



Evaluación de la influencia de componentes sistemáticos en índices de sequía bajo escenarios climáticos en la cuenca alta del Río Ángulo, Michoacán

Evaluation of the influence of systematic components on drought indices under climate scenarios in the upper Ángulo River basin, Michoacán.

Giovanni Carlo Flores Fernández , José Jaime Madrigal Barrera  ✉, Sonia Tatiana Sánchez Quispe 

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería Civil, Gral. Francisco J. Múgica 172B, Ciudad Universitaria, col. Felicitas del Río, C.P. 58040, Morelia, Michoacán, México

Resumen

Este estudio evalúa el efecto de la desestacionalización y la remoción de tendencia en series de precipitación, escorrentía y niveles de agua subterránea para mejorar la precisión de índices de sequía (SPI, SDI y SGI) en la cuenca alta del río Ángulo, Michoacán. Se aplicaron modelos SARIMA para aislar las anomalías hidrológicas genuinas, comparando índices calculados sobre series originales y ajustadas. Los resultados muestran que los índices depurados presentan mayor sensibilidad y realismo en la detección de sequías meteorológicas e hidrológicas, evitando sesgos inducidos por patrones estacionales y tendencias de largo plazo. Se concluye que estos procesos son esenciales para la caracterización precisa de sequías en cuencas con alta variabilidad estacional.

Palabras clave: desestacionalización, índices de sequía, SARIMA, Variabilidad estacional, Cuenca hidrológica.

Abstract

This study evaluates the effect of deseasonalization and trend removal in precipitation, streamflow, and groundwater level series to improve drought index accuracy (SPI, SDI, and SGI) in the upper Angulo River basin, Michoacán. SARIMA models were applied to isolate genuine hydrological anomalies, comparing indices from original and adjusted series. Results show that processed indices exhibit greater sensitivity and realism in detecting meteorological and hydrological droughts, avoiding biases from seasonal patterns and long-term trends. It is concluded that these processes are essential for accurate drought characterization in basins with high seasonal variability.

Keywords: Deseasonalization, Drought indices, SARIMA, Seasonal variability, Hydrologic basin.

Introducción

La sequía es uno de los fenómenos hidrometeorológicos más complejos y costosos, caracterizado por su desarrollo lento y sus impactos prolongados sobre ecosistemas, economías y sociedades (Mishra y Singh, 2010). A diferencia de otros desastres naturales de rápida manifestación, la sequía se distingue por su inicio gradual, su difícil delimitación espacial y temporal, y la multiplicidad de factores que la determinan. Su análisis y monitoreo requieren herramientas capaces de integrar información climática e hidrológica para estimar de manera objetiva su severidad, extensión y duración. Entre estas herramientas, los índices de sequía como el *Standardized Precipitation Index* (SPI; McKee *et al.*, 1993), el *Standardized Precipitation Evapotranspiration Index* (SPEI; Vicente-Serrano *et al.*, 2010) y el *Standardized Streamflow Index* (SDI; Nalbantis y Tsakiris, 2009) han demostrado ser instrumentos robustos y comparables a nivel global (Dai, 2011).

Historial

Manuscrito recibido: 31 de octubre de 2025

Manuscrito aceptado: 19 de abril de 2026

Manuscrito publicado: agosto de 2026

✉ Autor para correspondencia

José Jaime Madrigal Barrera

jose.madrigal@umich.mx

Como citar

Flores Fernández GC, Madrigal Barrera JJ, Sánchez Quispe ST (2026). Evaluación de la influencia de componentes sistemáticos en índices de sequía bajo escenarios climáticos en la cuenca alta del Río Ángulo, Michoacán. *Ciencia Nicolaita* 97:195-202. doi:[10.35830/cn.vi97.953](https://doi.org/10.35830/cn.vi97.953)

En el caso de México, la sequía representa un riesgo recurrente y creciente, exacerbado por la variabilidad climática natural y el cambio climático antropogénico (Magaña y Neri, 2014). De acuerdo con el Monitor de Sequía de México de la CONAGUA (2023), en los últimos años se han registrado episodios severos y extremos que han afectado amplias zonas del país, particularmente el norte y centro-norte, donde la precipitación anual es limitada y la evapotranspiración potencial es alta. Regiones como

Chihuahua, Coahuila, Durango, Zacatecas y San Luis Potosí presentan alta frecuencia de sequías meteorológicas e hidrológicas, mientras que en el noroeste (Baja California y Sonora) la escasez hídrica es estructural, condicionada por climas áridos y semiáridos (García, 2004).

