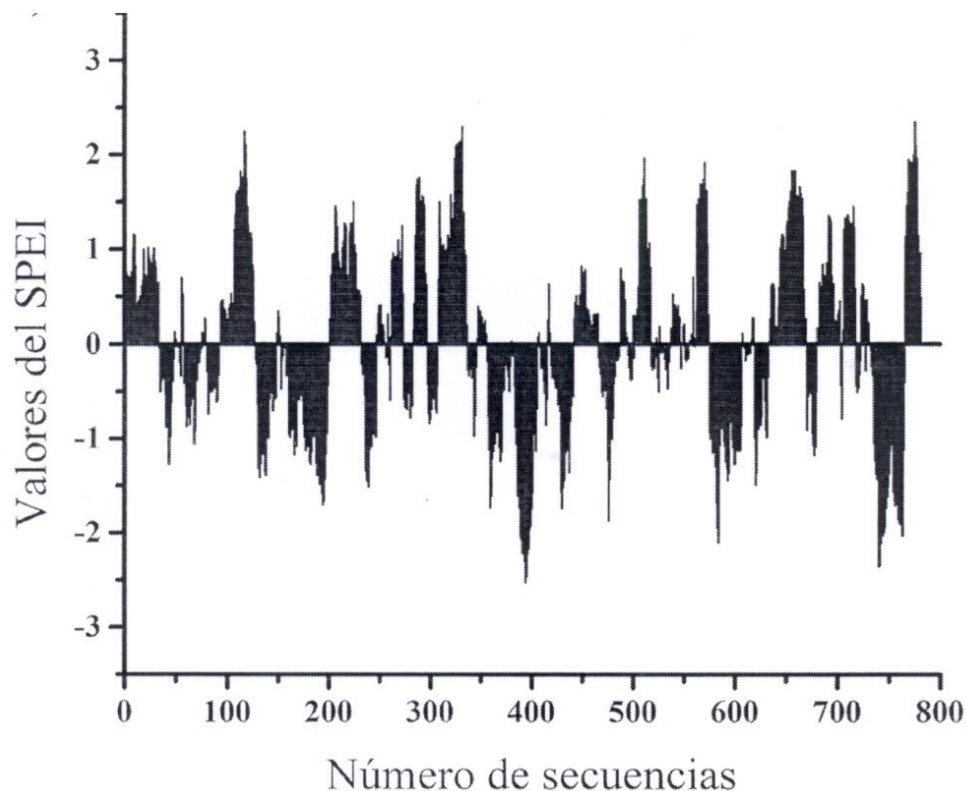


Figura 2. Evolución del SPEI de 12 meses de duración en la estación climatológica Fresnillo, Zacatecas, México.

El cambio fundamental del SPEI con el SPI radica en utilizar como datos de partida las diferencias (d) de la precipitación menos la ETP , ambas acumuladas en uno o varios meses seguidos. Como la mayoría de estas diferencias son negativas, se obtienen muchas *sumas móviles* (Ecuación (10)) menores que cero y entonces la distribución de probabilidades que se necesita ajustar a las secuencias formadas debe ser de tres parámetros de ajuste, con la ubicación (u) menor que la secuencia mínima (Beguería, Vicente-Serrano, Reig, & Latorre, 2014; Stagge *et al.*, 2015).

Campos-Aranda (2018c) detalla el procedimiento operativo del SPEI y lo aplica en la estación climatológica Zacatecas, México, con 86 años de registro: de 1930 a 2015. Con base en el SPEI estima las sequías históricas y futuras, según cambio climático probable (ver Apéndice), con nueve duraciones, que varían de 3 a 48 meses. El SPEI es un índice de sequías de mayor potencial que el SPI, al utilizar una medida más real de la disponibilidad del agua, la diferencia entre la precipitación y la ETP ; además, es sensitivo al cambio climático probable.

