

Determinación de escenarios por sequía en la región del Organismo de Cuenca del Pacífico Norte, México

Douriet Cárdenas, J.C., A.C. Ravelo, A.I. Ramírez Orozco, C.E. Torrecillas Nuñez y C.M. García

RESUMEN

Las sequías constituyen adversidades climáticas que afectan todas las actividades humanas y causan directa o indirectamente la degradación de las condiciones ambientales. México ha experimentado siempre los efectos negativos de las sequías desde la prehistoria, pasando por la época prehispánica, hasta la actualidad. En particular, el Organismo de Cuenca del Pacífico Norte (OCPN) ha sido afectado por sequías severas como la ocurrida en 2011-2012, la cual fue de tal magnitud que, en consecuencia, los escurrimientos en ríos y arroyos fueron prácticamente nulos y se registraron volúmenes de almacenamiento de agua en las principales presas de la región, muy por debajo de su normal histórica. Se realizó un análisis temporal y espacial de sequías para el período 1978-2016 utilizando los índices estandarizado de precipitación (SPI) y el de severidad de sequía de Palmer (PDSI) para la región del OCPN. Se determinaron escenarios de sequías con 1, 2 y 3 meses de antelación, basada en el análisis multivariado temporal y uso de redes neuronales. Los resultados demostraron que un pronóstico preciso fue obtenido por el modelo de red neuronal Perceptron Multilayer de dos capas. Los parámetros estadísticos utilizados para evaluar los pronósticos indicaron una estrecha relación entre los valores observados y pronosticados con errores de estimación aceptables. La aplicación de estos métodos propuestos pueden contribuir a la gestión integral de cuencas para la prevención, mitigación, adaptación y respuesta ante la sequía.

Palabras clave: Redes neuronales, variabilidad climática, análisis multivariado temporal.

Douriet Cárdenas, J.C., A.C. Ravelo, A.I. Ramírez Orozco, C.E. Torrecillas Nuñez and C.M. García, 2018. Determining drought scenarios in the region of the North Pacific Basin Agency, Mexico . RADA IX: 57-73

SUMMARY

Droughts are meteorological adversity affecting all human activities which directly or indirectly cause the degradation of environmental conditions. Mexico

has experimented the negative effects of drought since the pre-Hispanic period to the present and, in particular, the Organismo de Cuenca del Pacífico Norte (OCPN) has been affected by severe droughts as the occurred in 2011-. During this period the runoff in rivers and streams were practically null and very low storage volumes were recorded in the main dams in the region. A temporal and spatial analysis of drought for the period 1978-2016 was carried out using the indices standardized precipitation (SPI) and the drought of Palmer (PDSI) for the region of the OCPN. Drought scenarios were determined at 1, 2 and 3 months, based on temporal multivariate analysis and use of neural networks. The results showed that accurate forecast was obtained by neural network model Perceptron Multilayer two-layer. The statistical parameters used to evaluate the forecasts indicated a close relationship between the observed and forecasted values and acceptable estimation errors. The proposed methods can contribute to the integral management of watersheds for the prevention, mitigation, adaptation and response to drought.

Key words: Neural networks, climate variability, temporal multivariate analysis.

Douriet Cárdenas, J.C.: Organismo de Cuenca Pacífico Norte-CONAGUA. Avenida Federalismo s/n, Col. Recursos Hidráulicos, 80105, Culiacán Rosales, Sinaloa, México. A.C. Ravelo: CREAN-IMBIV/CO-NICET, Ing. Agr. Félix A. Marrone 746, Ciudad Universitaria, Córdoba. Argentina. A.I. Ramírez Orozco: Centro del Agua para América Latina y El Caribe, ITM, Monterrey Nuevo León, México. C.E. Torrecillas Nuñez: Facultad de Ingeniería Culiacán de la Universidad Autónoma de Sinaloa. Calzada de las Américas y Universitarios, s/n, Ciudad Universitaria, 80040 Culiacán Rosales, Sinaloa. México. C.M. García: Fac. C. Exactas, Físicas y Naturales, UNC Ciudad Universitaria, Córdoba. Argentina. Correspondencia a: jose.douriet@conagua.gob.mx

INTRODUCCION

Las condiciones extremas del clima siempre han afectado a la humanidad (Magaña, 2000). Uno de los eventos climatológicos extremos más perjudiciales es la sequía, que afecta recurrentemente a distintas regiones de nuestro planeta. Cuando estos fenómenos son intensos y prolongados generan fuertes pérdidas en las actividades agrícolas, ganaderas e industriales, con consecuencias sociales y económicas conexas, como la inseguridad en los suministros alimentarios e importantes pérdidas monetarias (Ravelo, 2008; Ravelo *et al.*, 2016). Estos eventos tienen lugar en regiones tanto húmedas como áridas afectando a una amplia variedad de áreas geográficas, A nivel mundial, el 22% del daño económico es causado por los desastres naturales y el 33% del daño, en términos del número de personas afectadas, puede ser atribuido a la sequía (Keshavarz *et al.*, 2013).

La sequía es una de las principales causas de pobreza en el mundo y está empujando a millones

de personas a emigrar de sus países. Ante la persistente falta de lluvias, entre 10 y 12 millones de personas se enfrentan a una grave escasez de alimentos al sur de África (<http://historyabiografias.com>). En la actualidad, entre los países que más experimentan las sequías y sus efectos, se pueden citar: Etiopía, Eritrea, Somalia, Sudan, Uganda, Afganistán, China, India, Irán y Marruecos. (http://www.wearewater.org/es/la-fundacion_253356). En los Estados Unidos, las sequías causan pérdidas anuales por alrededor de \$ 7 billones de dólares (NTSC, 2005). Otros ejemplos de la afectación histórica de las sequías en el mundo, en los tiempos recientes, son: la peor sequía de los últimos 100 años en California, período 2014-2015 (www.rtve.es); sequías en el Amazonas en 2005 (www.elpais.com); sequías en el sur de Chile en 2015 (www.biochile.cl); sequías en Argentina en 2009 y 2017 (www.crean.unc.edu.ar); sequías en China en período 2010-2015 (Zongxing *et al.*, 2012; Qiu, 2010; Department of Water Resources of Yunnan Province, 2011), sequías en el sur de Estados Unidos en

2010-2013 (Ma *et al.*, 2013), en Irán en 2001 (Moradi and Erfanzadeh, 2001).

A lo largo de su historia, México siempre ha experimentado los efectos negativos de las sequías desde la prehistoria, pasando por la época prehispánica hasta la actualidad, tal como lo muestran los registros documentados durante las diversas etapas del desarrollo nacional (Florescano, 2000; García, 1993). Algunas de ellas se han documentado a partir de una revisión histórica, documental y hemerográfica. Ante sucesos que rebasaban la comprensión cotidiana, las primeras explicaciones de la sequía fueron religiosas, atribuyéndolas a fuerzas divinas. De manera paulatina, la generación de conocimiento e información llevó a explicaciones científicas sobre la base de la observación y el análisis (Domínguez, 2016). La sequía es un evento natural que se presenta de manera recurrente en México, donde la mayor parte del territorio tiene características de aridez y el crecimiento urbano no ha tenido patrones de consumo de agua bien planificados. Los problemas de desabastecimiento de agua para consumo humano tienden a agravarse en distintas regiones, aun sin considerar los efectos de la sequía y del cambio climático. Es así que el cumplimiento del mandato constitucional de garantizar el acceso humano al agua está en riesgo. Por otro lado, frente a una situación de sequía extendida y prolongada la seguridad alimentaria nacional, exige tomar medidas de política social, económica y fiscal para garantizar el abastecimiento de alimentos, potenciar las capacidades productivas del sector rural y definir los cupos de importación de granos básicos en el país, en particular de frijol y maíz blanco para consumo humano (Arreguín *et al.*, 2016). Las sequías se manifiestan con mayor impacto, intensidad y frecuencia en la porción norte del país (Magaña, 2004), debido a que es el territorio más vulnerable (Velasco, 2002). En la zona noroeste del país, que incluye al Organismo de Cuenca Pacífico Norte (OCPN), los análisis estadísticos muestran claramente períodos de baja precipitación, que pueden extenderse por cinco, seis y hasta siete años consecutivos, como las ocurridas recientemente entre 1997 y 2004 y entre 2010 y 2012 (Sanz *et al.*, 2012). La sequía en 2010-2012 se considera la peor en los últimos 70 años que, de acuerdo a estimaciones realizadas por la Comisión de Agricultura de la Cámara de Diputados de México (2014), arrojó pérdidas por 150 mil millones de pesos. La sequía afectó un 90% del territorio nacional, de modo que prácticamente todo el país se encontraba con algún grado de sequía. Los estados más afectados fueron Aguascalientes, Chihuahua, Coahuila, Durango, Guanajuato, Jalisco, San Luis Potosí, Sina-

loa, Sonora y Zacatecas. A pesar del profundo impacto que produjo y que se adoptaron una serie de medidas reactivas, algunos la consideran la mejor atendida en el país, ya que hubo coordinación intersecretarial (Arreguín, *et al.*, 2016).