El cálculo de índices de sequía se basa en series de tiempo climáticas o hidrológicas (precipitación, escurrimiento, almacenamiento de agua subterránea, etc.), las cuales presentan de forma inherente dos componentes relevantes: estacionalidad y tendencia. La estacionalidad se refiere a patrones recurrentes en intervalos fijos, como el incremento de la precipitación durante la temporada de lluvias (Wu *et al.*, 2007). La tendencia refleja cambios de largo plazo, ya sean incrementos o disminuciones sostenidas en los valores medios, producto de variabilidad climática de baja frecuencia o del cambio climático (Vicente-Serrano *et al.*, 2014). Estos componentes, aunque contienen información valiosa, pueden enmascarar las anomalías que los índices de sequía pretenden capturar. Por ejemplo, un SPI calculado sobre una serie con fuerte estacionalidad puede mostrar picos y valles no atribuibles a sequías o excesos hídricos reales, sino al ciclo anual.

Para mejorar la detección de eventos extremos, resulta conveniente remover la estacionalidad y la tendencia antes de calcular los índices de sequía. Este proceso permite aislar la variabilidad interanual y subestacional asociada a anomalías hidrológicas reales, reduciendo el sesgo y aumentando la sensibilidad del índice (Box *et al.*, 2015; Hipel y McLeod, 1994). La desestacionalización y eliminación de tendencia se pueden lograr mediante metodologías estadísticas y de series temporales como: STL (*Seasonal and Trend decomposition using Loess*), un método no paramétrico que separa una serie en tendencia, estacionalidad y remanente, permitiendo capturar variaciones no lineales y cambios en la amplitud estacional (Cleveland *et al.*, 1990). Los modelos *Autoregressive Integrated Moving Average* (ARIMA) y *Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average* (SARIMA), técnicas paramétricas ampliamente utilizadas para modelar y remover patrones determinísticos y estocásticos, incluyendo la estacionalidad (Box *et al.*, 2015). Los filtros y suavizados no paramétricos como loess o moving averages, útiles para aislar componentes de baja frecuencia (Hipel y McLeod, 1994).

El uso de estas técnicas en el contexto de índices de sequía ha mostrado mejoras en la capacidad de detección de eventos extremos, al reducir la influencia de ciclos recurrentes y tendencias a largo plazo (Vicente-Serrano *et al.*, 2014; Stagge *et al.*, 2015). En particular, el enfoque STL presenta ventajas por su flexibilidad, robustez ante datos irregulares y facilidad de interpretación visual (Cleveland *et al.*, 1990).

El propósito de este trabajo es ejemplificar que la desestacionalización y la eliminación de la tendencia en parámetros climáticos e hidrológicos son procesos necesarios para un entendimiento más completo de la sequía. Esto se muestra mediante la aplicación de dichas técnicas al cálculo de tres tipos de índices: SPI (precipitación), SDI (escurrimiento) y SGI (niveles de agua subterránea). A través de comparaciones visuales y cuantitativas entre índices calculados sobre series originales y series ajustadas, se evidenciará cómo estos procesos mejoran la sensibilidad y precisión en la caracterización de sequías meteorológicas e hidrológicas en México.

Materiales y métodos

Obtención de Datos

El análisis se desarrolló a partir de tres tipos de variables hidrometeorológicas: precipitación, escurrimiento superficial y niveles de agua subterránea para el periodo 1999-2019, principalmente por la disponibilidad de datos de tipo hidrométrico.

Los registros de precipitación mensual se obtuvieron del proyecto *CLimate COMputing* (CLICOM), administrado por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Se seleccionó una estación con series de tiempo continua y representativa del área de estudio. Los valores faltantes se estimaron mediante el método *Inverse Distance Weighted* (IDW) (Shepard, 1968).

Los valores de caudal mensual se obtuvieron mediante la simulación hidrológica con un modelo generado en el software EVALuación de los recursos HÍDRICOS (EVAL-HID, Paredes *et al.*, 2017), herramienta que integra balances hídricos y parámetros fisiográficos de la cuenca. El modelo fue calibrado y validado con registros de gasto medio mensual del banco de datos BANDAS de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), empleando métricas de desempeño como el coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) y el error cuadrático medio (RMSE) (Flores Fernández, 2016).

En cuanto a los niveles estáticos mensuales se simuló a partir de un modelo hidrológico subterráneo en el módulo AQUIVAL para el acuífero asociado al sistema superficial de estudio, basado en el método de autovalores, calibrado con datos históricos de piezómetros distribuidos en el acuífero (Flores-Fernández *et al.*, 2022).

Índices de Sequía

Se emplearon tres índices estandarizados para caracterizar la sequía a partir de cada variable, el SPI que cuantifica anomalías de precipitación mediante la transformación

de la serie acumulada a una distribución normal estándar. (McKee *et al.*, 1993). El SDI (Nalbantis y Tsakiris, 2009), similar al SPI, pero calculado con volúmenes de escurrimiento y el Índice Estandarizado de Nivel de Aguas Subterráneas (SGI) de Nalbantis y Tsakiris (2009), semejante a los anteriores pero calculado con volúmenes de escurrimiento.

