

Análisis temporal de sequías (1922-2016) en la cuenca alta del río Nazas usando el SPI y su relación con ENSO
Temporal analysis of droughts (1922-2016) in the upper Nazas River Basin using SPI and its relationship with ENSO

Gerardo Esquivel-Arriaga¹

Julián Cerano-Paredes²

Ignacio Sánchez-Cohen³

Miguel Agustín Velásquez-Valle⁴

Francisco Flores-López⁵

Palmira Bueno-Hurtado⁶

¹Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias-Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua, Suelo, Planta, Atmósfera, Gómez Palacio, México, esquivel_ag3@hotmail.com, ORCID 0000-0002-5043-817X

²Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias-Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua, Suelo, Planta, Atmósfera, Gómez Palacio, México, cerano.julian@inifap.gob.mx, ORCID 0000-0002-1528-5139

³Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias-Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua, Suelo, Planta, Atmósfera, Gómez Palacio, México, sanchez.ignacio@inifap.gob.mx, ORCID 0000-0002-9063-7114

⁴Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, México, Campo Experimental Saltillo, Saltillo, México, velasquez.miguel@inifap.gob.mx, ORCID 0000-0001-8793-5543

⁵Stockholm Environment Institute, SEI US, Davis, United States, francisco.flores@sei-us.org

⁶Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias-Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua, Suelo,

Planta, Atmósfera, Gómez Palacio, México,
bueno.palmira@inifap.gob.mx

Autor para correspondencia: Gerardo Esquivel-Arriaga,
esquivel_ag3@hotmail.com

Resumen

El Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) permite medir la severidad de la sequía durante un periodo de tiempo determinado. El objetivo general de este trabajo fue generar series del SPI para la cuenca alta del río Nazas y analizar la influencia del fenómeno climático El Niño-Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés) en la modulación de la variabilidad del SPI. Se consideraron los datos mensuales de precipitación de 17 estaciones distribuidas en la cuenca. Se generó el SPI a escala temporal de 12 meses para las 17 estaciones; se determinó una variabilidad común para 15 de las 17 series. Se logró generar una serie regional de SPI para el periodo 1922-2016, de la cual las sequías de mayor severidad en la cuenca se registraron en las décadas de 1950 y 2000. El análisis espectral de coherencia de ondeletas entre el SPI y el índice de El Niño 3.4 indica una relación en fase para los periodos secos y lluviosos registrados en 1920-1930, 1950 y de 1980 a 2005, los cuales han sido influenciados de manera significativa ($p < 0.05$) por la ocurrencia de ENSO en periodos de 2 a 7 años, 2 a 3 años y de 10 a 14 años, respectivamente. El conocimiento de la influencia del ENSO en la modulación de la variabilidad climática a nivel de cuenca representa información esencial para implementar estrategias de manejo de los recursos hídricos y prevenir riesgos a corto plazo en las actividades destinadas a la producción de insumos.

Palabras clave: índice de sequía, severidad, hidrología, riesgo climático.

Abstract

The Standardized Precipitation Index (SPI) allows measuring the severity of the drought during a given period. The main objective of this was to generate SPI series for the upper Nazas River Basin and to analyze the ENSO (El Niño-Southern Oscillation), climatic phenomenon influence on the modulation of the SPI variability. The monthly

precipitation data of 17 stations distributed in the basin were taken into account. The SPI was generated for a 12-month time scale of the 17 stations where a common variability was determined in 15 out of the 17 series. A regional series of SPI for the period 1922-2016 was generated, in which the most severe drought in the basin was recorded in the 1950s and 2000s. The spectral coherence of waves analysis between the SPI and the El Niño 3.4 index indicates a relationship for the dry and wet periods recorded in 1920-1930, 1950 and from 1980 to 2005 with a statistically significant influence ($p < 0.05$) due to occurrence of ENSO in periods of 2 to 7 years, 2 to 3 years and 10 to 14 years, respectively. The knowledge of the ENSO influence on the modulation of the climatic variability at the basin level, represents critical information to implement water resources management strategies and to prevent short-term risks in the activities destined to the inputs' production.

Keywords: Drought index, severity, hydrology, climatic risk.

Recibido: 30/12/2017

Aceptado: 19/03/2019

Introducción

La cuenca alta del río Nazas en el estado de Durango es una de varias cuencas endorreicas que se localizan en el centro norte de México. Forma parte primordial de la región hidrológica (RH) 36 Nazas-Aguanaval, que al igual que la RH 35 y RH 37, se agrupan en la región hidrológica administrativa VII, la cual administra los recursos hídricos de las tres regiones endorreicas de México. La RH 36 se desarrolla en la vertiente oriental de la Sierra Madre Occidental (SMO) en dirección oeste-este; cuenta con una superficie de 50 493 km² y una población de 1 573 446 habitantes; 72% (1 132 881) se ubica en la parte baja de la cuenca, donde se aprovecha la totalidad de los escurrimientos provenientes de la cuenca alta del río Nazas (Estrada *et al.*, 2014).

La ubicación geográfica de la cuenca y las variaciones en los patrones atmosféricos fundamentan la necesidad de analizar variables climáticas como la precipitación, que incide con periodos húmedos o secos (sequías) y tiene un impacto en cascada hacia las partes de la cuenca donde se hace uso de los recursos hídricos. El fenómeno de sequía se origina por una disminución en la precipitación por debajo del promedio que ocurre en un área determinada y que se extiende por un amplio lapso, que puede ir desde una estación hasta de varios años, y que origina déficit en el abastecimiento del recurso hídrico para una actividad, un grupo o un sector ambiental (Campos, 2014). Cuando este fenómeno se prolonga durante una estación o por un periodo de tiempo mayor, y la precipitación es insuficiente para responder a las demandas hídricas de la sociedad y del medio ambiente, la sequía debe considerarse como un estado relativo y no absoluto (OMM, 2012).

Para su análisis, las sequías se han agrupado en diversas categorías, como meteorológicas, hidrológicas, agrícolas, de abastecimiento hídrico y subterráneas, las cuales hacen referencia tanto al momento en que se observa un déficit en la precipitación como en el lapso para la percepción de los efectos de éste por los diferentes sectores (Pereira, Cordery, & Iacovides, 2009). Entre los índices disponibles, el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI, por sus siglas en inglés) es el más apropiado para monitorear tal tipo de sequías (McKee, Doesken, & Kleist, 1993), porque permite comparar de manera objetiva condiciones secas y húmedas en regiones con diferentes regímenes hidrológicos. El SPI es un índice estandarizado y multi-escalar ampliamente usado en estudios de caracterización de sequías en cuencas hidrológicas (Heim, 2002).

Varios estudios han analizado la evolución espacio temporal del SPI a diferentes escalas de tiempo para diversos países y regiones, como Turquía, China y Europa (Sönmez, Kömüscü, Erkan, & Turgu, 2005; Vicente-Serrano, 2006; Zhai *et al.*, 2010; Bonaccorso, Peres, Cancelliere, & Rossi, 2013). Otros trabajos han identificado tendencias y periodicidades de eventos secos y húmedos en series temporales mediante índices secos/húmedos en otras regiones del mundo (Bordi, Fraedrich, & Sutera, 2009; Raziei, Bordi, Pereira, & Sutera, 2010; Santos, Pulido-Calvo, & Portela, 2010; Fischer, Gemmer, Su, & Scholten, 2013; Telesca, Vicente-Serrano, & López, 2013). Por otro lado, varios estudios han utilizado el SPI para analizar eventos húmedos y secos, analizando la relación con índices climáticos, entre ellos El Niño-Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés) (Siggdel e

Ikeda, 2010; Paredes, Barbosa, & Guevara, 2015; Raziei *et al.*, 2014; Biabanaki *et al.*, 2014). El Niño se refiere al excepcional calentamiento del mar en el Pacífico tropical, que está vinculado con grandes cambios en la atmósfera a través del fenómeno conocido como Oscilación del Sur (SO), por lo que el fenómeno es llamado ENSO por los científicos (Trenberth, 2013).