En el ámbito del Organismo de Cuenca del Pacífico Norte (OCPN) de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) de México, se registran recurrentemente los efectos de las sequías de diferente magnitud e intensidad. Durante el período 2010-2012 se presentaron sequías meteorológicas e hidrológicas extremadamente severas (CONAGUA, 2013), teniéndose escurrimientos prácticamente nulos en ríos y arroyos, así como muy bajos volúmenes de almacenamiento de agua en las principales presas de la región (CONAGUA, 2012). Asimismo, la sequía coincidió con una de las peores heladas que se han presentado en el noroeste de México, provocando la pérdida de más de 800,000 has de diferentes cultivos, principalmente el maíz, lo que agudizó el problema socioeconómico. Para afrontar los efectos de la helada se llevó a cabo la resiembra de cientos de miles de hectáreas, disponiendo del agua almacenada en las presas para los riegos normales posteriores, generando con ello una sequía hidrológica antrópica, que se vio agravada por la ocurrencia de la sequía natural. Las presas llegaron a su mínimo de almacenamiento histórico de entre un 3% y 9% de su capacidad de almacenamiento en junio de 2012 (Ravelo, 2012; Ravelo *et al.*, 2014; Torrecillas *et al.*, 2013). Los porcentajes de almacenamiento menores ocurrieron en las presas del Consejo de Cuenca de los Ríos Mocorito al Quelite, principalmente la presa Sanalona que llegó a estar prácticamente seca; seguido de los almacenamientos de las presas del Consejo de Cuenca de los ríos Fuerte y Sinaloa.

De acuerdo con el National Drought Mitigation Center (NDMC, 2016), cuanto más tiempo dura la escasez de la lluvia con respecto al valor normal, más severa es la sequía y los impactos económicos, sociales y ambientales son mayores, por lo que propone clasificar el evento en cinco tipos de sequías, que son: sequía meteorológica, sequía agrícola, sequía hidrológica, sequía socioeconómica y sequía ecológica.

Para el monitoreo de las fases de la sequía y para efectos de planeación, elaboración de planes de mitigación e implementación de programas de mitigación de sequías, se hace necesario elaborar escenarios probables de ocurrencia de sequías; para ello se aplican los programas de redes neuronales (Neurosolution, 2009), los cuales son métodos no paramétricos que trabajan a partir de una serie histórica de índices de sequía y datos hidroclimatológicos, con los cuales se entrena, aprende

y se calibra, para posteriormente inferir los índices a 1, 2 o 3 meses siguientes (Ravelo, 2008; Douriet, 2010; Ravelo *et al.*, 2014).

La aplicación de redes neuronales a la predicción de la ocurrencia de sequías ha sido documentada por diversos autores (Hyun-Suk and Salas, 2000; Morid *et al.*, 2007; Ravelo *et al.*, 2014).

El objetivo de esta investigación fue demostrar que el análisis multivariado temporal mediante la aplicación de las redes neuronales, contribuye a la determinación de escenarios por sequías en el Organismo de Cuenca Pacífico Norte, aportando elementos para estimar su vulnerabilidad y riesgo futuro en la ocurrencia de sequías.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El área de estudio está comprendida por las cuencas que corresponden al Organismo de Cuenca Pacífico Norte (OCPN. Considerando que

las sequías generalmente son de gran extensión (Velasco, 2002), la cuenca constituye la unidad de gestión y es la escala apropiada para evaluar los impactos ambientales, económicos y sociales (Ravelo, 2008; Douriet, 2010; Torrecillas *et al.*, 2013).

Las cuencas de los ríos Fuerte, Sinaloa, Mocorito, Culiacán, San Lorenzo, Elota, Piaxtla, Quelite, Presidio, Baluarte, Cañas, Acaponeta y San Pedro, así como las corrientes independientes que integran el OCPN, se encuentran ubicadas en el noroeste de México, entre las coordenadas 28°10'30"N y 21°41'49"N y 103°27'50"W y 109°25'55"W y comprende la totalidad del estado de Sinaloa y parte de los estados de Chihuahua, Durango, Zacatecas y Nayarit. Figura 1 (CONAGUA, 2014).

Los climas predominantes en esta región hidrológica son templado sub-húmedo y cálido sub-húmedo (INEGI, 1981). La temperatura media anual en la región presenta fuertes variaciones y oscila entre los 10 y los 26°C, por efecto de la altitud y posición geográfica. Se puede observar



Figura 1. Localización del Organismo de Cuenca Pacífico Norte.

que en la porción norte de la región se presentan temperaturas más cálidas y secas, aunque en las partes serranas pueden presentarse temperaturas bajo cero en ciertas épocas del año. Hacia el sur, la temperatura se hace más templada y húmeda, con temperaturas medias de 12 a 18°C, máximas de 22°C y mínimas bajo cero en las zonas serranas en ciertas épocas. En el caso de la región del Valle del Guadiana, la temperatura media es de entre 16 y 18°C, con mínimas bajo de cero en ciertas épocas y máximas mayores a 24°C.

Indicadores de sequía

Los indicadores de sequías son valores normativos que nos permiten la clasificación de las fases de la sequía y son útiles para el monitoreo y pronóstico del evento.

Los índices meteorológicos utilizados fueron: el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI, por sus siglas en inglés), a diferentes escalas de tiempo (McKee *et al.*, 1993), y el Índice de Severidad de la Sequía de Palmer (PDSI, por sus siglas en inglés) (Palmer, 1965). A tal efecto, se generó una base de datos meteorológicos, edafológicos y agrológicos correspondientes a la zona en estudio; para su estimación en forma automatizada, con la finalidad de hacer los cálculos más rápidos, se utilizó el Sistema Operativo de Sequías (SOS), creado in situ en el desarrollo del Proyecto de Sequías del OCPN (Ravelo, 2008), el cual también grafica los mapas de la variabilidad espacial de la sequía.

El SPI es un indicador basado en la probabilidad de lluvias en cualquier período de tiempo. Fue desarrollado por McKee *et al* (1993, 1995) para cuantificar el déficit de precipitaciones durante múltiples escalas de tiempo.

El PDSI (Palmer, 1965; Alley, 1984), por su parte, se calcula a partir de un balance hídrico seriado, el cual utiliza datos de precipitación, temperatura (para obtener la evapotranspiración potencial) y capacidad de retención de agua del suelo, por lo que se le considera un índice de tipo edafo-meteorológico, ya que esencialmente monitorea la disponibilidad de agua en el suelo en forma mensual o cada diez días (Ravelo, 2007; Douriet, 2010).

La base de datos meteorológicos considerados en el estudio fueron los registros históricos de 49 estaciones, desde 1978 hasta 2015, a escala mensual. Una base de datos actualizada, validada y operativa, es un elemento fundamental de cualquier sistema de monitoreo de las sequías. Por lo que todos los datos fueron sometidos a un estricto control de calidad en lo referente a

continuidad, variabilidad, magnitud, consistencia y confiabilidad. Para ello se utilizaron métodos gráficos y estadísticos apropiados, los cuales se describen a continuación. Siguiendo un criterio de continuidad, no se utilizaron series incompletas (con datos faltantes), lo cual determinó que una cantidad de estaciones fueran eliminadas de la evaluación. La calidad de los datos fue controlada mediante el uso de parámetros estadísticos (desviación estándar), identificando a aquellas series y/o datos sospechosos. El uso de tres desviaciones ($p > 0,99$) por encima o debajo del valor medio se utilizó para identificar valores incorrectos que fueron eliminados. También se realizó una validación cruzada entre estaciones vecinas.