El procedimiento de estimación del índice estandarizado sigue una formulación como la siguiente:

$$SXI_i = \frac{X_i - \bar{X}}{\sigma} \quad (1)$$

Donde SXI_i es el valor de intensidad de sequía de acuerdo al indicador asociado para el mes i , X_i es el valor mensual del parámetro, $\bar{X}$ y σ son la media y la desviación estándar de los registros correspondientes a cada variable.

Desestacionalización y remoción de tendencia

Se aplicó un modelo SARIMA para la eliminación simultánea de tendencia y estacionalidad en las series de precipitación, escurrimiento y niveles de agua subterránea. El modelo SARIMA es una extensión del modelo ARIMA que incorpora términos estacionales, permitiendo representar patrones cíclicos de largo plazo y de periodicidad fija (Box *et al.*, 2015). Su notación general es:

$$SARIMA(p, d, q)(P, D, Q)s \quad (2)$$

Donde p es el orden de la parte autorregresiva no estacional, d es el orden de diferenciación no estacional (remoción de tendencia), q es el orden de la parte de media móvil no estacional, P es el orden de la parte autorregresiva estacional, D es el orden de diferenciación estacional (remoción de estacionalidad), Q es el orden de la parte de media móvil estacional y s es la periodicidad estacional (en meses, trimestres, etc.).

La formulación general se expresa como:

$$\Phi_P(B^s)\phi_p(B)\nabla_s^D\nabla^d y_t = \Theta_Q(B^s)\theta_q(B)\varepsilon_t \quad (3)$$

Donde B es el operador de rezago ($By_t = y_{t-1}$), $\nabla^d = (1 - B^s)^d$ es el operador de diferenciación no estacional, $\nabla_s^D = (1 - B^s)^D$ es el operador de diferenciación estacional, $\phi_p(B)$ y $\theta_q(B)$ son los polinomios autorregresivos y de media móvil no estacionales, $\Phi_P(Bs)$ y $\Theta_Q(Bs)$ son los polinomios estacionales y ε_t es el término de error aleatorio.

El ajuste se realizó de manera automatizada mediante

la función *auto.arima()* del paquete *forecast* de R, que selecciona los parámetros (p, d, q, P, D, Q, s) minimizando el criterio de información AICc y verificando significancia estadística. La implementación del modelo SARIMA permite obtener series temporalmente depuradas, eliminando patrones cíclicos y tendencias que pueden enmascarar la verdadera variabilidad interanual y multi-anual relevante para la detección y caracterización de sequías (Hyndman y Athanasopoulos, 2018).

Zona de estudio

El estudio se desarrolló en la porción de la cuenca alta del río Angulo, localizada en el occidente de México, dentro del estado de Michoacán. La zona de estudio se delimitó geográficamente por las coordenadas latitud 19.927731° N y 19.720000° N, y longitud -101.545662° O y -101.374286° O, abarcando una superficie que corresponde al sector alto de la cuenca (**Figura 1**).

Para la caracterización climática se utilizaron registros provenientes de la estación meteorológica E-16100 del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), seleccionada por su cobertura temporal y proximidad al área de interés. La dinámica superficial del escurrimiento fue evaluada a través de los registros de la estación hidrométrica 12415, localizada aguas abajo de la zona de influencia, y complementada con resultados de simulación hidrológica superficial obtenidos mediante el modelo EVALHID.

En lo referente al recurso hídrico subterráneo, se empleó la información correspondiente a la celda número 159 del modelo hidrogeológico regional del acuífero Pastor Ortiz asociado al sistema superficial del río Angulo, lo que permitió estimar los niveles estáticos a partir de un esquema de modelación de flujo subterráneo calibrado para representar las condiciones de almacenamiento y descarga en el sector alto de la cuenca.

El área presenta un clima predominantemente templado subhúmedo con lluvias concentradas en verano, y su vegetación incluye zonas de bosque templado y áreas agrícolas. Estas características, combinadas con una marcada estacionalidad de la precipitación y una alta dependencia del agua superficial y subterránea para actividades productivas, hacen de la región un sitio representativo para evaluar la utilidad de procesos de desestacionalización y remoción de tendencia en la estimación de índices de sequía como el SPI, SDI y SGI.