Índice de Sequías de Palmer Estandarizado (SPDI)

Un estudio comparativo realizado por Ma *et al.* (2014) de los índices PDSI, SPI y SPEI encontró deficiencias y limitaciones en la diferencia d utilizada por el SPEI, como ecuación del balance climático mensual, y proponen emplear la calculada dentro de procedimiento operativo del índice de Palmer (PDSI), llamada *desviación de la humedad* (dh), que es la diferencia entre la precipitación observada y una estimada para las condiciones normales del clima de la región, la cual se calcula con base en los resultados del balance hídrico del suelo. Al procesar las diferencias dh con el enfoque probabilístico del SPI, se ha desarrollado un nuevo índice, el SPDI de *Standardized Palmer Drought Index*, que engloba la parte teórica rescatable del índice de Palmer, la eficiencia computacional del SPI, y reproduce la sensibilidad del SPEI para considerar los cambios climáticos probables (Ma *et al.*, 2014).

Campos-Aranda (2018d) expone contrastes en duraciones de sequía de 6, 12 y 24 meses del SPDI contra el SPI y el SPEI, en las estaciones climatológicas Villa de Arriaga, Río Verde y Xilitla del estado de San Luis Potosí, México, que tienen climas diferentes.

En la Figura 3, la gráfica b) corresponde al SPDI con registro histórico (769 secuencias procesadas) alterado con reducción de 20% en la precipitación anual. La gráfica c) muestra las diferencias entre los SPDI alterado y el original, es decir, b) menos a).

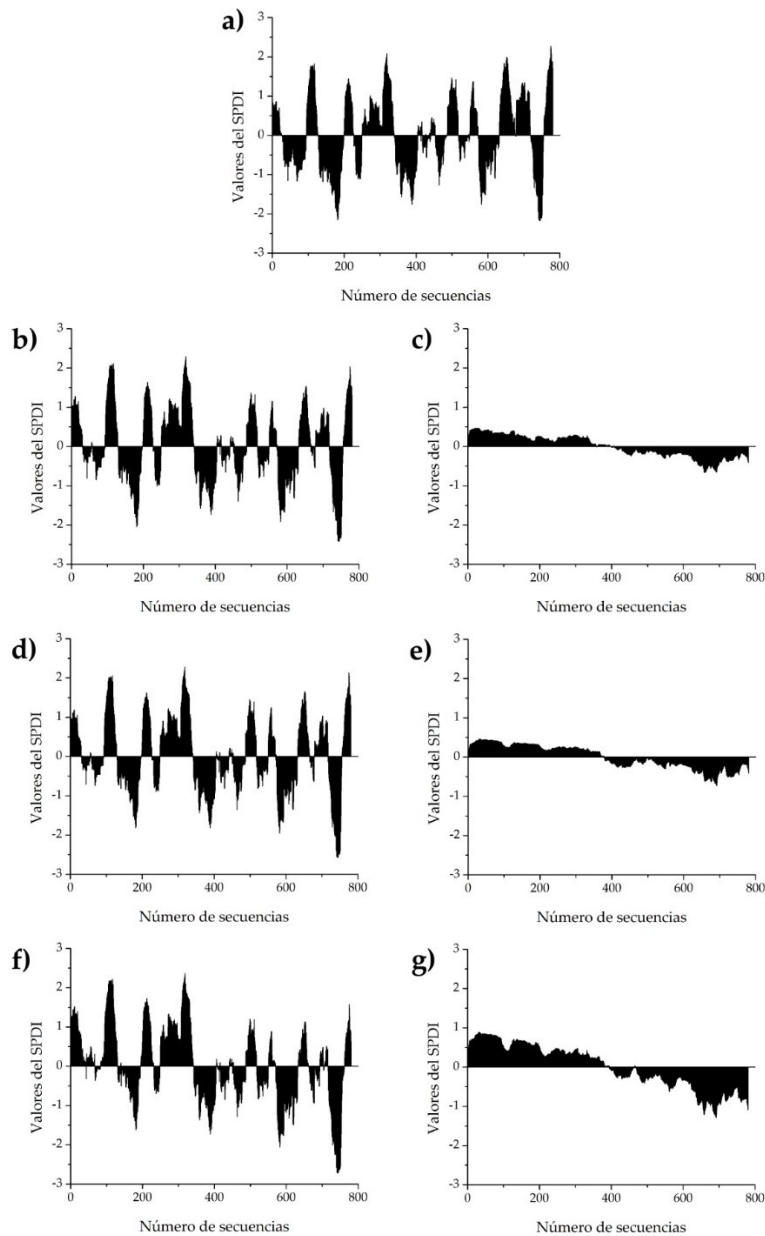


Figura 3. Gráficas de evolución del SPDI de duración 24 meses en la estación climatológica Fresnillo, del estado de Zacatecas, México (gráfica a) registro histórico; otras descripciones en el texto).