En México, Escobar, González, Sánchez, Muñoz y Villa (2012) estimaron el SPI a una escala temporal de tres meses para la estación Sardinias, ubicada en la cuenca alta del río Nazas. Reportan que la intensidad de los eventos de humedad y de sequía excesivas tiende a incrementarse en los años recientes probablemente por la influencia de ENSO. Castillo, Ibañez, Valdés, Arteaga y Vázquez (2017), y Serrano, Vicente, Flores, Tijerina y Vázquez (2016) utilizaron el SPI desde un enfoque de cuenca, incorporando el Índice de Precipitación-Evapotranspiración Estandarizada (SPEI, por sus siglas en inglés), el cual incluye, además de la variable precipitación, la variable temperatura, y demostró una clara tendencia del incremento en el número, intensidad, severidad y duración de las sequías. Sin embargo, a pesar de los pocos trabajos desarrollados en el país sobre la generación del SPI, éstos se enfocan en obtener directamente los índices de sequía; no se realiza un análisis de la variabilidad común entre estaciones que permita generar un SPI regional y se carece de un análisis de la influencia de fenómenos atmosféricos que pudieran incidir en la variabilidad del SPI en el nivel de cuenca; por lo tanto, el objetivo general de este trabajo fue generar series del SPI para la cuenca alta del río Nazas y analizar la influencia del fenómeno climático ENSO en la modulación de la variabilidad del Índice Estandarizado de Precipitación.

Materiales y métodos

Área de estudio

La cuenca alta del río Nazas se encuentra al centro-noroeste del estado de Durango, en el norte de México. La cuenca es una de las más importantes dentro de la RH 36 tanto por su gran extensión superficial como por los volúmenes de escurrimiento que se generan. La cuenca es de tipo endorreica, con una extensión de 18 321 km² (INEGI, 2017). La cuenca comprende los ríos Ramos (conformado por los afluentes de los ríos Tepehuanes y Santiago), y del Oro o Sextín; sus escurrimientos superficiales son almacenados en la presa Lázaro Cárdenas. El punto más elevado en la cuenca es de 3 300 msnm y el punto más bajo de 1 400 msnm (Figura 1).

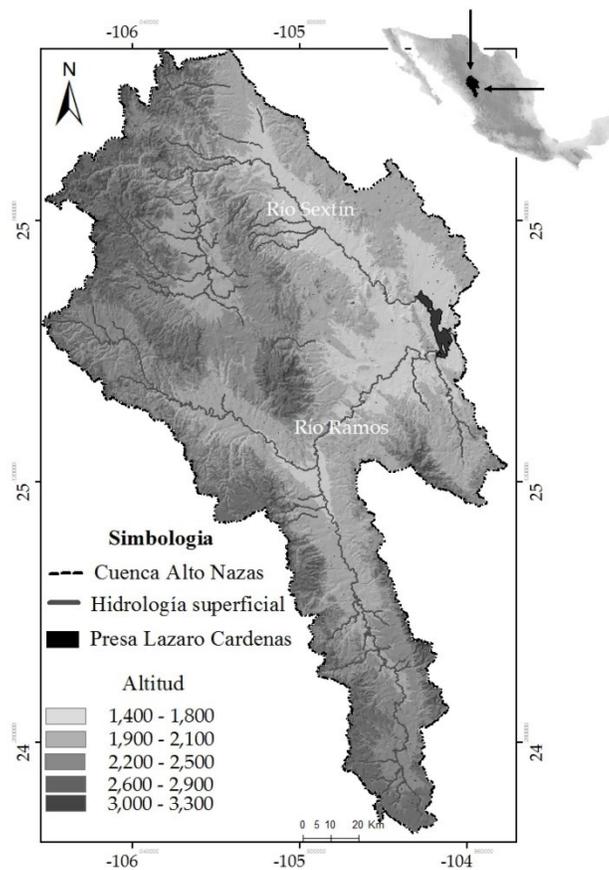


Figura 1. Ubicación geográfica de la cuenca alta del río Nazas en el noroeste de México.

Datos de precipitación

Las estaciones climatológicas presentes en la cuenca y en un área adicional de influencia de 20 km en relación a parteaguas fueron consideradas. Se identificó un total de 37 estaciones: 22 dentro de la cuenca y 15 fuera de ella. Se seleccionaron las estaciones que cumplieron con las siguientes características: al menos 30 años de información, no más de 10 % de información faltante en su registro histórico y que no hayan dejado de operar antes del año 2005. Para determinar la calidad de la información, se realizó un análisis exploratorio gráfico, así como pruebas de homogeneidad de varianzas. Finalmente, se seleccionaron 17 estaciones climatológicas que cumplieron con los criterios de selección (Tabla 1).

Tabla 1. Estaciones climatológicas analizadas.

Núm.	Estación	Altitud (msnm)	Precipitación media anual (mm)	Latitud	Longitud	Periodo disponible de información
1	Santiago Papasquiaro	1 716	553	-105.433	25.033	1922-2016
2	Guanaceví	2 300	629	-105.952	25.933	1922-2016
3	El Palmito	1 600	370	-105.004	25.614	1941-2016
4	Cendradillas	2 500	617	-106.017	26.300	1961-2014
5	Chinacates	2 040	427	-105.067	25.017	1963-2014
6	Otinapa	2 400	669	-105.017	24.083	1963-2013
7	Rosario	1 790	457	-105.650	26.600	1963-2008
8	El Tarahumar	2 435	926	-106.324	25.617	1964-2009
9	Navíos Viejos	2 492	786	-105.05	23.833	1964-2014
10	Ciénega de Escobar	2 144	559	-105.746	25.601	1965-2008
11	Santa María del Oro	1 700	564	-105.367	25.953	1967-2016
12	Tejamen	1 980	691	-105.133	24.800	1969-2014
13	Sardinas	1 639	503	-105.566	26.084	1970-2016
14	Los Altares	2 490	827	-105.867	25.000	1973-2016
15	San Bernardo	1 700	575	-105.527	26.004	1976-2008

16	General Escobedo	1 580	476	-105.250	25.500	1979-2016
17	Inde	1 900	357	-105.220	25.576	1979-2009

Los datos mensuales de precipitación para cada estación se obtuvieron de la red de estaciones climatológicas del Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2017) e información actualizada proporcionada por el organismo de cuenca Cuencas Centrales del Norte de la Comisión Nacional del Agua (Conagua). Las series de datos que presentaron ausencia de registros mensuales de precipitación durante el periodo de estudio fueron calculadas por el método del *US National Weather Service* (MWS), el cual ha sido utilizado de forma satisfactoria en este tipo de estimaciones (Toro, Arteaga, Vázquez, & Ibáñez, 2015).

Índice estandarizado de precipitación

Para el cálculo del SPI se consideró la metodología descrita por McKee *et al.* (1993) y se utilizó el *software SPI SL 6.exe* de distribución gratuita (NDMC, 2017). Con este *software* se calculó el SPI para las 17 estaciones de la cuenca a una escala temporal de 12 meses. Acorde con la Organización Meteorológica Mundial (OMM), el SPI de 12 y 24 meses refleja los patrones de precipitación a largo plazo y permite identificar con claridad los periodos de sequía. Así, por ejemplo, la escala temporal de 12 meses representa el comportamiento de la precipitación acumulada en el mes de interés y durante los 11 meses anteriores a éste (Ortega, 2012). Dado que estas escalas temporales son el resultado acumulado de periodos más cortos que pueden estar por encima o por debajo de lo normal, el SPI a más largo plazo tiende a situarse en torno a cero, a menos que se esté produciendo una tendencia húmeda o seca característica. Un SPI de tres meses se relaciona con las condiciones de humedad del suelo, y los de 6, 12 y 24 meses con cauces fluviales, niveles de reservorios e incluso niveles de aguas subterráneas a escalas temporales más largas (OMM, 2012). La categorización del SPI se realizó de acuerdo con la clasificación de la OMM (2012) (Tabla 2).