Los pasos que se siguieron son (Figura 2):

- Selección de estaciones meteorológicas
- Compilación y preparación de las bases de datos
- Estimación de los índices de sequía SPI y PDSI
- Análisis y evaluación
- Pronóstico de ocurrencia

Pronóstico de sequías

Para el pronóstico de la ocurrencia de sequías, se utilizaron Redes Neuronales Artificiales (RNA), las cuales son modelos matemáticos inspirados en sistemas biológicos, adaptados y simulados en computadoras convencionales (Bocco and Ovando, 2013). Una RNA tiene un conjunto de propiedades específicas, como son la habilidad de adaptarse o aprender, generalizar u organizar la información, todo ello basado en un procesamiento eminentemente paralelo (Kröse and Van der Smagt, 1993). En el proceso de aprendizaje, los enlaces ponderados de las neuronas se ajustan de manera que se obtengan ciertos resultados específicos. Una red neuronal no necesita un algoritmo para resolver un problema, ya que ella puede generar su propia distribución de pesos en los enlaces mediante el aprendizaje. Este proceso es realizado con series temporales de los índices de sequía de forma de lograr un sistema calibrado y validado para el pronóstico. Para la aplicación del pronóstico de sequías meteorológicas, mediante el programa Neurosolutions.xlsx, se utilizó la metodología propuesta durante el desarrollo del Proyecto de Sequías en el OCPN (Ravelo, 2007; Ravelo *et al.*, 2014).

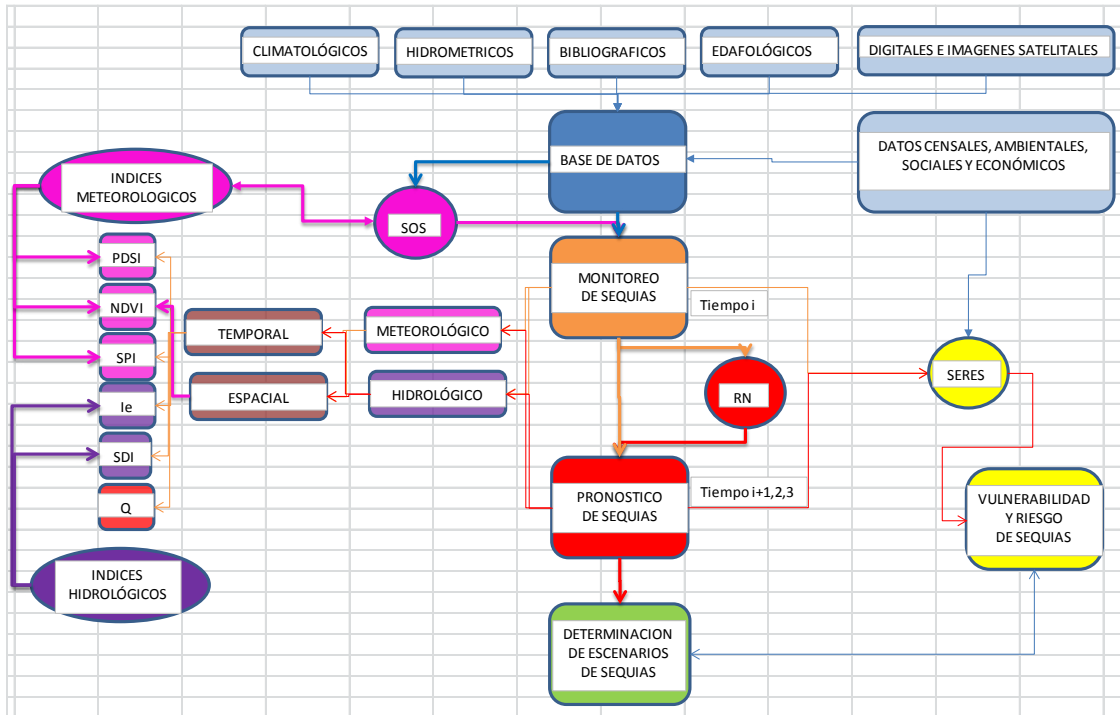


Figura 2. Diagrama del proceso para la determinación de escenarios por sequía

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Índice SPI

En la Tabla 1, se muestran los valores del SPI3 (índice estandarizado de precipitación de los últimos 3 meses) de la estación Culiacán para el periodo 1978-2015, indicativos de las sequías ocurridas en el valle agrícola de Culiacán y costa del centro del estado de Sinaloa. Se observan sequías de diversas intensidades y duraciones, que van desde sequías incipientes en diferentes meses del año hasta sequía extrema en los meses de julio, agosto y octubre en diferentes años, sobresaliendo las de 1979, 1982 y 1999. Si bien es cierto que son pocos los años con sequías extremas, las otras fases con diferentes duraciones se han combinado para provocar cuantiosos daños por sequía en la agricultura, ganadería, generación de energía eléctrica, abastecimiento de agua potable, acuacultura y medio ambiente con severos impactos sociales. Las sequías de fase severa se han presentado con mayor frecuencia que las de fase extrema, inclusive en los meses en donde no se han presentado las sequías extremas (septiembre y noviembre) para diferentes años. No existe ningún año durante el periodo de análisis

en el cual no se haya presentado el fenómeno en alguna de sus fases; asimismo, los periodos de sequía han sido variados, desde muchos de corta duración hasta muy pocos de larga duración.

De acuerdo al resultado del análisis del SPI en sus escalas de 3, 6 y 12 meses (en este documento solo se presentan los resultados del SPI3), los años más secos fueron, 1979-1980, 1982, 1987-1989, 1999-2000 y 2011-2012, en tanto los húmedos fueron 1983-1985, 1991-1992, 1994, 1996, 2004-2005, 2008 y 2013-2015. Como puede observarse durante la última década ha habido sequías y excesos de humedad muy intensos, lo cual representa un 24% del periodo expuesto a sequías extremas y un 29% a condiciones de abundante humedad. Esto es, alrededor del 50% del tiempo, el OCPN está expuesto a eventos extremos de los cuales prácticamente la mitad es por sequía.

En la Figura 3 se muestra la variación del índice SPI3 para la estación Culiacán a lo largo de todo el periodo analizado.

La Figura 4 presenta el SPI3 para agosto de 2011 en todo el territorio del OCPN, indicándose en general una sequía de incipiente a moderada y que alcanza incluso la condición de extrema en algunos sectores.

La sequía meteorológica extendida a través del

Tabla 1. Valores del SPI a 3 meses, período 1978-2015, Estación Culiacán.