Resultados

A continuación, se presentan los hallazgos derivados de la aplicación de los procesos de desestacionalización

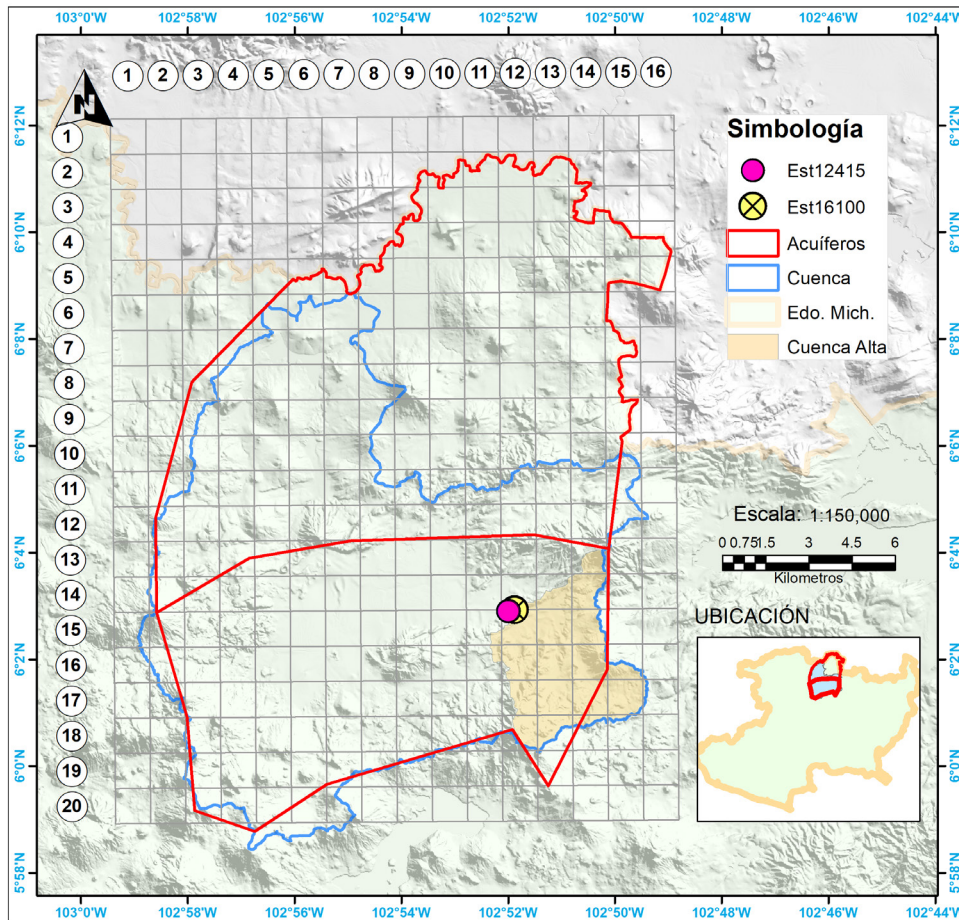


Figura 1. Configuración de la zona de estudio.

y remoción de tendencia a las series de precipitación, escurrimiento y niveles de agua subterránea de la zona de estudio, así como su impacto en el cálculo de los índices de sequía SPI, SDI y SGI. Se describen en principio las características generales de las series originales y su comportamiento estacional, para posteriormente mostrar el efecto de los procedimientos aplicados mediante comparaciones gráficas y análisis de intensidad. De esta manera, se evidencia cómo la eliminación de patrones estacionales y tendencias sistemáticas permite resaltar las variaciones anómalas en cada variable, contribuyendo a una estimación más precisa y representativa de las condiciones de sequía en la cuenca alta del río Angulo.

La **Figura 2** muestra la descomposición de la serie histórica de precipitación mediante el método SARIMA, donde se distinguen claramente los componentes de tendencia, estacionalidad y residuales. El análisis revela que la serie original presenta un patrón estacional marcado, con picos recurrentes asociados al régimen de lluvias estivales característico de la región. La tendencia a largo plazo indica variaciones progresivas en los niveles de precipitación que podrían estar asociadas a cambios

climáticos o a variabilidad interanual.

Una vez eliminados los componentes estacionales y la tendencia, la serie residual presenta fluctuaciones centradas alrededor de un valor medio estable, lo que permite identificar de forma más precisa las anomalías asociadas a periodos secos o húmedos. Este ajuste resalta las desviaciones que, en la serie original, quedaban “enmascaradas” por la estacionalidad natural del clima y las tendencias de largo plazo.

En la **Figura 3** se compara el índice SPI calculado a partir de la serie original y de la serie desestacionalizada. Se observa que, tras la aplicación del proceso, se incrementa la claridad en la detección de eventos de sequía, especialmente en periodos en los que la estacionalidad generaba sesgos en la magnitud y frecuencia de los valores negativos del índice. Esto se traduce en una representación más realista de la intensidad y duración de los eventos, facilitando la diferenciación entre variabilidad natural y condiciones de déficit hídrico genuino.