Tabla 2. Clasificación de los valores del SPI.

Valor del SPI	Categoría
2.0 o más	Extremadamente húmedo
1.50 a 1.99	Muy húmedo
1.0 a 1.49	Moderadamente húmedo
-0.99 a 0.99	Normal o aproximadamente normal
-1.0 a -1.49	Moderadamente seco
-1.5 a -1.99	Severamente seco
-2-0 o menos	Extremadamente seco

Variabilidad de las series del SPI

Para determinar la co-variabilidad de los patrones húmedos y secos en la cuenca, se realizó un análisis de correlación ($p < 0.01$) y se corrió un análisis de componentes principales (ACP) para las 17 series de SPI de 12 meses; se consideró el periodo común entre estaciones, que corresponde de 1980 a 2008 (29 años). Este análisis permitió determinar el porcentaje de variabilidad común entre las estaciones e integrar un SPI regional, el cual se obtuvo al promediar los valores del SPI de las estaciones analizadas en orden cronológico.

Influencia del ENSO en la variabilidad del SPI

Para analizar el impacto del fenómeno atmosférico circulatorio ENSO en la variabilidad climática de la cuenca alta del río Nazas, se relacionó el SPI regional (1922-2016) con el índice Niño 3.4 reconstruido a partir de 2 222 cronologías de anillos de árboles generadas en el orbe (Li *et al.*, 2013). Para tal efecto se emplearon gráficos de resolución anual y sus

espectros potenciales de ondeleta mediante el *software MATLAB 6.5* (MathWorks, 2002).

Resultados y discusión

Variabilidad de la precipitación en la cuenca

Los valores medios de precipitación total anual en la cuenca alta del río Nazas oscilan entre 350 y 900 mm/año (Figura 2). Las estaciones con los regímenes pluviales más altos corresponden a la estación El Tarahumar (8), que se ubica a 2 435 msnm; Navíos Viejos (9), ubicada a 2 492 msnm, y Los Altares (14), las cuales corresponden a la vertiente oeste de la cuenca, en el área de influencia adicional considerado. De forma general, los valores de precipitación media anual en las estaciones decrecen conforme se alejan del océano Pacífico y se adentran en el altiplano mexicano, esto se puede denotar en las estaciones El Palmito (3), General Escobedo (16) e Indé (17), que se localizan en las áreas más bajas del área de estudio y registran los valores más bajos de precipitación en la cuenca (Figura 2).

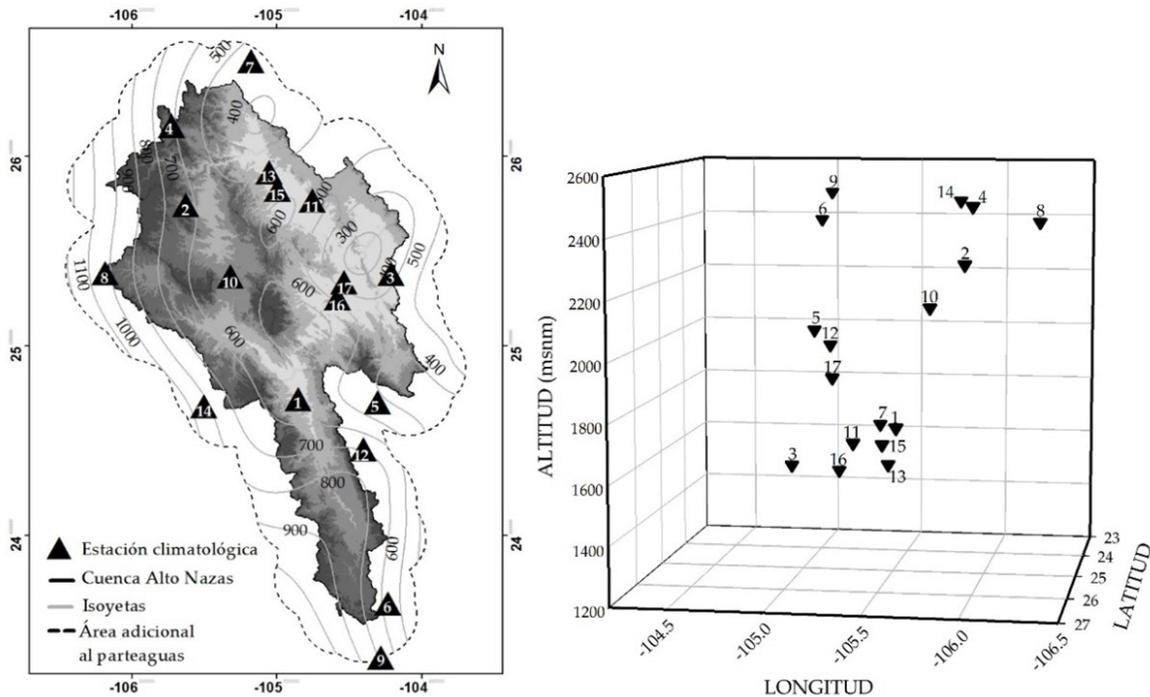


Figura 2. Precipitación media anual de la cuenca alta del río Nazas (izquierda), y esquematización de la distribución espacial de las estaciones y su gradiente altitudinal (derecha).

Estos resultados denotan una disminución regular de las precipitaciones desde el parteaguas hacia las partes bajas de la cuenca, y coinciden con Descroix, González y Estrada (2004), los cuales mencionan que existe una clara oposición respecto a la variabilidad de la precipitación entre las vertientes este (mayoría de las estaciones) y oeste (estaciones 8, 9 y 14) de la SMO; la vertiente oeste se beneficia claramente de una mayor precipitación, aunque también presenta mayor variabilidad espacial; esto se puede observar en la estación El Tarahumar (8), la cual de las 17 estaciones analizadas es la que presenta valores extremos (Figura 3) marcados como consecuencias de un relieve extremadamente escarpado.