Estación Climatológica Culiacán												
SPI3												
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1978			0.45	1.05	0.16	-0.18	-0.63	-0.67	-1.03	-0.31	-0.31	0.54
1979	0.62	0.97	1.09	0.67	0.72	0.57	-0.86	-2.41	-1.56	-1.32	-0.11	-0.86
1980	-0.55	-0.33	-0.39	0.05	0.72	-0.31	-0.81	-0.22	0.11	1.75	1.55	1.44
1981	1.12	1.20	1.66	0.54	1.41	0.60	-0.89	-1.33	-1.91	-0.46	-0.06	0.59
1982	-0.78	-0.55	-0.19	-0.43	0.16	-0.58	-2.08	-2.59	-1.60	-0.90	0.62	0.80
1983	1.38	1.31	1.48	2.46	3.30	1.04	-0.06	0.04	-0.07	-0.29	0.70	1.15
1984	1.87	1.10	1.25	-0.43	0.93	2.84	2.49	2.04	1.18	0.00	0.19	1.02
1985	1.43	1.51	0.73	0.58	0.44	1.40	0.48	0.16	-0.91	-0.36	-0.37	0.47
1986	-0.55	-0.20	0.18	0.89	1.72	0.90	0.33	-0.34	-1.23	0.23	0.62	1.38
1987	-0.45	-0.23	-0.39	-0.43	0.16	-0.58	-0.10	0.25	-0.21	-0.64	-1.49	-0.29
1988	0.06	0.22	-0.92	-0.43	0.16	-0.58	-0.83	-0.30	-0.77	-0.73	-1.54	-0.71
1989	0.05	0.44	0.56	0.54	0.16	-0.58	0.09	0.18	-0.54	-0.64	-0.58	0.62
1990	0.54	0.29	0.24	0.63	0.16	0.84	1.82	1.08	0.16	-1.58	-0.80	0.90
1991	0.98	0.75	-0.61	-0.17	0.16	-0.58	0.79	-0.04	0.72	-0.36	0.59	1.30
1992	2.65	2.78	2.53	1.05	0.59	-0.18	0.00	0.28	0.11	-0.38	-0.95	-0.97
1993	-0.27	-0.17	0.21	0.13	0.16	-0.58	-1.76	-0.47	-0.83	-0.22	-0.59	-0.01
1994	0.20	-1.25	0.29	0.86	1.88	1.75	1.36	2.05	1.72	1.03	-0.09	0.19
1995	0.16	0.13	-0.92	-0.43	0.16	-0.58	-0.42	-0.28	-0.21	-0.41	-0.72	-1.41
1996	-1.41	-1.25	-0.92	-0.43	0.16	1.09	0.92	0.72	1.42	0.97	1.02	0.15
1997	0.37	0.29	0.69	1.35	2.93	1.89	0.68	-0.10	0.34	-0.25	0.63	0.52
1998	0.88	0.69	0.29	0.86	0.16	-0.58	-0.49	0.35	0.23	0.07	-0.99	-1.41
1999	-1.41	-1.25	-0.92	-0.43	0.16	1.09	0.45	-0.63	-1.70	-2.39	-1.74	-0.90
2000	-0.97	-0.75	-0.92	-0.43	0.16	0.67	-0.11	-0.18	-1.27	0.13	0.56	1.34
2001	0.35	-0.68	0.47	1.08	2.03	-0.18	1.06	0.65	0.08	-1.01	-1.20	-0.24
2002	-0.78	-0.14	0.08	0.54	0.16	-0.58	-0.33	-1.71	-0.14	-0.07	0.94	-0.12
2003	-0.55	-0.14	0.14	0.67	0.16	0.67	0.37	-0.13	0.65	0.34	0.62	-0.31
2004	0.77	1.16	1.75	1.35	1.47	0.33	-0.61	-0.34	0.22	1.67	1.87	1.55
2005	0.73	1.52	1.96	2.85	0.16	-0.58	-0.17	-0.14	-0.57	-0.68	-1.00	-0.36
2006	-0.90	-0.97	-0.61	-0.43	0.16	0.97	0.63	0.12	0.12	-0.32	-0.13	-0.29
2007	-0.22	0.20	0.45	0.49	0.16	0.18	-1.79	0.02	0.87	1.27	0.62	0.09
2008	0.42	0.13	-0.92	-0.43	0.16	0.28	-0.46	1.48	1.69	1.70	-0.07	-0.42
2009	-1.07	-0.85	-0.31	-0.05	0.59	0.95	0.30	0.33	-0.57	0.05	-0.23	0.74
2010	-0.01	0.81	1.10	1.62	0.83	-0.18	-1.47	-0.68	0.22	0.53	0.19	-1.41
2011	-1.41	-1.25	-0.92	-0.43	0.16	-0.58	0.82	1.09	0.61	-0.51	-1.34	-0.61
2012	-0.27	-0.75	-0.39	0.05	0.16	0.37	0.26	0.54	0.69	0.55	0.08	0.23
2013	-0.03	0.19	-0.14	-0.43	0.16	-0.18	-1.09	-0.94	2.39	2.37	2.84	0.53
2014	0.87	-0.61	-0.48	-0.43	0.59	1.57	2.02	1.74	0.92	-0.76	-0.91	-0.16
2015	0.05	0.33	1.00	1.66	1.77	0.70	-0.28	0.43	0.69	1.90	1.47	1.67

tiempo genera una sequía hidrológica en la cuenca. Existen pequeñas zonas en el OCPN con sequía extrema, como en la cuenca alta del río Culiacán y con humedad de incipiente a moderada en la costa del centro y sur del Organismo. En el mes de agosto la sequía extrema se incrementó notablemente en la Sierra Madre Occidental en las cuencas de los ríos Fuerte y Sinaloa hacia la parte norte del OCPN y en la cuenca del río San Pedro en el estado de

Durango; la pequeña zona de sequía extrema en la cuenca del río Culiacán se extendió a la cuenca del río San Lorenzo; también las sequías severa y moderada crecieron disminuyendo la incipiente; en cambio, también aumentó la zona de humedad incipiente y moderada en la línea de costa de la parte centro al sur del OCPN, apareciendo zonas de humedad excesiva y extrema en la parte sur del OCPN.

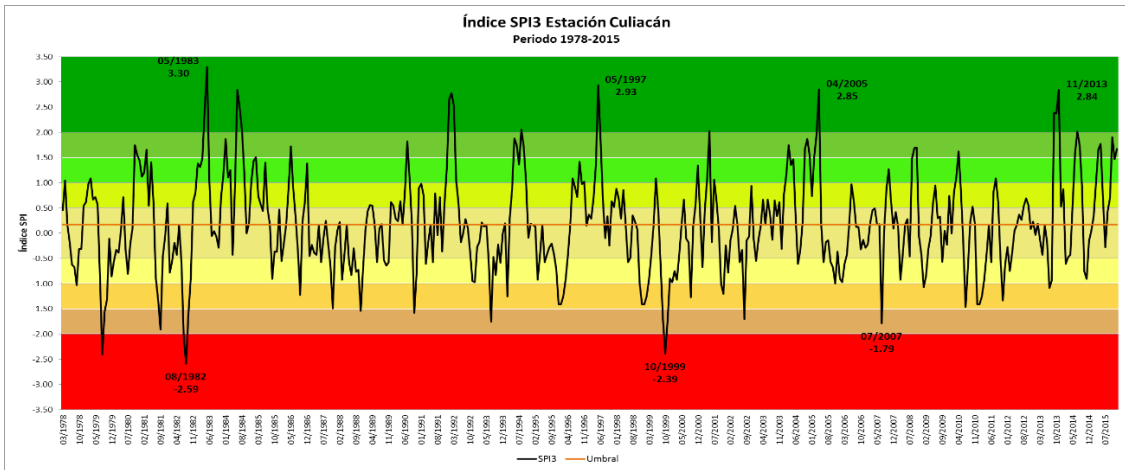


Figura 3. Variación del índice Índice Estandarizado de Precipitación para 3 meses (SPI3) para el período 1978-2015

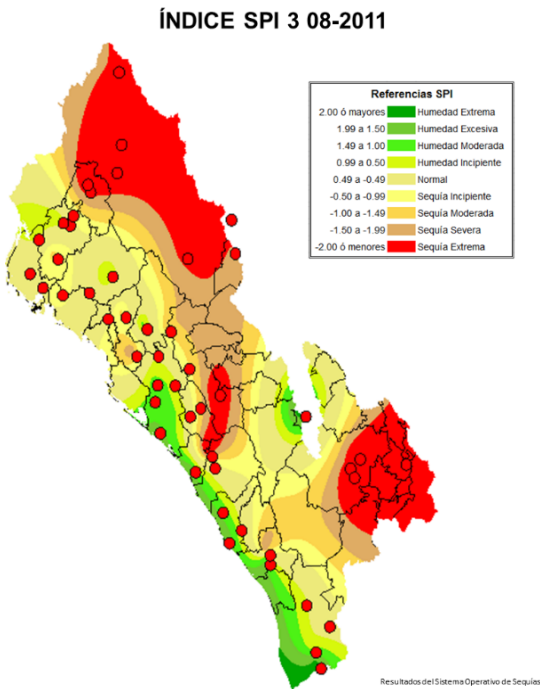


Figura 4. Condición de sequía/humedad en el OCPN evaluada a partir de Índice Estandarizado de Precipitación para 3 meses (SPI3), en agosto de 2011. Los puntos rojos corresponden a las estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio

Índice PDSI

La Figura 5 presenta los resultados del PDSI para la estación de Culiacán durante el período analizado entre 1978 y 2015.

Los períodos más secos fueron 1979-1980, 1982, 1988-1989, 1999-2000, 2011-2012, en tanto los más húmedos fueron 1983-1985, 1992, 1995, 1996-1997, 2001, 2005, 2014 y 2015.