El análisis de la descomposición de la serie histórica de escurrimiento en la zona alta de la cuenca (**Figura 4**), expresada en volúmenes mensuales (hm^3), revela una

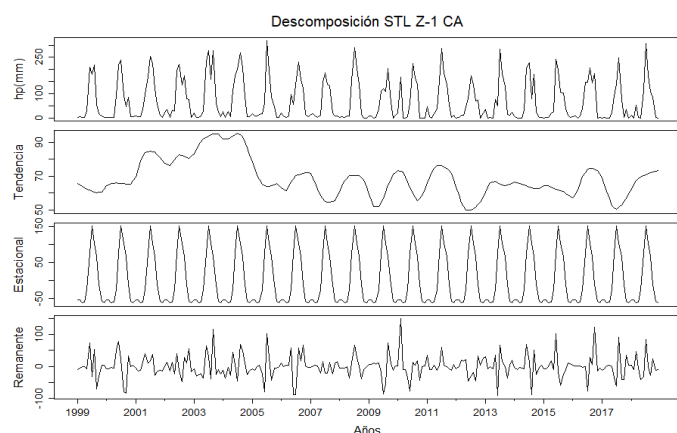


Figura 2. Descomposición de serie de precipitación por modelo SA-RIMA.

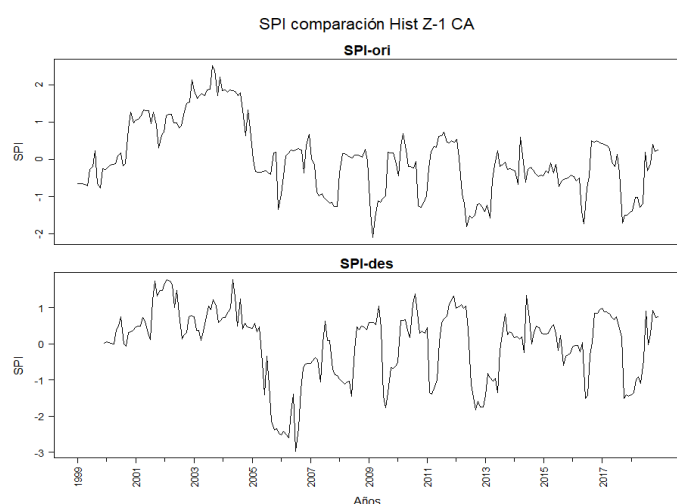


Figura 3. Comparativa de índice de sequía SPI ordinario y desestacionalizado con remoción de tendencia.

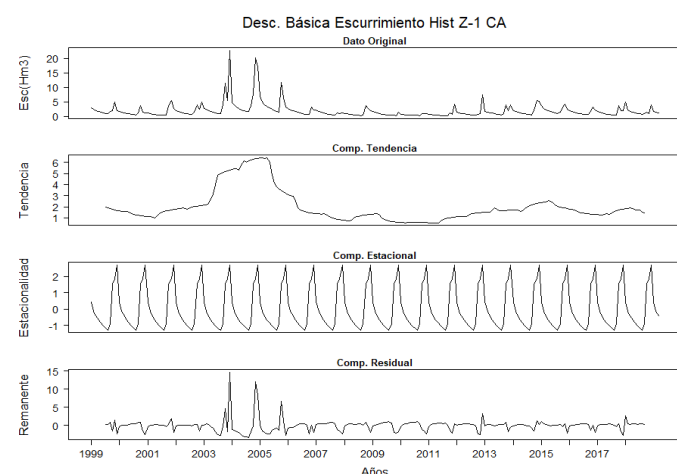


Figura 4. Descomposición de serie de escurrimiento por modelo SA-RIMA.

señal estacional bien definida con periodicidad anual, donde los picos se concentran en la temporada húmeda, mostrando amplitud estable a lo largo del periodo. Sobre esta señal se superpone una tendencia de largo plazo caracterizada por un incremento sostenido desde 2002 hasta un máximo pronunciado en 2004–2005, seguido de un descenso progresivo y estabilización posterior. La componente residual, obtenida tras eliminar tendencia y estacionalidad, concentra las fluctuaciones no periódicas y de corta duración, las cuales representan la señal clave para la detección de eventos de sequía o exceso hídrico no atribuibles a la variabilidad climática regular.

En cuanto a la comparativa del SDI calculado directamente sobre la serie original y el obtenido tras la desestacionalización y remoción de tendencia (**Figura 5**), el SDI-ori presenta una evolución suavizada en la que los cambios graduales integran tanto los efectos de la tendencia como de la estacionalidad, junto con las anomalías reales. Este patrón tiende a mostrar periodos prolongados de humedad o sequía, como el ascenso continuo entre 2002 y 2004–2005 y la disminución posterior hasta 2006–2007, que en parte reflejan variaciones de largo plazo y no necesariamente eventos extremos discretos.