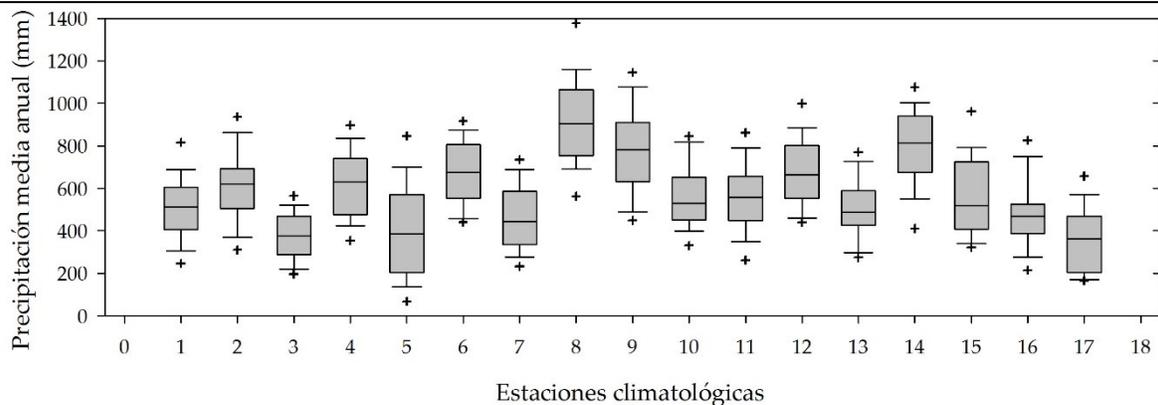


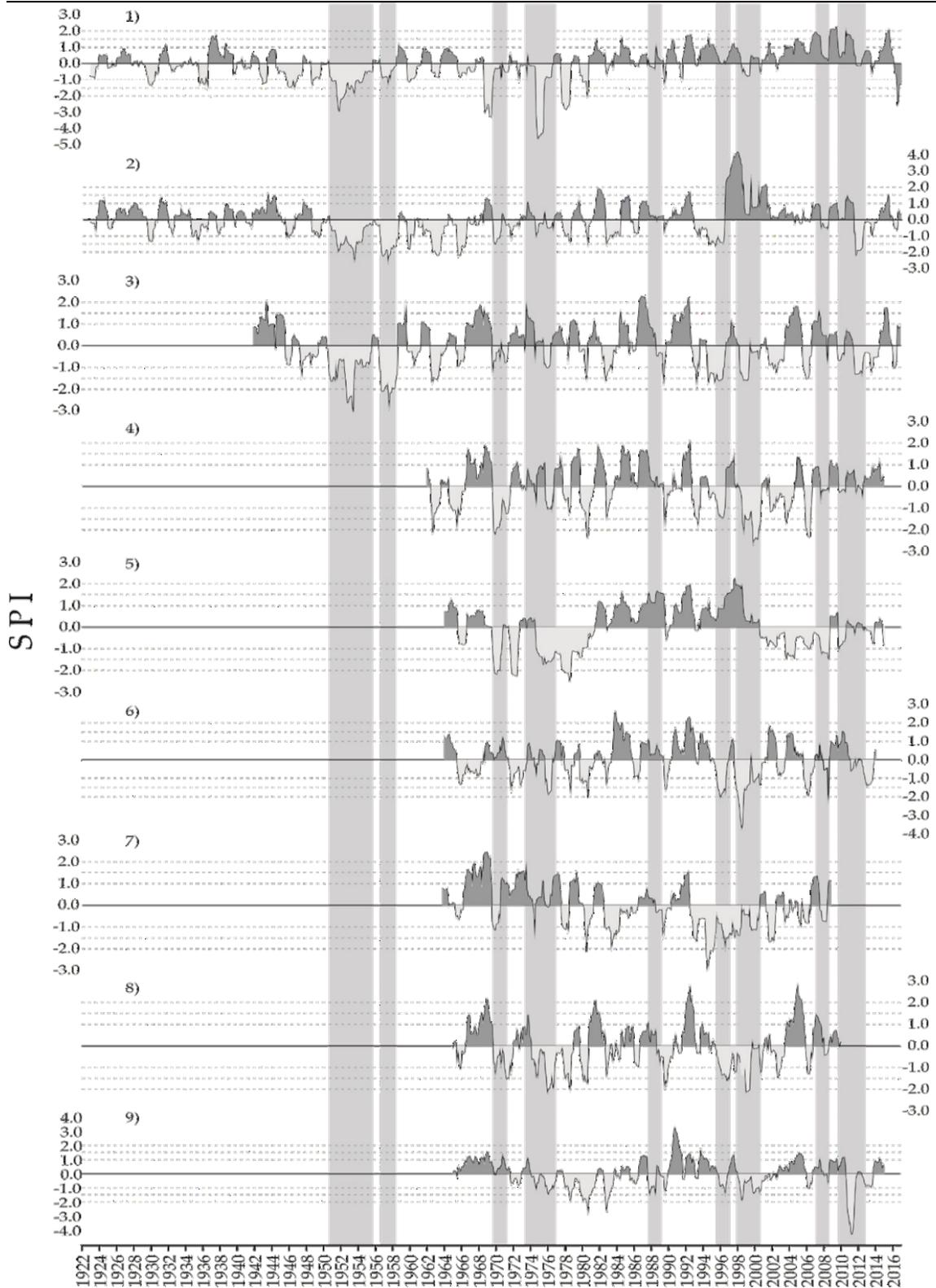
Figura 3. Diagrama de cajas de la precipitación media anual para cada estación climatológica. Se señalan los valores correspondientes a la mediana con una línea horizontal en color negro al centro; las desviaciones estándar con líneas horizontales a los extremos y las cruces indican valores extremos o anómalos.

Siempre es confuso tratar de buscar factores locales que expliquen la repartición espacial de las precipitaciones. Sin embargo, la primera apreciación con respecto a las isoyetas que muestra la Figura 2 permite comprender el rol primordial de la altitud y de la distancia al océano en la distribución de la cantidad de lluvia, como lo señalan Descroix *et al.* (2004) y Velásquez *et al.* (2013). De hecho, de manera paradójica, este rol es más evidente para la vertiente interior (oriental) de la SMO; mientras que para la vertiente del Pacífico, la evolución es inevitablemente más compleja por la simple razón de que la altitud aumenta con el distanciamiento de la costa, haciendo que ambos factores se contrapongan (Descroix *et al.*, 2004).

Índice estandarizado de precipitación

Se generó el SPI a escala temporal de 12 meses para las 17 estaciones climatológicas (Figura 4). Las estaciones Santiago Papasquiario (1) y Guanaceví (2) representan el registro de datos más extenso, que corresponde al periodo de 1922 a 2016. Ambas estaciones presentan la

misma tendencia de eventos moderados de sequía para las décadas de 1920 a 1940. La estación El Palmito (3), que inicia su operación a inicios del año 1942, representa la tercera serie, con registros más extensos (1941-2016). La primera sequía severa acorde con el índice SPI (Tabla 2) se registra en la década de 1950 y se observa en las tres estaciones (Figura 4). La estación 2 se localiza en la parte alta de la cuenca (2 181 msnm); la estación 1 en la parte media (1 822 msnm), y la estación 3 en la parte baja (1 545 msnm), por lo que se infiere que el impacto de esta sequía afectó toda la cuenca de estudio. La estación 3 en la parte baja registró el valor más bajo de SPI (-3.21) para el año de 1953 (Figura 4).