De manera similar a la descripción de la Figura 4, en la Figura 6 se observa que para el índice PDSI en el mes de agosto, la sequía extrema aumentó notablemente en la Sierra Madre Occidental, en las cuencas de los ríos Fuerte y Sinaloa y aparece en la parte alta de las cuencas de los ríos Mocorito y Culiacán; también se registra una sequía severa en la parte centro norte del OCPN y en la cuenca del río San Pedro en el estado de Durango; aparece una humedad incipiente y moderada en la línea de costa de la parte centro al sur del OCPN, apareciendo zonas de humedad excesiva y extrema en la parte sur.

Los resultados del análisis de la sequía en el OCPN para el período 2010-2015, muestran años con sequía del 2010 al 2013, ya que los años 2014 y 2015, fueron húmedos. La mayor densidad de estaciones climatológicas utilizadas en este trabajo permite un monitoreo y evaluación de la sequía más preciso geográficamente que los producidos por los monitores de sequías de América del Norte (NADM, 2016) y el Monitor de sequías de México (SMN, 2016), que operan a una escala mayor y utilizan menor cantidad de estaciones climatológicas. La precisión del monitoreo de la sequía a la escala utilizada en este trabajo, asegura la estimación adecuada de la vulnerabilidad y riesgo vinculados a esta adversidad en los municipios y cuencas que conforman el OCPN.

Pronóstico temporal y espacial de las sequías meteorológicas

Se describen los resultados del pronóstico temporal y espacial de las sequías meteorológicas en el OCPN, mediante el uso generalizado de

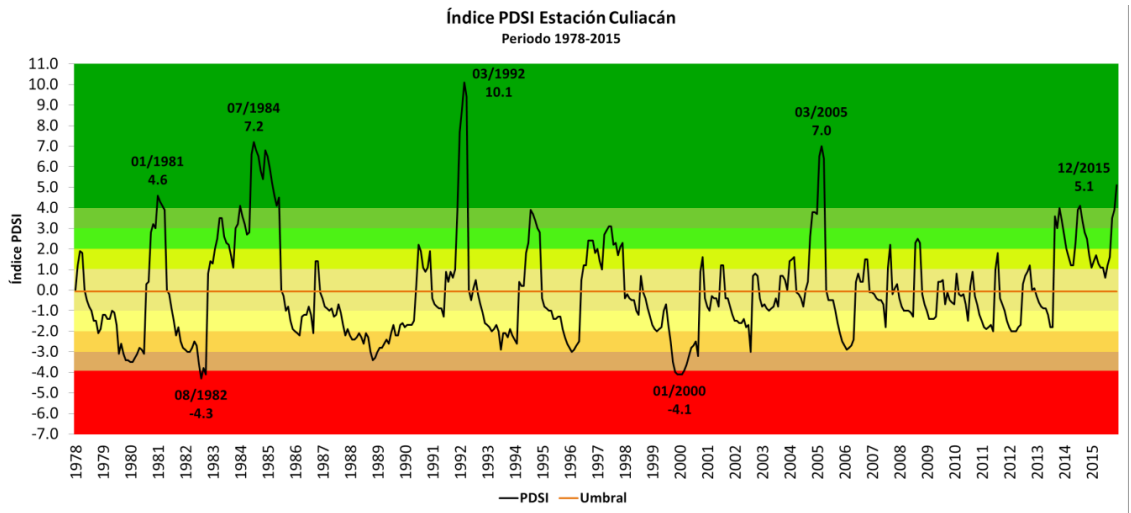


Figura 5. Variación del índice de severidad de sequía de Palmer (PDSI) para la estación de Culiacán en el período 1978-2015.

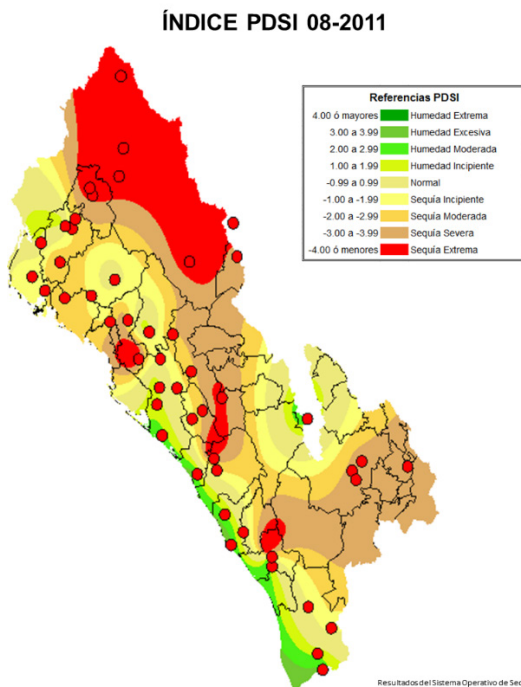


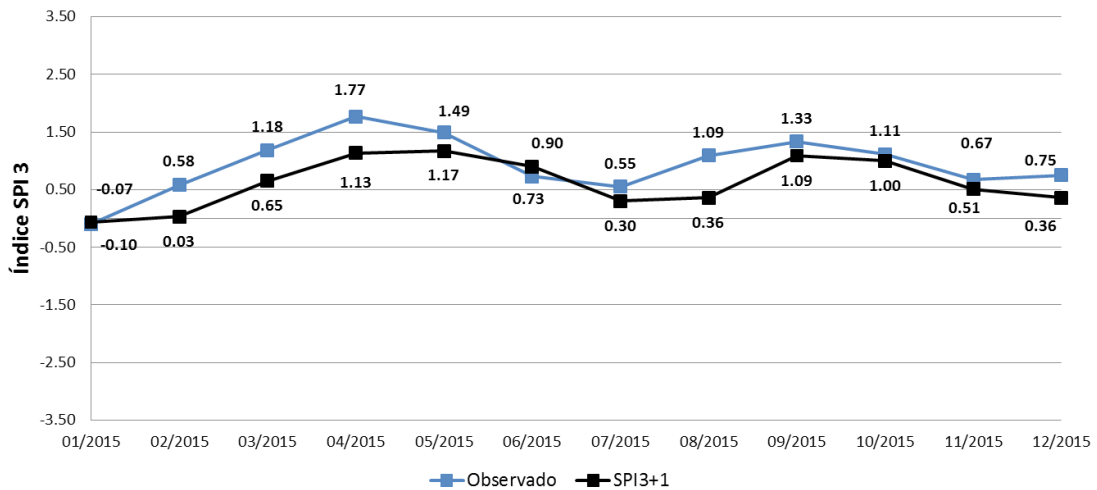
Figura 6. Condición de sequía/humedad en el OCPN en agosto de 2011 de acuerdo al índice de severidad de sequía de Palmer (PDSI). Los puntos rojos corresponden a las estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio.

las redes neuronales con índices de sequía. Los resultados en ambos casos indican que, el pronóstico con un mes de anticipo fue mejor invariablemente que a dos meses y el de dos meses mejor que el de tres meses, como lo muestran los resultados de los pronósticos para el año 2015 para el índice SPI3 en la Figura 7 y Tabla 2.

Puede apreciarse que para el primer mes existe una pequeña diferencia entre el valor pronosticado del SPI3 para febrero en el mes anterior y el calculado con los datos del mes de febrero, quedando en fase de normalidad hídrica para los meses de estiaje de febrero a mayo. La diferencia entre lo pronosticado y lo observado se incrementa un poco quedando algunos de ellos en fases de sequía diferentes; vuelven a ser similares en junio y julio, incrementando la brecha en los meses de agosto y septiembre que son los más lluviosos del año; en octubre y noviembre la diferencia es pequeña quedando ambos en la fase de humedad moderada e incipiente, respectivamente. Finalmente, en diciembre de 2015, la brecha se incrementa de nuevo. Las tendencias entre lo observado y lo pronosticado a un mes son muy similares siendo mayor el valor observado que el pronosticado en este intervalo de tiempo, por lo que el pronóstico quedó subestimado.

La verificación de la precisión de los pronósticos para cuatro localidades se presenta en la Tabla 2. Se debe destacar que el coeficiente de determinación más alto lo presenta el pronóstico que se anticipa un mes en la estación El Varejonal con 0.7067. En las otras estaciones los valores son menores a 0.54. El coeficiente de determinación para el pronóstico a dos y tres meses fue de bajo a muy bajo, con valores menores a 0.42 a dos meses y menores a 0.20 a tres meses. Estos coeficientes indican bajo grado de asertividad en el pronóstico de los índices de sequía SPI3 a uno, dos y tres meses usando redes neuronales.