En contraste, el SDI-des se centra en torno a cero y presenta oscilaciones más cortas y abruptas, con amplitudes que reflejan de manera más precisa las desviaciones respecto a la media histórica una vez eliminados los componentes sistemáticos. Esto permite una mejor identificación de déficits severos (por ejemplo, la caída pronunciada de 2005–2006) y excedentes marcados (como el pico positivo de 2003–2004) que en la serie original se encuentran atenuados. De esta forma, el proceso de desestacionalización y eliminación de tendencia incrementa la sensibilidad del índice para detectar eventos hidrológicos extremos, evitando la confusión entre ciclos estacionales recurrentes y anomalías genuinas, y proporcionando una representación más fiel de la dinámica de sequías y posibles inundaciones en la cuenca.

La descomposición aditiva de la serie histórica de los niveles de agua subterránea en la zona alta de la cuenca expresada en metros sobre el nivel del mar (msnm) se presenta en la **Figura 6**, donde el análisis revela una marcada señal estacional con periodicidad anual y amplitud estable a lo largo del periodo, superpuesta a una tendencia de largo plazo caracterizada por un ascenso sostenido desde 1999 hasta aproximadamente 2006–2007, seguido de un descenso progresivo hasta 2019. La componente residual, una vez eliminadas tendencia y estacionalidad, concentra las fluctuaciones no periódicas y de corta duración, constituyendo la señal de mayor relevancia para la detección de eventos de sequía o exceso hídrico no asociados a varia-

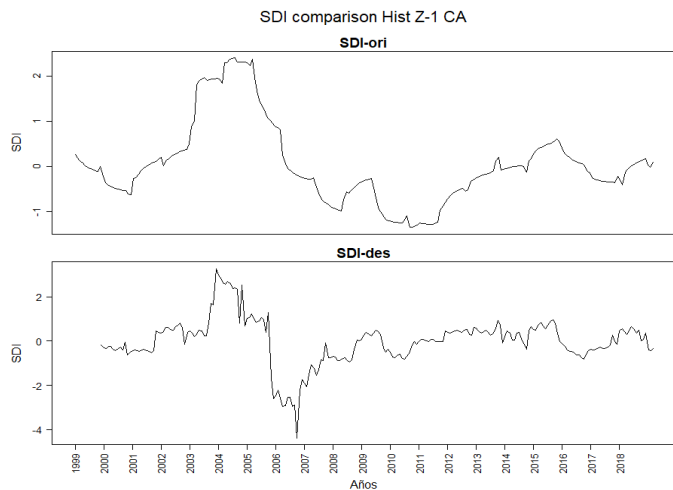


Figura 5. Comparativa de índice de sequía SDI ordinario y desestacionalizado con remoción de tendencia.

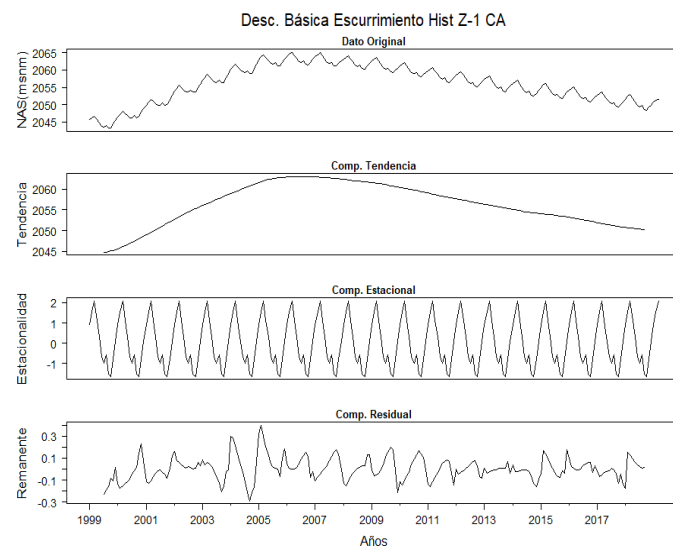


Figura 6. Descomposición de serie de niveles de agua subterránea por modelo SARIMA.

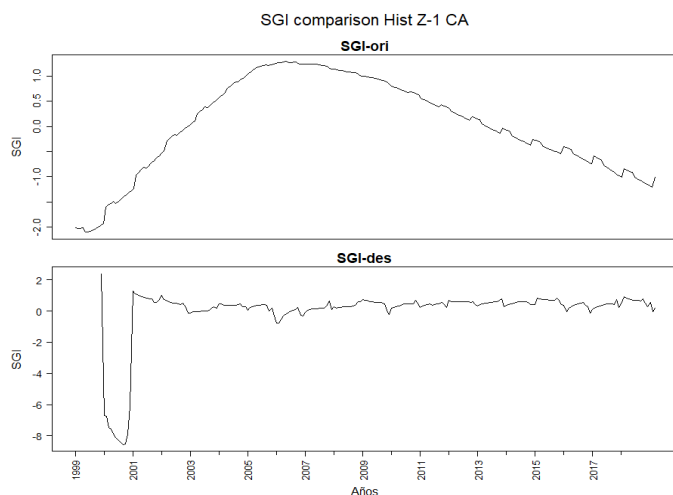


Figura 7. Descomposición de serie de niveles de agua subterránea por modelo SARIMA.

ciones climáticas regulares.