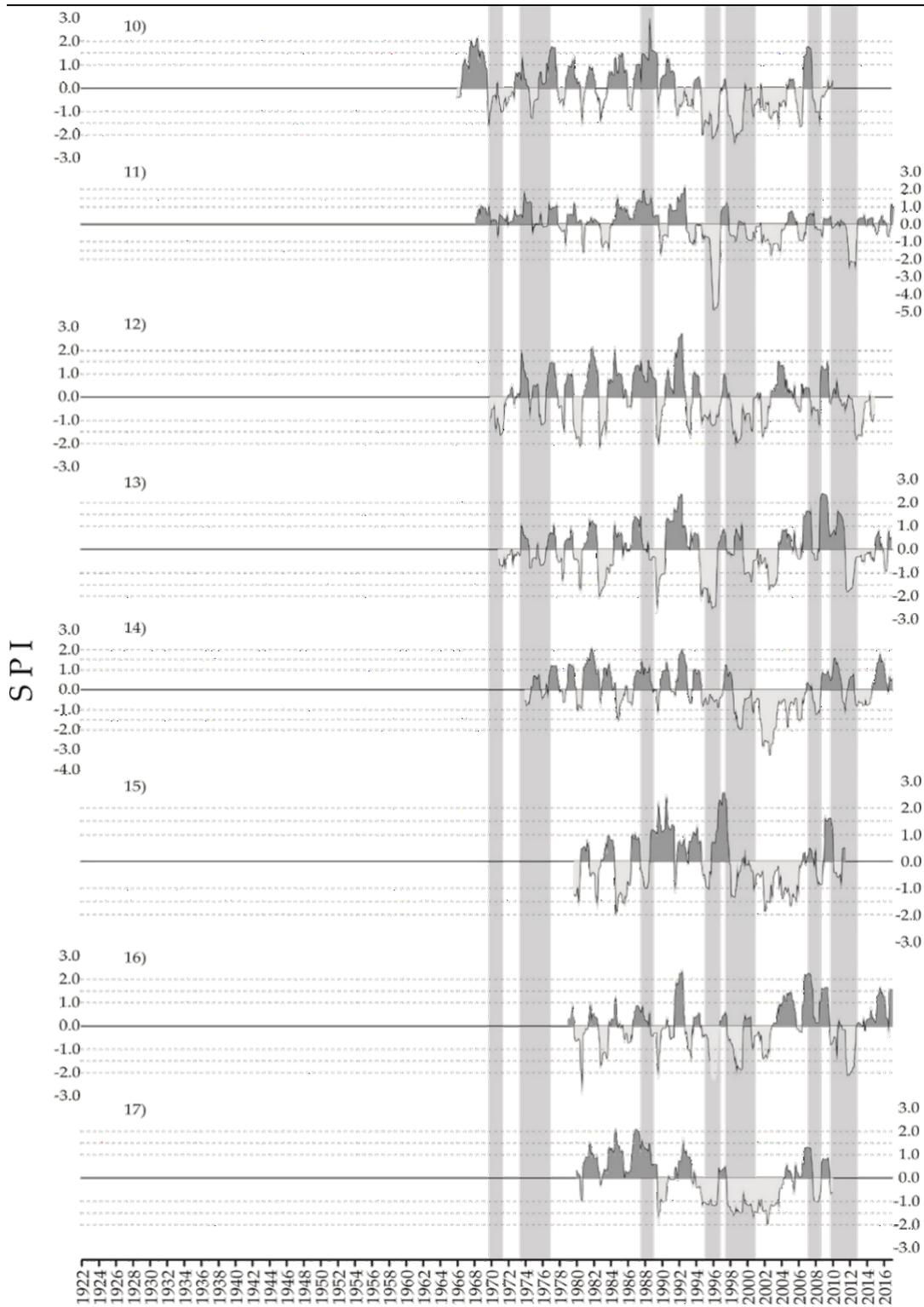


Figura 4. Serie del SPI a escala de 12 meses que indican las sequías registradas en las estaciones climáticas de la cuenca alta del Río Nazas. El área sombreada en gris claro denota sequías y en color gris oscuro periodos húmedos. Las barras verticales en color gris muestran la sincronía de eventos de sequía.

El segundo acontecimiento de sequía considerado desde moderado a extremadamente seco corresponde al periodo 1974-1976, el cual se presenta en 14 de las 17 estaciones analizadas; las tres estaciones restantes aún no operaban, por lo cual no se tiene el registro (Figura 4). La estación Santiago Papasquiaro (1) es la que registra el valor más bajo de SPI en el año 1974 de -4.62. Asimismo, otro acontecimiento severo se identificó en el periodo 1988-1991, el cual se registró en 16 de las 17 estaciones analizadas (Figura 4).

Escobar *et al.* (2012) generaron la estimación del SPI a una escala temporal de tres meses para la estación Sardinias (13), considerada en este análisis; realizaron una clasificación de las sequías por periodos de cinco años; sus resultados indican que la mayor frecuencia de sequías moderadas fue en el periodo 1996-2000; sequías severas en el lapso de 1976 a 1980, y sequías extremas en el periodo de 1991-1995. Los resultados obtenidos a escala anual en este trabajo indican la primera sequía a inicios de 1970 y severa para los periodos 1988-1991 y 1994-1996. Cabe mencionar que a una escala de tres meses, los valores de SPI fluctúan con rapidez entre valores negativos y positivos debido a que el periodo en que las variables son tomadas en cuenta es muy corto, por lo tanto los cambios son asimilados a mayor velocidad, por ende, escalas más largas reflejan un patrón de precipitación más extenso (Castillo *et al.*, 2017). Esto se verifica al comparar los eventos obtenidos por Escobar *et al.* (2012) para la categoría de sequías extremas, la cual arrojó una frecuencia de 10 eventos, mientras que a una escala anual se redujo a tres eventos.

Estudios paleoclimáticos basados en los anillos de crecimiento de coníferas en la parte alta de la cuenca del Nazas lograron reconstruir la variabilidad de la precipitación para el periodo 1599-2008 (Cerano *et al.*, 2012). La reconstrucción para estos cuatro siglos determinó la presencia de sequías severas, de las cuales la sequía de la década de 1950 representa una de las más severas, con impactos importantes desde el punto de vista hidrológico y social. De igual forma, Sthale *et al.* (2009) señalan que la amplia y persistente sequía sobre el noroeste de México

comenzó en la década de 1990 y se mantuvo hasta 2009, la cual fue generalizada en la mayor parte del país; ello se replica en las estaciones meteorológicas con la serie de datos más reciente.

Recientemente Hace poco se han analizado sequías considerando el SPI en otras cuencas. Por ejemplo, Castillo *et al.* (2017) calcularon el SPI a diferentes escalas temporales para la cuenca del río Fuerte al noroeste de México para el periodo de 1961-2012. Para esta cuenca, los valores del SPI oscilaron entre -2.0 y 2.5, y los periodos de sequía moderada son más frecuentes al final de la serie. Las escalas de 3 y 6 meses presentaron eventos de sequía de moderada a extrema, de corta y mediana duración; en cambio, a escala de 12 y 24 meses, presentaron sequías moderadas y severas, con una duración de hasta 61 meses. Para una cuenca en el Pacífico norte de México, para el periodo 1961-2010, se estimó el SPI y el SPEI, encontrando que los principales episodios de sequía se registraron en la década de 1980 y 2000; en el año de 1982 se registra el episodio de mayor intensidad, aunque el episodio de 2003 presentó una duración y magnitud superior (Serrano *et al.*, 2016). Esta variabilidad en el SPI y sincronía de las sequías en diferentes cuencas del país muestra una variabilidad climática similar a escalas geográficas extensas, eventos extremos que pueden estar modulados por fenómenos climáticos de circulación general.

Variabilidad de las series del SPI

El ACP determinó que de 17 estaciones analizadas, 15 estaciones se agrupan en el PC1 (Figura 5), el PC1 explica 49.60% de la variabilidad. Se determinó una correlación significativa ($p < 0.01$) entre las 15 estaciones, por lo que existe una variación común de la precipitación para 88.2% de las estaciones. Al encontrar una variabilidad común entre estaciones, se promediaron los valores del SPI de las estaciones analizadas en orden cronológico y se generó una serie de SPI regional (1922-2016) para la cuenca alta del río Nazas (Figura 6).

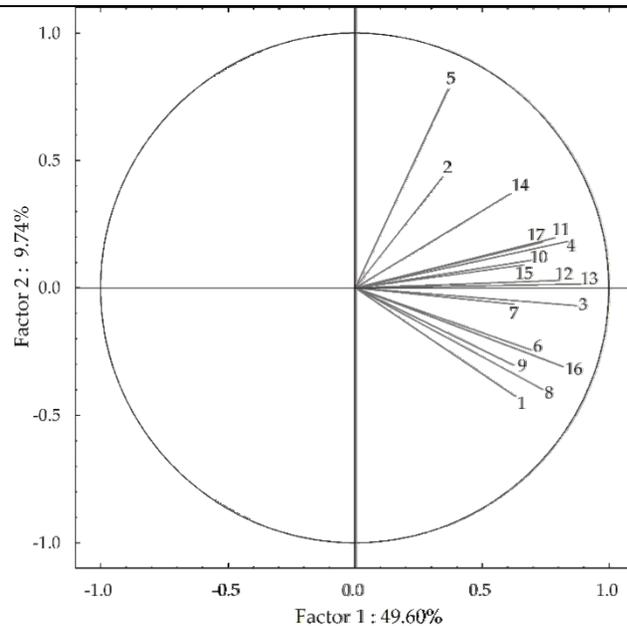


Figura 5. Análisis de componentes principales (APC), que indica una variabilidad común para la mayoría de las estaciones analizadas (15 de 17 estaciones). Los números corresponden a la estación climatológica presentadas en la Tabla 2.