Pronóstico a 1 mes Estación El Varejonal Año 2015



Pronóstico a 2 meses Estación El Varejonal Año 2015

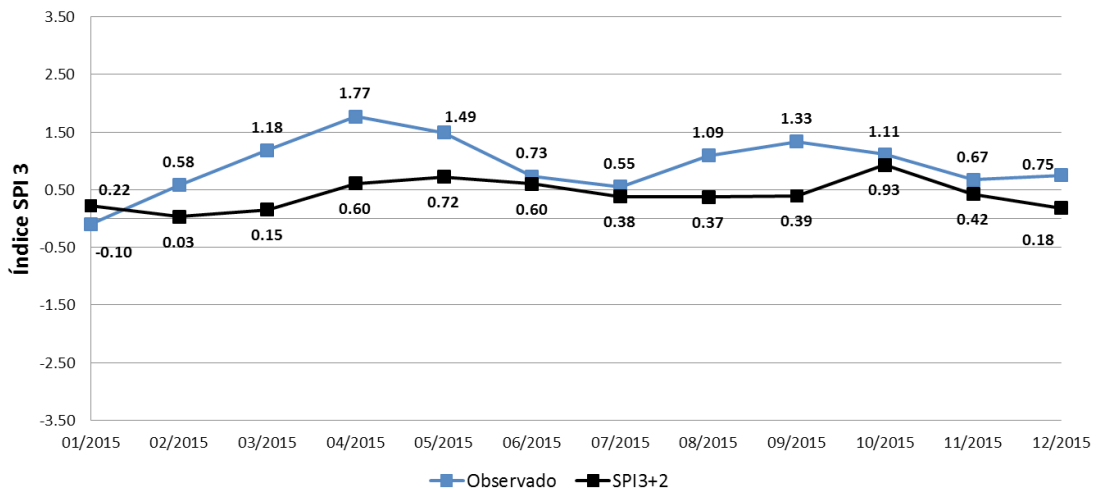


Figura 7. Pronóstico de SPI3 con 1, 2 y 3 meses de antelación con respecto al valor observado para la estación El Varejonal en el año 2015.

En la Tabla 3 y Figura 8 se presenta el pronóstico de la sequía meteorológica para la localidad de El Varejonal para el índice PDSI durante todos los meses del año 2015. El de enero se realizó para los meses de febrero, marzo y abril; en febrero para los meses marzo, abril y mayo, y así sucesivamente hasta diciembre.

La verificación de la precisión de los pronósticos se presenta en la Tabla 4. Se debe destacar que el coeficiente de determinaciones siempre igual o

superior a 0.68 para pronósticos con un mes de antelación en las estaciones Culiacán, Sanalona y Varejonal, localizadas en la zona centro del OCPN; en cambio para la estación Huites, localizada en la zona norte del Organismo, el coeficiente es muy bajo con valores inferiores a 0.46 para los pronósticos a 2 y 3 meses.

Los coeficientes altos indican una buena correlación entre el índice de sequía calculado con los datos del mes y el valor pronosticado mediante

Tabla 2. Coeficiente de determinación (R²), Índice de concordancia de Willmott (d), error absoluto medio (MAE), error cuadrático medio (RMSE), y porcentaje del error cuadrático medio (%MRSE) entre valores calculados y pronosticados del SPI3 mensual para las estaciones Culiacán, Sanalona, El Varejonal y Huities en el año 2015 (n=12).

Fecha	Índice SPI 3 Estación El Varejonal			Índice SPI 3 Estación Culiacán			Índice SPI 3 Estación Sanalona			Índice SPI 3 Estación Huities							
	Obs.	SPI3+1	SPI3+2	SPI3+3	Obs.	SPI3+1	SPI3+2	SPI3+3	Obs.	SPI3+1	SPI3+2	SPI3+3	Obs.	SPI3+1	SPI3+2	SPI3+3	
ene-15	-0,10	-0,07	0,22	0,40	0,05	0,33	-0,02	-0,04	-0,01	-0,08	-0,30	0,04	0,04	-0,47	0,50	0,36	
feb-15	0,58	0,03	0,03	0,31	0,32	0,11	0,42	0,15	0,52	0,04	-0,03	-0,26	-0,26	-0,02	-0,55	0,42	
mar-15	1,18	0,65	0,15	0,13	1,00	-0,05	-0,23	0,09	1,51	0,63	0,09	0,02	0,02	0,72	0,63	-0,15	
abr-15	1,77	1,13	0,60	0,23	1,64	0,78	-0,16	-0,31	2,22	1,44	0,59	0,08	0,08	1,32	0,56	0,22	
may-15	1,49	1,17	0,72	0,28	1,77	1,49	0,73	-0,19	2,79	1,78	1,11	0,39	0,39	1,27	1,20	0,32	
jun-15	0,73	0,90	0,60	0,35	0,70	1,40	1,14	0,43	1,01	1,95	0,95	0,52	0,52	1,02	0,93	0,25	
jul-15	0,55	0,30	0,38	0,24	-0,28	0,28	0,94	0,73	1,14	0,10	1,07	0,15	0,15	1,71	0,20	0,57	
ago-15	1,09	0,36	0,37	0,21	0,42	-0,41	0,09	0,62	0,43	0,36	-0,28	0,34	0,34	2,05	1,53	0,48	
sep-15	1,33	1,09	0,39	0,60	0,66	0,48	-0,18	0,30	0,40	0,47	0,40	0,05	0,05	2,19	1,72	0,13	
oct-15	1,11	1,00	0,93	0,27	1,89	0,88	0,67	0,18	0,62	0,19	0,28	0,37	0,37	1,44	1,39	0,95	
nov-15	0,67	0,51	0,42	0,47	1,48	1,36	0,64	0,43	1,07	0,58	-0,01	0,14	0,14	1,33	0,90	0,53	
dic-15	0,75	0,36	0,18	0,18	1,69	1,07	1,04	0,40	1,29	0,92	0,50	-0,04	-0,04	0,72	0,98	0,61	
	R ²	0,7067	0,2324	0,0271	R ²	0,3947	0,0183	0,1958	R ²	0,5346	0,4180	0,0415	0,0415	R ²	0,5346	0,4180	0,0415
	d	0,8157	0,5447	0,4147	d	0,7371	0,4261	0,3551	d	0,7867	0,6043	0,4454	0,4454	d	0,7867	0,6043	0,4454
CDE	MAE	0,3440	0,5671	0,7070	MAE	0,5581	0,8152	0,9149	MAE	0,5518	0,7187	0,9405	0,9405	MAE	0,5518	0,7187	0,9405
	RMSE	0,4049	0,6638	0,8096	RMSE	0,6447	0,9565	1,1356	RMSE	0,6560	0,9264	1,1976	1,1976	RMSE	0,6560	0,9264	1,1976
	%RMSE	43,5788	71,4417	87,1361	%RMSE	68,2192	101,2190	120,1713	%RMSE	60,6039	85,5804	110,6371	110,6371	%RMSE	60,6039	85,5804	110,6371