En la comparación del SGI en la **Figura 7**, el SGI-ori presenta una evolución suave y prolongada que combina el efecto de la tendencia y de la estacionalidad con las anomalías hidrológicas reales. En este caso, se observa un incremento continuo desde condiciones secas severas (≈ -2) a finales de los noventa hasta un máximo superior a $+1$ en 2006–2007, seguido por una disminución progresiva. Esta trayectoria puede inducir una interpretación de sequías y humedades prolongadas que, en parte, responden a variaciones de largo plazo o a la oscilación estacional, más que a eventos anómalos puntuales.

Por el contrario, el SGI-des presenta una serie centrada en torno a cero, con oscilaciones más cortas y amplitudes controladas, representando de forma más precisa las desviaciones respecto a la media histórica una vez eliminados los efectos sistemáticos. Se identifica un pico extremo negativo al inicio del periodo, atribuible a valores atípicos o a ajustes iniciales del filtrado, seguido por una variabilidad acotada que refleja únicamente la señal de anomalía hidrológica. Este comportamiento permite que la magnitud y frecuencia de los eventos detectados sea consistente con la definición estadística de sequía, evitando la confusión entre variaciones estacionales recurrentes y eventos extremos genuinos.

Discusión y conclusiones

Los resultados obtenidos confirman que la aplicación de procesos de desestacionalización y remoción de tendencia mediante modelos SARIMA permite una mejora sustancial en la detección y caracterización de sequías a través de los índices SPI, SDI y SGI. En todos los casos, la eliminación de patrones estacionales y tendencias sistemáticas generó series residuales centradas en torno a cero y con oscilaciones de corta duración, lo que favoreció la identificación de anomalías hidrológicas genuinas.

En el caso del SPI, la versión desestacionalizada (SPI-des) presentó una mayor claridad para aislar eventos secos o húmedos de corta duración, evitando la sobreestimación o subestimación inducida por la estacionalidad anual. Este comportamiento coincide con lo reportado por Vicente-Serrano *et al.* (2014), quienes señalan que la tendencia y la estacionalidad pueden distorsionar la magnitud y frecuencia de eventos detectados por índices climáticos. Para el SDI, la eliminación de la estacionalidad y tendencia redujo la influencia de ciclos hidrológicos prolongados, mejorando la detección de déficits severos y excedentes marcados. Esto concuerda con lo observado por Vicente-Serrano *et al.* (2012), quienes encontraron que la estandarización

sobre series ajustadas mejora la sensibilidad del índice para eventos extremos fluviales. En el SGI, el ajuste permitió evitar interpretaciones erróneas de “sequías prolongadas” derivadas de variaciones estructurales del acuífero o del ciclo estacional, un efecto similar al documentado por Bloomfield y Marchant (2013) en el análisis de niveles freáticos en acuíferos europeos.

A pesar de las mejoras observadas, se identifican algunas limitaciones, la remoción de tendencia y estacionalidad puede atenuar eventos extremos si estos coinciden con el patrón estacional, reduciendo parcialmente su magnitud aparente, a su vez la selección de parámetros en SARIMA influye directamente en la forma de la serie residual; ajustes inadecuados pueden introducir sesgos. En el caso de SGI, los picos iniciales pueden reflejar artefactos del filtrado y no necesariamente eventos reales, lo que requiere un control riguroso de calidad de datos.

La aportación relevante del estudio radica en la demostración cuantitativa y visual de que la desestacionalización y remoción de tendencia son pasos esenciales para aumentar la sensibilidad y precisión de índices de sequía en cuencas con fuerte variabilidad estacional, como la cuenca alta del río Angulo. Si bien existen estudios previos sobre el impacto de la estacionalidad en índices de sequía (Vicente-Serrano *et al.*, 2014; Stage *et al.*, 2015), este trabajo integra de forma simultánea tres tipos de variables (precipitación, escurrimiento y niveles de agua subterránea), demostrando consistencia metodológica y coherencia en los resultados obtenidos.

Este tipo de análisis podrían ser aplicados en sistemas de alerta temprana de sequías meteorológicas e hidrológicas, así como la planificación y gestión integrada de recursos hídricos en cuencas con alta dependencia del agua subterránea y en algunos otros casos en optimización de modelos de pronóstico hidrológico que utilicen índices de sequía como variables de entrada.