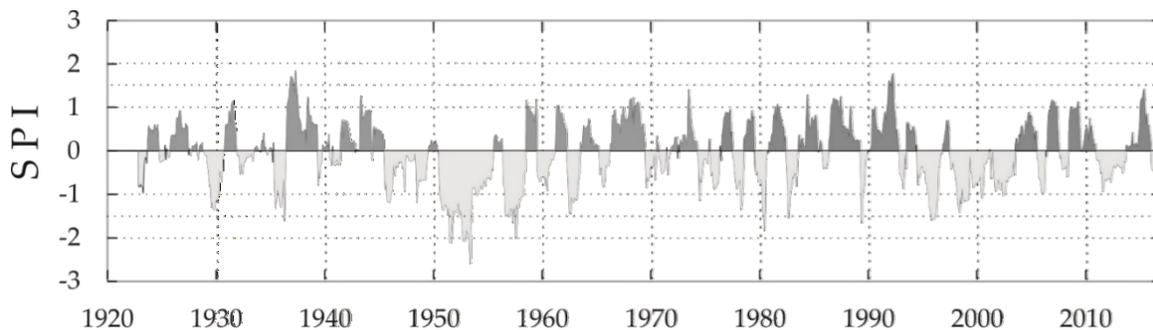


Figura 6. Índice Estandarizado de Precipitación regional (1922-2016) para la cuenca alta del río Nazas.

El SPI regional muestra los principales eventos secos y húmedos que se han presentado en la cuenca alta del río Nazas en las últimas nueve décadas. Las sequías en la categoría de moderadas a severas se presentan a partir de la década de 1950 (Figura 7). Sin embargo, este evento no puede ser comparado con los resultados obtenidos por Castillo *et al.* (2017) y Serrano *et al.* (2016), pues su análisis inicia en la

década de 1960. Los lapsos con mayor duración de sequías para la cuenca se registraron en agosto de 1945, extendiéndose hasta agosto de 1949 (49 meses), retornando una extensa sequía que inicia en agosto de 1950 y se prolonga progresivamente hasta agosto de 1955 (61 meses); por último, en septiembre de 1956 se presenta una disminución de la precipitación que se extiende hasta agosto de 1958.

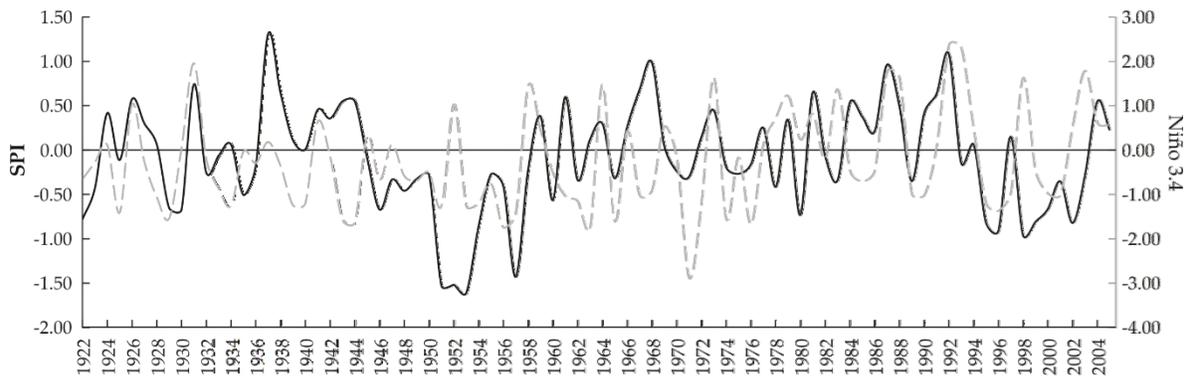


Figura 7. Relación entre el SPI regional (línea continua) y eventos extremos del índice Niño 3.4 (línea discontinua).

Los resultados obtenidos por Cerano *et al.* (2012) en una reconstrucción de la precipitación para la parte alta del Nazas documentan los mismos eventos de disminución de la lluvia en la década de 1950. El segundo periodo de sequía con mayor extensión fue a finales de 1990, específicamente en el año 1997, sequía que se extendió por 43 meses, finalizando en el primer trimestre del año 2001. Trabajos dendroclimáticos para esta región del estado de Durango han reportado este intervalo de fuerte disminución en la precipitación (Cerano, Villanueva, Valdez, Arreola, & Constante, 2011; Chávez *et al.*, 2017). El evento de sequía más reciente se registra en el periodo 2011-2013, con una duración de 33 meses; estos resultados sincronizan fielmente con lo reportado por Chávez *et al.* (2017), quienes documentan una fuerte disminución de la precipitación para el periodo 2011-2017.

Influencia del ENSO en la variabilidad del SPI

La relación entre el SPI regional anual y el índice Niño 3.4 presenta un coeficiente de correlación de $r = 0.27$ ($p < 0.05$). Para periodos específicos como 1922 y hasta finales de la década de 1940, de 1953 a 1960, y de 1980 al 2004 se observa una tendencia similar. Entre los años que no muestran sincronía sobresalen 1952, 1967 y 1983 (Figura 7). Los registros de ENSO de 1950-2016 reportan eventos La Niña y El Niño de diferente intensidad (NOAA, 2016). Los índices positivos y negativos para los periodos de 1953-1960, década de 1970, y de 1980-2004 sincronizan con eventos ENSO en su fase El Niño y La Niña, respectivamente.

Un análisis espectral del SPI anual y los índices del Niño 3.4 determinó que el espectro de ondeleta para el SPI mostrara áreas significativas ($p < 0.05$), que corresponden a 1 y 2 años para los periodos 1932-1935, 1957-1962, 1979-1983, y de 25 a 30 años para 1938-1988 (Figura 8a). El espectro del Niño 3.4 registra una frecuencia irregular de 1 a 7 años para los periodos de 1930-1935, 1964-1967, 1969-1973 y 1983-2005 (Figura 8b). El análisis de coherencia de ondeletas determinó una relación en fase significativa ($p < 0.05$) entre el SPI y el Niño 3.4 durante el periodo 1922-1928, a frecuencias de 2 y 3 años; de 1922-1935 a 6 y 7 años; de 1956-1962 a 2 y 3 años; de 1980-200 a 4 y 7 años, y de 1991 a la fecha en frecuencias de 10 y 14 años (Figura 8c). Existe una relación de fase entre ambos índices; los intervalos secos y lluviosos registrados en 1920-1930, 1950, 1970 y de 1980 a 2005 han sido influenciados de manera significativa por la ocurrencia de ENSO en periodos de 2 a 7 años, 2 a 3 años, 4 a 5 años y de 10 a 14 años, respectivamente.