La gráfica d) corresponde al SPDI con registro histórico alterado con aumento de 4 °C en la temperatura media anual. La gráfica e) muestra las diferencias entre los SPDI alterado y el original, es decir, d) menos a). La gráfica f) corresponde al SPDI con registro histórico alterado con reducción de 20% en la precipitación anual y aumento de 4 °C en la temperatura media anual. La gráfica g) muestra las diferencias entre los SPDI alterado y el original, es decir, f) menos a).

Conclusiones

Se han expuesto, de manera breve, los aspectos conceptuales de los diferentes índices de *sequías meteorológicas* (SM) más comunes o universales que se han propuesto desde mediados de la década de 1960, comenzando por los más simples y llegando a los más

complicados. Se omiten sus procedimientos operativos, pero se cita dónde se pueden consultar en su versión teórica y dónde el autor los ha aplicado a datos reales.

Se comenzó caracterizando SM anuales y después se abordó la evaluación de las SM en lapsos de varios meses, es decir, adoptando una *duración* para la sequía.

Esta recopilación se considera útil para comenzar y avanzar en el estudio y caracterización de las SM históricas de una localidad, con base en una cierta estación climatológica o meteorológica. El estudio de una zona o región geográfica se aborda igual, pero interpretando los resultados de varias estaciones climatológicas, para concluir sobre el comportamiento o *evolución espacial* de las SM.

Se insiste en progresar en el estudio y la evaluación cuantitativa de las SM locales o regionales, según como se describen los índices, pues su evolución histórica y su complejidad computacional concuerdan.

Apéndice: condiciones hipotéticas asociadas con el cambio climático

Todos los índices expuestos permiten una estimación aproximada de las SM futuras, a través de alterar o modificar los registros históricos de PA y TM , para tomar en cuenta el cambio climático probable de la localidad o zona geográfica estudiada (Fuchs *et al.*, 2014). En los índices IZC y SPI sólo se altera el registro de precipitación; en los que emplean la ETP , primero se modifica el registro de temperatura y después se aplica su método de estimación.

Con base en los análisis cuantitativos realizados por Vicente-Serrano *et al.* (2010) y Ma *et al.* (2014), se recomienda establecer y analizar tres escenarios del cambio climático probable: (1) una reducción progresiva y lineal de 20% en la precipitación anual del registro histórico; (2) un aumento progresivo y lineal de 4 °C en el registro de temperatura media anual, y (3) la superposición de ambos cambios en los registros históricos. La corrección del registro mensual de precipitación ($PM_{j,i}$) se realiza con base en la ecuación siguiente:

$$PM_{j,i} = PM_{j,i} - (\Delta_P \cdot i \cdot PM_{j,i}) \quad (11)$$

en la cual j es el contador de meses, cambiando de 1 a 12, e i el de años, variando de 1 a NA, que es el número años procesados, Δ_P es

la pendiente de la reducción y por lo tanto igual al cociente de 0.20 entre NA.

La corrección al registro de temperatura media mensual ($TM_{j,i}$) se efectúa con la ecuación:

$$TM_{j,i} = TM_{j,i} + (\Delta_T \cdot i) \quad (12)$$

ahora, Δ_T es la pendiente del incremento y por ello igual al cociente de 4 °C entre NA.

Agradecimientos

Se agradecen las observaciones y correcciones sugeridas por el árbitro anónimo C, las cuales permitieron ampliar el contenido del trabajo en relación con las ventajas de cada índice de sequías expuesto y ayudaron a buscar una mejor descripción numérica de ellos, al citar diversas aplicaciones del autor.