Es recomendable explorar el uso de técnicas de desestacionalización adaptativa, que permitan capturar cambios en la amplitud y fase del ciclo estacional asociados al cambio climático, así como la posible integración de métodos de *machine learning* para la detección automática de parámetros óptimos en SARIMA. A su vez la evaluación del impacto de estos procesos en índices combinados como el Índice de Sequía Estandarizada Multivariada (MSDI) con el fin de describir un parámetro más integral de la sequía, por otro lado, se debe considerar la extensión del análisis a escalas espaciales mayores y a diferentes contextos climáticos para validar la generalización de los resultados.

Referencias

- Bloomfield JP, Marchant BP (2013). Analysis of groundwater drought building on the standardised precipitation index approach. *Hydrology and Earth System Sciences* 17(12):4769–4787. doi:10.5194/hess-17-4769-2013
- Box GEP, Jenkins GM, Reinsel GC (2015). Time series analysis: Forecasting and control (5th ed.). Wiley. <https://www.wiley.com/en-us/Time+Series+Analysis%3A+Forecasting+and+Control%2C+5th+Edition-p-9781118675021>
- Cleveland RB, Cleveland WS, McRae JE, Terpenning I (1990). STL: A seasonal-trend decomposition procedure based on loess. *Journal of Official Statistics* 6(1):3–73. <https://www.wessa.net/download/stl.pdf>
- Comisión Nacional del Agua. (2023). Monitor de sequía en México. Servicio Meteorológico Nacional. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/monitor-de-sequia>
- Dai A (2011). Drought under global warming: A review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change* 2(1):45–65. doi:10.1002/wcc.81
- Edwards DC, McKee TB (1997). Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple time scales. Climatology Report 97-2, Colorado State University.
- Flores Fernández GC (2016). Evaluación del cambio climático en el funcionamiento hidráulico de los acuíferos Zacapu y Pastor Ortiz. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Flores-Fernández GC, García-Romero L, Sánchez-Quispe ST (2022). Assessing climate change impacts on hydrology: application to Zacapu and Pastor Ortiz aquifers (Mexico). *Journal of Water and Climate Change* 13(5):2129–2142.
- García E (2004). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. UNAM.
- Hipel KW, McLeod AI (1994). Time series modelling of water resources and environmental systems. Elsevier. ISBN: 9780080870366
- McKee TB, Doesken NJ, Kleist J (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. In Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology (pp. 179–184). American Meteorological Society. <https://climate.colostate.edu/pdfs/relationshipofdroughtfrequency.pdf>
- Magaña V, Neri C (2014). Climate change scenarios and potential impacts on water availability in northern Mexico. *Climatic Change* 125(2):179–192.
- Mishra AK, Singh VP (2010). A review of drought concepts. *Journal of Hydrology* 391(1–2):202–216. doi:10.1016/j.jhydrol.2010.07.012
- Paredes J, Solera A, Andreu J, Lerma N (2017). Herramienta EvalHid para la evaluación de recursos hídricos. Índice (1.1; p. 50). Grupo de Ingeniería de Recursos Hídricos. http://www.upv.es/aquatool/files/manuales/Manual_Tecnico_EvalHid.pdf

- Sen PK (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association* 63(324):1379–1389.
- Shepard D (1968). A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data. Proceedings of the 1968 23rd ACM National Conference, ACM 1968, 517–524. doi:[10.1145/800186.810616](https://doi.org/10.1145/800186.810616)
- Stagge JH, Tallaksen LM, Gudmundsson L, Van Loon AF, Stahl K (2015). Candidate distributions for climatological drought indices (SPI and SPEI). *International Journal of Climatology* 35(13):4027–4040. doi:[10.1002/joc.4267](https://doi.org/10.1002/joc.4267)
- Vicente-Serrano SM, Beguería S, López-Moreno JI (2010). A multi-scalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate* 23(7):1696–1718. doi: [10.1175/2010JHM1224.1](https://doi.org/10.1175/2010JHM1224.1)
- Vicente-Serrano SM, Beguería S, López-Moreno JI, Angulo M, El Kenawy A (2012). A new global 0.5° gridded dataset (1901–2006) of a multiscalar drought index: Comparison with current drought index datasets based on the Palmer drought severity index. *Journal of Hydrology* 420–421:267–285. doi:[10.1016/j.jhydrol.2011.12.018](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.12.018)
- Vicente-Serrano SM, López-Moreno JI, Beguería S, Lorenzo-Lacruz J, Azorin-Molina C, Morán-Tejeda E (2014). Evidence of increasing drought severity caused by temperature rise in southern Europe. *Environmental Research Letters* 9(4):044001.
- Wu Z, Huang NE, Long SR, Peng C-K. (2007). On the trend, detrending, and variability of nonlinear and nonstationary time series. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 104(38):14889–14894. doi:[10.1073/pnas.0701020104](https://doi.org/10.1073/pnas.0701020104)