Tabla 3. Pronóstico del PDSI a 1, 2 y 3 meses de la estación Varejonal, año 2015

Estación El Varejonal					
Año	Mes	Índice PDSI			
2015	Enero	Mes	Febrero	Marzo	Abril
		Pronostico	-1,07	-1,12	-1,10
	Observado	0,90	1,20	1,00	
	Febrero	Mes	Marzo	Abril	Mayo
		Pronostico	0,94	0,90	0,97
	Observado	1,20	1,00	0,80	
	Marzo	Mes	Abril	Mayo	Junio
		Pronostico	1,19	1,27	1,29
	Observado	1,00	0,80	1,00	
	Abril	Mes	Mayo	Junio	Julio
		Pronostico	0,98	0,96	1,10
	Observado	0,80	1,00	1,00	
	Mayo	Mes	Junio	Julio	Agosto
		Pronostico	0,75	0,86	0,85
	Observado	1,00	1,00	2,00	
	Junio	Mes	Julio	Agosto	Septiembre
		Pronostico	1,08	1,07	1,06
	Observado	1,00	2,00	2,30	
	Julio	Mes	Agosto	Septiembre	Octubre
		Pronostico	1,03	1,05	1,05
	Observado	2,00	2,30	2,30	
	Agosto	Mes	Septiembre	Octubre	Noviembre
		Pronostico	2,05	2,00	2,01
	Observado	2,30	2,30	2,40	
Septiembre	Mes	Octubre	Noviembre	Diciembre	
	Pronostico	2,23	2,24	2,14	
Observado	2,30	2,40	2,70		
Octubre	Mes	Noviembre	Diciembre	Enero	
	Pronostico	2,42	2,44	2,49	
Observado	2,40	2,70	-0,30		
Noviembre	Mes	Diciembre	Enero	Febrero	
	Pronostico	2,39	2,46	2,51	
Observado	2,70	-0,30	-0,60		
Diciembre	Mes	Enero	Febrero	Marzo	
	Pronostico	2,58	2,49	2,43	
Observado	-0,30	-0,60	-0,50		

las redes neuronales. Los errores entre el valor calculado y el pronosticado no superan los límites de la clase de sequía, excepto para la localidad de Huites y para pronósticos a 2 y 3 meses. Esto significa que, si bien hay diferencias entre ambos valores, el pronóstico corresponde a la misma clase de sequía que el índice calculado para ese mes. Resultados similares fueron presentados por Serio *et al.* (2010) en la evaluación de la precisión del SPI y Ravelo *et al.* (2014) en la evaluación de la precisión del PDSI como indicadores de la ocurrencia de sequías.

En la Figura 9 se ilustra el pronóstico espacial de

la sequía meteorológica mediante el índice PDSI y el comportamiento real de las condiciones hídricas en el OCPN. Los pronósticos se elaboraron para el mes de febrero y se validaron en los meses de marzo, abril y mayo. Para el mes de marzo se pronosticó el estado de sequía de acuerdo al índice PDSI del mes de febrero de 2015 cuando había pequeñas zonas con sequía incipiente en las localidades de Ahome, Tubares, El Dorado y La Estancia. Mientras en el Dorado y La Estancia se presentó una fase de sequía incipiente (índice PDSI-0,3), en Ahome se tuvo normalidad hídrica y en Tubares humedad incipiente. En cambio, en Huites que se

Tabla 4. Coeficiente de determinación (R²), Índice de concordancia de Wilcoff(d), error absoluto medio (MAE), error cuadrático medio (MRSE), y porcentaje del error cuadrático medio (%AMRSE) entre valores calculados y pronosticados del PDSI mensual para las estaciones Culliacán, Sanalona, El Varejonal y Huites para el año 2015 (n=12).

Fecha	Índice PDSI Estación El Varejonal			Índice PDSI Estación Culliacán			Índice PDSI Estación Sanalona			Índice PDSI Estación Huites						
	Obs.	PDSI+1	PDSI+2	PDSI+3	Obs.	PDSI+1	PDSI+2	PDSI+3	Obs.	PDSI+1	PDSI+2	PDSI+3	Obs.	PDSI+1	PDSI+2	PDSI+3
ene-15	-1,10	-0,85	-0,21	-0,43	1,10	-0,84	1,99	2,11	-2,20	-1,94	-1,42	-1,39	-0,90	-0,65	-0,66	-0,33
feb-15	0,90	-1,07	-0,82	-0,21	0,40	-1,69	-1,37	1,79	0,80	-2,11	-1,75	-1,32	0,40	-0,89	-0,77	-0,67
mar-15	1,20	0,94	-1,12	-0,92	0,80	0,38	-1,83	-1,54	2,20	1,18	-1,83	-1,56	0,50	0,23	-1,07	-0,78
abr-15	1,00	1,19	0,90	-1,10	0,60	0,86	0,28	-1,90	1,90	2,58	1,38	-1,57	0,90	0,17	0,09	-1,03
may-15	0,80	0,98	1,27	0,97	0,40	0,61	0,87	0,13	2,20	1,82	2,53	1,08	0,70	0,90	0,13	-0,08
jun-15	1,00	0,75	0,96	1,29	0,50	0,15	0,46	0,71	2,50	2,22	1,68	2,57	0,50	0,72	0,88	0,00
jul-15	1,10	1,08	0,86	1,10	0,00	0,51	0,11	0,49	3,00	2,41	2,08	2,09	2,40	0,26	0,62	0,85
ago-15	2,10	1,03	1,07	0,85	0,60	-0,22	0,37	0,00	2,30	2,87	2,34	1,76	3,40	2,10	0,08	0,63
sep-15	2,30	2,05	1,05	1,06	1,10	0,56	-0,48	0,15	2,40	1,92	2,56	2,06	3,50	3,58	2,06	-0,20
oct-15	2,30	2,23	2,00	1,05	3,50	1,05	0,42	-0,76	3,50	2,21	1,57	2,26	3,80	3,80	3,96	2,49
nov-15	2,40	2,42	2,24	2,01	3,90	4,01	1,07	0,38	3,30	2,97	1,99	1,29	4,40	4,11	3,93	4,06
dic-15	2,70	2,39	2,44	2,14	5,10	3,99	4,17	0,98	3,90	3,18	2,57	1,77	-0,10	4,53	4,37	4,08
ene-16	-0,30	2,58	2,46	2,49	4,60	5,09	4,15	4,19	3,40	3,62	2,84	1,86	0,31	4,66	4,55	1,86
feb-16	-0,60	-0,34	2,49	2,51	3,90	3,98	4,70	3,96	2,80	3,07	3,36	2,58	-1,09	0,20	4,77	2,58
mar-16	-0,50	-0,39	-0,22	2,43	3,70	3,49	3,64	4,31	2,70	2,52	2,72	3,04	-0,97	-1,02	-0,66	3,04
	R ²	0,4407	0,0720	0,0004	R ²	0,7889	0,6082	0,2616	R ²	0,7284	0,4655	0,4242	R ²	0,4918	0,1341	0,0028
	d	0,8197	0,5792	0,3880	d	0,9185	0,8461	0,6912	d	0,8983	0,7552	0,6814	d	0,8427	0,6534	0,4730
CDE	MAE	0,5387	0,9940	1,3312	MAE	0,7730	1,0793	1,5155	MAE	0,6781	1,0562	1,3756	MAE	0,8289	1,5113	2,0687
	RMSE	0,9596	1,4007	1,6694	RMSE	1,0745	1,4815	2,0714	RMSE	0,9523	1,4853	1,7610	RMSE	1,4364	2,1503	2,6895
	%RMSE	94,0813	137,3274	163,6648	%RMSE	53,3711	73,5838	102,8817	%RMSE	41,1650	64,2057	76,1218	%RMSE	126,0042	188,6193	235,9215

Pronóstico a 1 mes Estación El Varejónal Año 2015

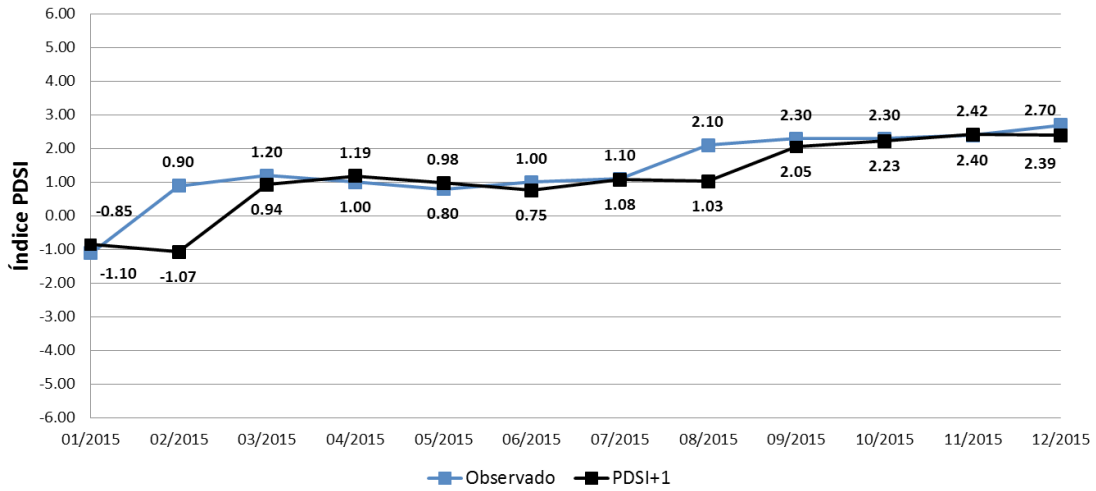


Figura 8. Pronóstico a un mes y cálculo del PDSI en la estación El Varejónal para el año 2015

pronosticó fase de normalidad hídrica se cumplió con el pronóstico; zonas como el norte de Sinaloa en la cuenca del río Fuerte y en la Sierra Madre Occidental se pronosticaron condiciones de humedad en diferentes fases y estas fueron superadas por la realidad, alcanzando una fase de humedad superior a la esperada; lo mismo ocurrió en la zona del río San Pedro en el estado de Durango a excepción de la localidad de Francisco Villa donde fueron coincidentes. En la parte sur del OCPN las condiciones hídricas entre lo pronosticado y lo real fueron similares, principalmente en la zona de las localidades de Rosamorada y Ruiz.