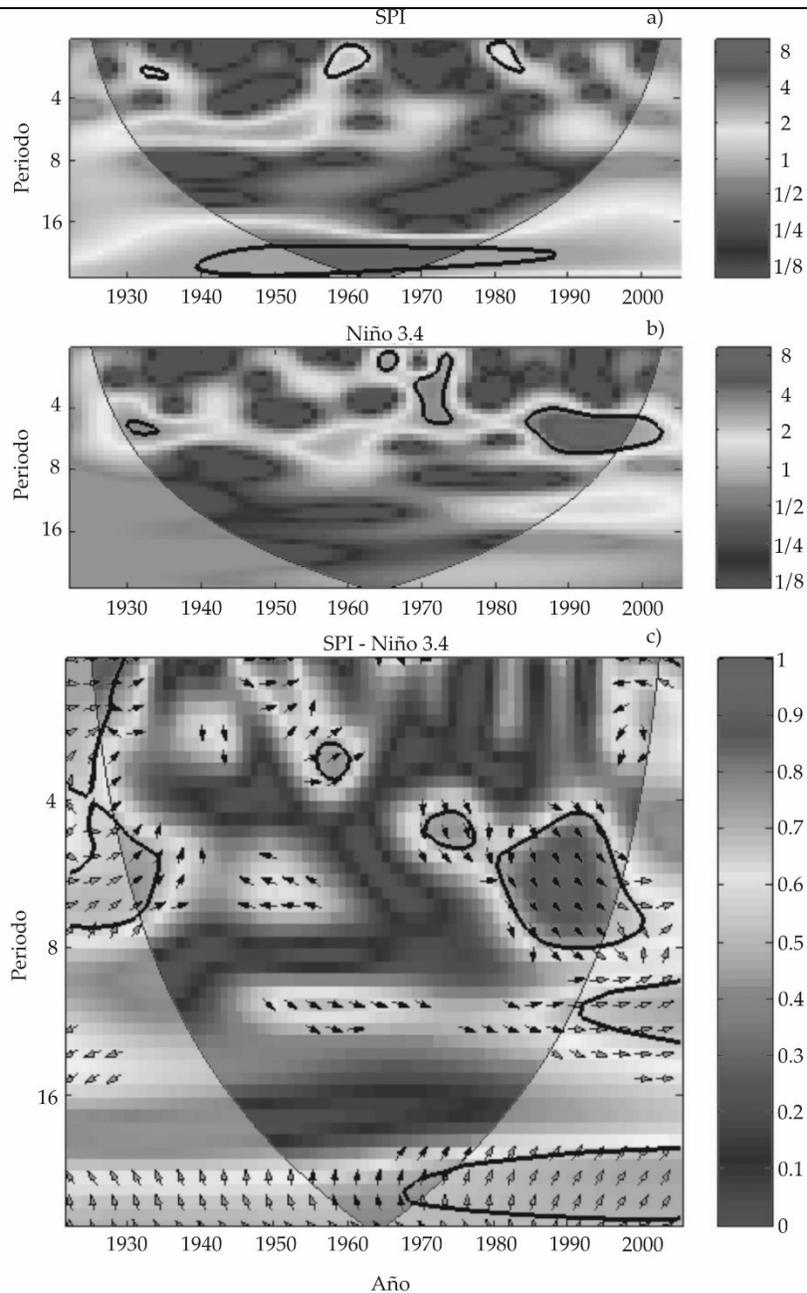


Figura 8. Análisis de coherencia de ondeletas entre SPI y ENSO. Las manchas más intensas (gris a negro) delimitadas por una línea continua indican la presencia de una relación significativa ($p < 0.05$) entre ambas variables. Las flechas horizontales hacia la derecha señalan que ambos fenómenos están en fase o que presentan una relación positiva; por el contrario, las flechas hacia la izquierda denotan antifase o relación

negativa, y las flechas en orientación vertical muestran que las variables están desfasadas.

La variabilidad del clima en el norte de México es modulada en gran medida por la señal de ENSO tanto en su fase La Niña como El Niño (Sthale & Cleaveland, 1993; Magaña, Pérez, Vázquez, Carrizosa, & Pérez, 2009). La reconstrucción de la variabilidad de la precipitación para los últimos 400 años en la parte alta de la cuenca del Nazas con base en series dendroclimáticas documentó una influencia significativa del ENSO en la modulación de la variabilidad de la precipitación, incrementos de la precipitación en la fase El Niño y fuertes sequías en la fase La Niña (Cerano *et al.*, 2011).

Otros estudios a nivel global analizan la influencia de ENSO en la precipitación mediante el uso del SPI, por ejemplo, Sigdel e Ikeda (2010) caracterizaron las sequías usando el SPI para Nepal a escalas temporales de 3 y 12 meses, analizando la conexión entre el SPI y los índices climáticos *Southern Oscillation Index* (SOI) e *Indian Ocean Dipole Mode Index* (DMI), y concluyen que una de las causas de las sequías de verano es El Niño, mientras que las sequías invernales podrían ser relacionadas positivamente con DMI. Por su parte, Lovino, García y Baethgenc (2014) relacionaron los valores de SPI obtenidos para la región noreste de Argentina, encontrando sincronía con los eventos La Niña. Sarricolea y Meseguer (2015) efectuaron la caracterización de las sequías en Chile central y las asociaron con el índice El Niño 3.4; los resultados fueron significativos ($p < 0.05$), mostrando una relación directa entre la presencia de El Niño con lluvias abundantes y sequías con La Niña.

La parte alta de la cuenca del río Nazas provee los escurrimientos que son almacenados en la presa Lázaro Cárdenas y la derivación aguas abajo a la presa Francisco Zarco; este complejo de presas da vida a la parte baja de la cuenca denominada Comarca Lagunera. El conocimiento de la influencia de fenómenos climáticos de circulación general como ENSO en la modulación de la variabilidad climática a escala regional representa información esencial para implementar mejores estrategias de manejo de los recursos hídricos y prevenir a corto plazo riesgos en las actividades agrícolas.

Conclusiones

Se logró generar una serie regional de SPI para el periodo 1922-2016 para la parte alta de la cuenca del río Nazas a una escala temporal de 12 meses. Los eventos de sequías más severas y de mayor magnitud se registraron en las décadas de 1950, 2000 y 2010; y sequías moderadas en las décadas de 1970 y 1980. Un análisis espectral de coherencia de ondeletas determinó una relación significativa entre la variabilidad del SPI y el ENSO, años con índices negativos extremos relacionados con La Niña e índices con valores positivos más altos relacionados con El Niño. En las últimas nueve décadas se observa una modulación importante del SPI por ENSO. Se recomienda en futuros trabajos analizar la influencia del PDO y el monzón en la parte alta de la cuenca del Nazas, fenómenos que pudieran estar influyendo en la variabilidad de los recursos hídricos de esta importante región, que permitan dilucidar cuál sería el patrón óptimo de cultivos que maximice la productividad del agua utilizada para riego en estas áreas en el país.

Agradecimientos

Un reconocimiento al organismo de cuenca Cuencas Centrales del Norte de la Comisión Nacional del Agua por las facilidades otorgadas en la actualización de los datos climáticos de las estaciones climatológicas consideradas en este estudio.

Referencias

- Biabanaki, M., Eslamian S. S., Koupai, J. A., Cañón, J., Boni, G., & Gheysari, M. (2014). A principal components/singular spectrum analysis approach to ENSO and PDO influences on rainfall in western Iran. *Hydrology Research*, 45(2), 250-262. DOI: 10.2166/nh.2013.166
- Bonaccorso, B., Peres, D. L., Cancelliere, A., & Rossi, G. (2013). Large-scale probabilistic drought characterization over Europe. *Water Resources Management*, 27, 1675-1692.

- Bordi, I., Fraedrich, F., & Sutera, A. (2009). Observed drought and wetness trends in Europe: An update. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13, 1519-1530.
- Campos, D. F. (2014). Comparación de tres métodos estadísticos para detección y monitoreo de sequías meteorológicas. *Agrociencia*, 48, 463-476.
- Castillo, C. M., Ibañez, C. L. A., Valdés J. B., Arteaga R. R., & Vázquez, P. M. A. (2017). Análisis de sequías meteorológicas en la cuenca del Río Fuerte, México. *Tecnología y ciencias del agua*, 8(1), 35-52.
- Cerano, P. J., Villanueva, D. J., Valdez, C. R. D., Arreola, A. J. G., & Constante, G. V. (2011). El Niño Oscilación del Sur y sus efectos en la precipitación en la parte alta de la cuenca del río Nazas. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 18, 207-215. DOI: 10.5154/r.rchscfa.2010.09.076.
- Cerano, P. J., Villanueva, D. J., Valdez, C. R. D., Constante, G. V., González, B. J. L., & Estrada, A. J. (2012). Precipitación reconstruida para la parte alta de la cuenca del río Nazas, Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 3(10), 7-23.
- Chávez, G. M. P., Cerano, P. J., Nájera, L. J. A., Pereda, B. V., Esquivel, A. G., Cervantes, M. R., Cambrón, S. V. H., Cruz, C. F., & Corral, R. S. (2017). Reconstrucción de la precipitación invierno-primavera con base en anillos de crecimiento de árboles para la región de San Dimas, Durango, México. *Bosque*, 38(2), 387-399, DOI: 10.4067/S0717-92002017000200016
- Descroix, L., González, B. J. L., & Estrada, A. J. (eds.). (2004). *La Sierra Madre Occidental una fuente de agua amenazada*. Gómez Palacio, México: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias- Institut de Recherche pour le Développement.
- Escobar, P. J. J., González, B. J. L., Sánchez, C. I., Muñoz, V. A., & Villa, C. M. (2012). Análisis de la lluvia y su relación con fenómenos del cambio climático; estudio de caso en estación meteorológica Sardinias (San Bernardo, Durango). *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 11(2), 75-84.
- Estrada, A. J., Delgado, R. G., Palomo, R. M., Rivera, G. M., Jacobo, S. M. R., & Villanueva, D. J. (2014). La cuenca del río Nazas en el norte de México: condición e iniciativas en la conservación de sus recursos naturales. *Agrofaz*, 14(2), 123-135.