Referencias

Alley, W. M. (1984). The Palmer drought severity index: Limitations and assumptions. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23(7), 77-86.

- Beguería, S., Vicente-Serrano, S. M., Reig, F., & Latorre, B. (2014). Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) revisited: Parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring. *International Journal of Climatology*, 34(10), 3001-3023.
- Campos-Aranda, D. F. (2016). Estudio de sequías meteorológicas anuales por medio del índice de aridez, en el estado de Zacatecas, México. *Ingeniería. Investigación y Tecnología*, 17(3), 403-415.
- Campos-Aranda, D. F. (2017). Cuantificación de sequías meteorológicas mensuales: cotejo de cuatro índices en tres localidades de San Luis Potosí, México. *Tecnología y ciencias del agua*, 8(3), 159-172.
- Campos-Aranda, D. F. (2018a). Detección de sequías meteorológicas anuales en el estado de Zacatecas, México, con base en índices de anomalía estandarizada. *Tecnología y ciencias del agua*, 9(1), 135-149.
- Campos-Aranda, D. F. (2018b). Cuantificación con el SPEI de sequías históricas y bajo cambio climático probable en la estación climatológica Zacatecas, México. *Tecnología y ciencias del agua*, 9(2), 210-233.
- Campos-Aranda, D. F. (2018c). Análisis estadístico de la ocurrencia de sequías meteorológicas anuales según tipo de clima del estado de

- San Luis Potosí, México. *Tecnología y ciencias del agua*, 9(3), 213-231.
- Campos-Aranda, D. F. (2018d). Contrastes del Índice de Sequías de Palmer Estandarizado (SPDI) en tres ubicaciones climáticas de San Luis Potosí, México. *Tecnología y ciencias del agua*, 9(5), 246-279.
- Cheval, S. (2015). The Standardized Precipitation Index - An overview. *Romanian Journal of Meteorology*, 12(1-2), 17-64.
- Cacciamani, C., Morgillo, A., Marchesi, S., & Pavan, V. (2007). Chapter 2. Monitoring and forecasting drought on a regional scale. In: Rossi, G., Vega, T., & Bonaccorso, B. (eds.). *Methods and tools for drought analysis and management* (pp. 29-48). Dordrecht, The Netherlands: Springer.
- Dogan, S., Berktaş, A., & Singh, V. P. (2012). Comparison of multi-monthly rainfall-based drought severity indices, with application to semi-arid Konya closed basin, Turkey. *Journal of Hydrology*, 470-471, 255-268.
- Elagib, N. A. (2009). Assessment of drought across central Sudan using UNEP dryness ratio. *Hydrology Research*, 40(5), 481-494.
- Elagib, N. A., & Elhag, M. M. (2011). Major climate indicators of ongoing drought in Sudan. *Journal of Hydrology*, 409(3-4), 612-625.
- Fernández, B., & Gironas, J. (2017). Chapter 79. Drought characteristics. In: Singh, V. P. (ed.). *Handbook of applied*

- hydrology* (2nd ed.) (pp. 79.1-79.12). New York, USA: McGraw-Hill Education.
- Fuchs, B. A., Svoboda, M. D., Wilhite, D. A., & Hayes, M. J. (2014). Chapter 12. Drought indices for drought risk assessment in a changing climate. In: Eslamian, S. (ed.). *Handbook of engineering hydrology. Modeling, climate change and variability* (pp. 217-231). Boca Raton, USA: CRC Press.
- Guttman, N. B. (1999). Accepting the Standardized Precipitation Index: A calculation algorithm. *Journal of the American Water Resources Association*, 35(2), 311-322.
- Hao, Z., & Singh, V. P. (2015). Drought characterization from a multivariate perspective: A review. *Journal of Hydrology*, 527, 668-678.
- Karl, T. R. (1986). The sensitivity of the Palmer drought severity index and Palmer's Z-index to their calibration coefficients including potential evapotranspiration. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 25(1), 77-86.
- Ma, M., Ren, L., Yuan, F., Jiang, S., Liu, Y., Kong, H., & Gong, L. (2014). A new standardized Palmer drought index for hydro-meteorological use. *Hydrological Processes*, 28(23), 5645-5661.

- McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The relationship of Drought frequency and duration to times scales. *8th Conference on Applied Climatology* (pp. 179-184). Anaheim, California, USA.
- Mishra, A. K., & Singh, V. P. (2010). A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 391(1-2), 202-216.
- Mishra, A. K., & Singh, V. P. (2011). Drought modeling - A review. *Journal of Hydrology*, 403(1-2), 157-175.
- Morid, S., Smakhtin, V., & Moghaddasi, M. (2006). Comparison of seven meteorological indices for drought monitoring in Iran. *International Journal of Climatology*, 26(7), 971-985.
- Palmer, W. C. (1965). *Meteorological drought*. Research Paper No. 45. U. S. Weather Bureau, Washington, D. C., USA.
- Pandey, R. P., & Ramasastri, K. S. (2001). Relationship between the common climatic parameters and average drought frequency. *Hydrological Processes*, 15(6), 1019-1032.
- Pandey, R. P., & Ramasastri, K. S. (2002). Incidence of droughts in different climatic regions. *Hydrological Sciences Journal*, 47(S), S31-S40.
- Pandey, R. P., Sharma, K. D., Mishra, S. K., Singh, R., & Agarwal, A. (2008). Chapter 21. Drought characterization. In: Singh, V. P. *Hydrology and Hydraulics* (pp. 761-792). Highlands Ranch, USA: Water Resources Publications.

- Panu, U. S., & Sharma, T. C. (2002). Challenges in drought research: Some perspectives and future directions. *Hydrological Sciences Journal*, 47(S), S19-S30.
- Ponce, V. M., Pandey, R. P., & Ercan, S. (2000). Characterization of drought across climatic spectrum. *Journal of Hydrologic Engineering*, 5(2), 222-224.
- Sene, K. (2010). Chapter 8. Droughts. In: *Hydro-meteorology. Forecasting and Applications* (pp. 239-267). London, UK: Springer.
- Stagge, J. H., Tallaksen, L. M., Gudmundsson, L., Van Loon, A. F., & Stahl, K. (2015). Candidate distributions for climatological drought indices (SPI and SPEI). *International Journal of Climatology*, 35(13), 4027-4040.
- Tsakiris, G., & Vangelis, H. (2005). Establishing a drought index incorporating evapotranspiration. *European Water*, 9/10, 3-11.
- Tsakiris, G., Tigkas, D., Vangelis, H., & Pangalou, D. (2007). Chapter 9. Regional drought identification and assessment. In: Rossi, G., Vega, T., & Bonaccorso, B. (eds.). *Methods and tools for drought analysis and management* (pp. 169-191). Dordrecht, The Netherlands: Springer.
- Vangelis, H., Tigkas, D., & Tsakiris, G. (2013). The effect of PET method on Reconnaissance Drought Index (RDI) calculation. *Journal of Arid Environments*, 88, 130-140.

- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A multiscale Drought Index sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Journal of Climate*, 23(7), 1696-1718.
- Wells, N., Goddard, S., & Hayes, M. J. (2004). A self-calibrating Palmer drought severity index. *Journal of Climate*, 17(12), 2335-2351.
- Wu, H., Hayes, M. J., Weiss, A., & Hu, Q. (2001). An evaluation of the Standardized Precipitation Index, the China-Z Index and the Statistical Z-score. *International Journal of Climatology*, 21(6), 745-758.
- Wu, H., Hayes, M. J., Wilhite, D. A., & Svoboda, M. D. (2005). The effect of the length of record on the standardized precipitation index calculation. *International Journal of Climatology*, 25(4), 505-520.
- Wu, H., Svoboda, M. D., Hayes, M. J., Wilhite, D. A., & Wen, F. (2007). Appropriate application of the SPI in arid locations and dry seasons. *International Journal of Climatology*, 27(1), 65-79.
- Zelen, M., & Severo, N. C. (1972). Chapter 26. Probability functions. In: Abramowitz, M., & Stegun, I. (eds.). *Handbook of mathematical functions* (pp. 925-995). New York, USA: Dover Publications.