- Fischer, T., Gemmer, M., Su, B., & Scholten, T. (2013). Hydrological long-term dry and wet periods in the Xijiang River basin, South China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17, 135-148.
- Heim, R. R. Jr. (2002). A review of twentieth-century drought indices used in the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83, 1149-1165.
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2017). *Simulador de flujos de agua de cuencas hidrográficas (SIATL) V. 3.2* recuperado de http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siatl/#
- Li, J., Shang-Ping, X., Cook, E. R., Morales, M. S., Christie, D. A., Johnson, N. C., Chen, F., D'Arrigo, R., Fowler, A. M., Gou, X., & Fang, K. (2013). El Niño modulations over the past seven centuries. *Nature Climate Change*, 3, 822-825. DOI: 10.1038/NCLIMATE1936
- Lovino, M., García, N. O., & Baethgenc, B. (2014). Spatiotemporal analysis of extreme precipitation events in the Northeast region of Argentina (NEA). *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2, 140-158. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejrh.2014.09.001>
- Magaña, V., Pérez, J. L., Vázquez, J. L., Carrizosa, E., & Pérez, J. (1999). *Los impactos de El Niño en México*. México, DF, México: Secretaría de Educación Pública, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.
- MathWorks. (2002). *Software matemático*. MATLAB Versión 6.5.
- McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scale. In: *Proceedings of the Eighth Conference on Applied Climatology* (pp. 179-184), Anaheim, California, American Meteorological Society, Boston.
- NDMC, National Drought Mitigation Center. (2017). *SPI SL 6.exe Program to Calculate Standardized Precipitation Index*. National Drought Mitigation Center. Recuperado de <https://drought.unl.edu/droughtmonitoring/SPI/SPIProgram.aspx>
- NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration – National Weather Service, Climate Prediction Center. (2016). Historical El Niño/ La Niña episodes (1950-present). Recuperado de https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/en_sostuff/ONI_v5.php

- OMM, Organización Meteorológica Mundial. (2012). *Índice normalizado de precipitación. Guía del usuario*. Ginebra, Suiza: Organización Meteorológica Mundial. Recuperado de http://www.droughtmanagement.info/literature/WMO_standardized_precipitation_index_user_guide_es_2012.pdf.
- Ortega, G. D. (2012). *Sequía en Nuevo León: vulnerabilidad, impactos y estrategias de mitigación*. Apodaca, México: Instituto del Agua del Estado de Nuevo León.
- Paredes, F. J., Barbosa, A. H., & Guevara, E. (2015). Análisis espacial y temporal de las sequías den el nordeste de Brasil. *Agriscientia*, 32 (1), 1-14.
- Pereira, L. S., Cordery, I., & Iacovides, I. (2009). *Coping with water scarcity: Addressing the challenges*. Dordrecht, The Netherlands: Springer.
- Raziei, T., Martins, D. S., Bordi, I., Santos, J. F., Portela, M. M., Pereira, L. S., & Sutera, A. (2014). SPI Modes of drought spatial and temporal variability in Portugal: Comparing observations, PT02 and GPCC gridded datasets. *Water Resources Management*, 29(2), 487-504. DOI 10.1007/s11269-014-0690-3
- Raziei, T., Bordi, I., Pereira, L., & Sutera, A. (2010). Space-time variability of hydrological drought and wetness in Iran using NCEP/NCAR and GPCC datasets. *Hydrology Earth System Sciences*, 14, 1919-1930.
- Santos, J., Pulido-Calvo, I., & Portela, M. (2010). Spatial and temporal variability of droughts in Portugal. *Water Resources Research*, 46 (3), W03503, 1-13. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1029/2009WR008071>
- Sarricolea, P., & Meseguer, R. O. (2015). Sequías en Chile central a partir de diferentes índices en el periodo 1981-2010. *Investigaciones Geográficas Chile*, 50, 19-32.
- Serrano, B. L., Vicente, S. S. M., Flores, M. H., Tijerina, C. L., & Vázquez, S. D. (2016). Variabilidad espacio-temporal de las sequías en la cuenca pacífico norte de México (1961-2010). *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 42(1), 185-204. DOI: 10.18172/cig.2857
- Sigdel, M., & Ikeda, M. (2010). Spatial and temporal analysis of drought in Nepal using Standardized precipitation index and its relationship

-
- with climate indices. *Journal of Hydrology and Meteorology*, 7(1), 59-74.
- SMN, Servicio Meteorológico Nacional. (2017). *Normales climatológicas del estado de Durango*. Recuperado de <http://smn.cna.gob.mx/es/informacion-climatologica-ver-estado?estado=dgo>
- Sönmez, F., Kömüscü, A., Erkan, A., & Turgu, E. (2005). An analysis of spatial and temporal dimension of drought vulnerability in Turkey using the standardized precipitation index. *Natural Hazards*, 35(2), 243-264.
- Sthale, D. W., Cook, E. R., Villanueva, D. J., Fye, F. K., Burnette, R. D., Griffin, R. D., Acuña, S. R., Seager, R., & Heim, Jr. (2009). Early 21st-Century Drought in México. *EOS, Transactions, American Geophysical Union*, 90(11), 89-100.
- Sthale, D. W., & Cleaveland, M. K. (1993). Southern Oscillation extremes reconstructed from tree-rings of the Sierra Madre Occidental and Southern Great Plains. *Journal of Climate*, 6, 129-140.
- Telesca, L., Vicente-Serrano, S., & López, M. J. (2013). Power spectral characteristics of drought indices in the Ebro river basin at different temporal scales. *Stochastic Environmental Research Risk Assessment*, 27, 1155-1170.
- Toro, T. A. M., Arteaga, R. R., Vázquez, P. M. A., & Ibañez, C. L. A. (2015). Relleno de series diarias de precipitación, temperatura mínima, máxima de la región norte del Urabá Antioqueño. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(2), 577-588.
- Trenberth, K. E. (2013). El Niño Southern Oscillation (ENSO). *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*, 1, 1-12. Recuperado de [http://www.cgd.ucar.edu/cas/Trenberth/website-archive/trenberth.papers-moved/2013ElNinoSouthernOscillation\(ENSO\)-Elsevier.pdf](http://www.cgd.ucar.edu/cas/Trenberth/website-archive/trenberth.papers-moved/2013ElNinoSouthernOscillation(ENSO)-Elsevier.pdf)
- Velásquez, V. M. A., Medina, G. G., Sánchez, C. I., Oleschko, L. K., Ruíz C. J. A., & Korvin, G. (2013). Spatial variability of the Hurst exponent for the daily scale rainfall series in the state of Zacatecas, Mexico. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 52, 2771-2780. Recuperado de <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-13-0136.1>

-
- Vicente-Serrano, S. (2006). Spatial and temporal analysis of droughts in the Iberian Peninsula (1910-2000). *Hydrological Sciences Journal*, 51(1), 83-97.
- Zhai, J., Su, B., Krysanova, V., Vetter, T., Gao, C., & Jiang, T. (2010). Spatial variation and trends in PDSI and SPI indices and their relation to streamflow in 10 large regions of China. *Journal of Climate*, 23, 649-663.