Los resultados del monitoreo y pronóstico de sequías mediante el índice PDSI pueden mejorarse al utilizar los valores de humedad del suelo dinámicos en lugar de valores promedios en sus umbrales. Estos valores dinámicos pueden obtenerse mediante los datos de humedad proporcionados por las imágenes EUMETSAT (SCADO, 2013; EDO, 2016; Ravelo *et al.*, 2016), o con los datos CCI de humedad de suelo satelitales de la ESA (<http://www.esa-soilmoisture-cci.org/node/145>) ó utilizando el índice de humedad de suelo SWI disponible en ESA Copernicus (<http://land.copernicus.eu/global/products/swi>).

Asimismo, el monitoreo y pronóstico de sequías meteorológicas a uno, dos y tres meses puede llevarse a cabo para otras regiones o localidades

de México en particular, o para Latinoamérica en general (Ravelo, 2012; Ravelo *et al.*, 2014; Ravelo *et al.*, 2016).

CONCLUSIONES

- El Sistema Operativo de Sequías (SOS) permite identificar acertadamente las condiciones hídricas extremas que afectan recurrentemente al Organismo de Cuenca Pacífico Norte (OCPN).

- Un número de estaciones climatológicas y la escala a nivel de cuenca utilizada en el SOS permiten lograr una mejor aproximación al fenómeno de la sequía meteorológica. Asimismo, el monitoreo de la sequía a escala regional permite una mejor estimación del riesgo de sequía por municipio, cuenca y consejos de cuenca del OCPN y la determinación de escenarios de sequía puede contribuir a una mejor gestión del riesgo y la respuesta al evento.

- Los pronósticos de sequías meteorológicas mediante el índice PDSI mensual han probado una alta asertividad, por lo que pueden utilizarse en otros modelos de escala múltiple como el SCADO de la Comunidad Europea (UE, 2017; CIIFEN, 2017).

- El modelo de red neuronal Multilayer Perceptron de dos capas pronosticó adecuadamente los

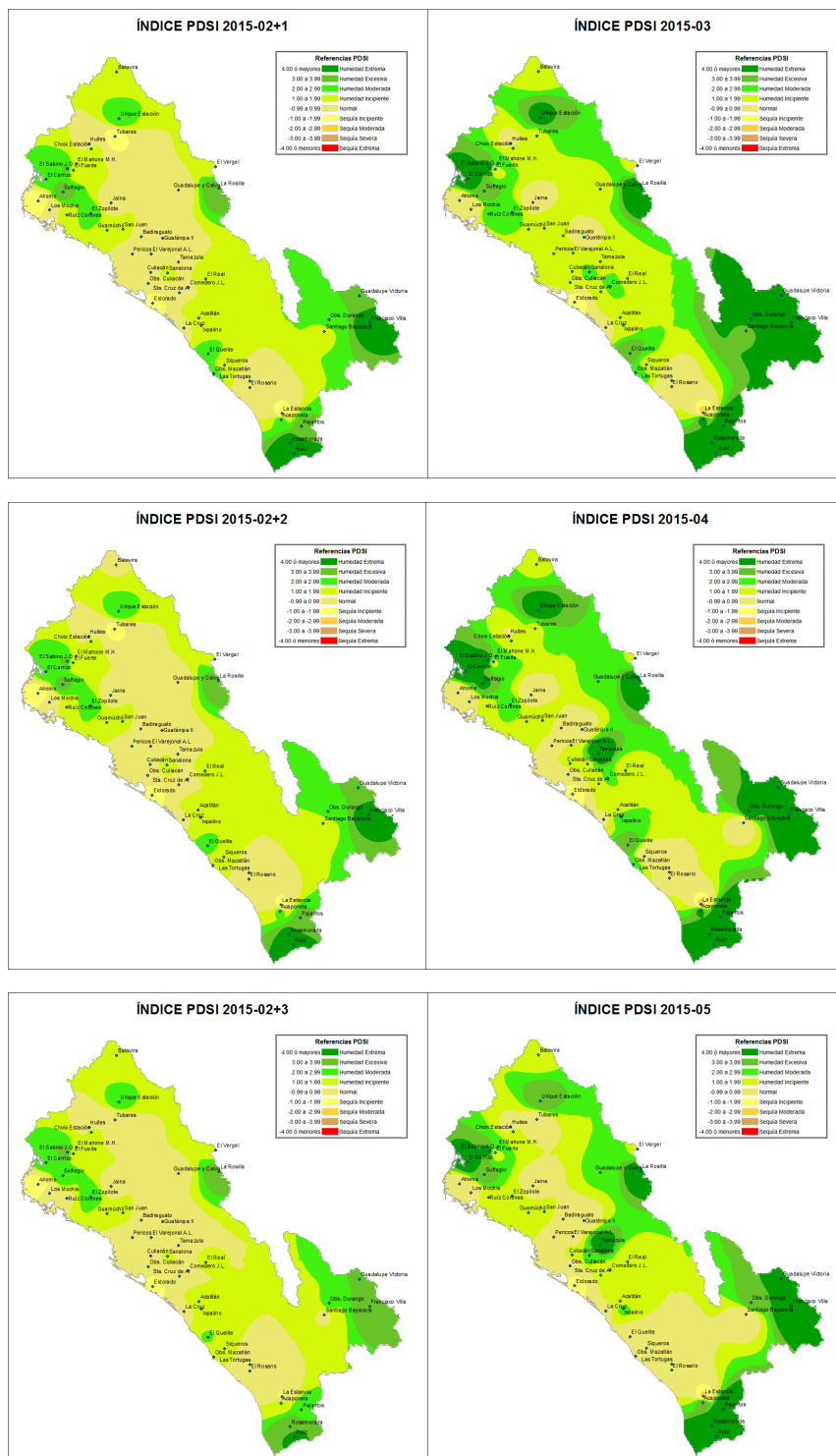


Figura 9. Pronóstico de las condiciones hídricas en el OCPN. PDSI pronosticado en febrero para los meses de marzo, abril y mayo 2015 vs. el PDSI calculado para esos meses

índices de sequía para las localidades de El Varejonal y Sanalona, al obtener coeficientes de determinación de 0.7067 y concordancia de Willmott menores a 0.8157.

- Los resultados del monitoreo y pronóstico de sequías mediante los índices SPI y PDSI pueden servir de insumo para evaluar los impactos ambientales y de degradación de tierras por sequía para condiciones actuales y futuras (INPE, 2013).

BIBLIOGRAFÍA

- Alley, W.M., 1984. The Palmer Drought Severity Index: limitations and assumptions. *Journal of Climate and Applied Meteorology* 23:1100-1109
- Arreguín C., López P.M.A., Ortega G.D., Ibáñez H.O., 2016. La política pública contra la sequía en México: avances, necesidades y perspectivas. ISSN 2007-2422. *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. VII, núm. 5, septiembre-octubre de 2016, pp. 63-76.
- Bocco M., and Ovando, G, 2013. Notas sobre redes neuronales artificiales. CREAN, UNC. 83 páginas.
- CIIFEN, 2017. <http://crc-osa.ciifen.org/> . <http://www.ciifen.org/>
- CONAGUA, 2013. Comisión Nacional del Agua/ Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Organismo de Cuenca Pacífico Norte. Boletines de monitoreo, evaluación y pronóstico de sequías. (<http://www.conagua.gob.mx/ocpn/> Contenido.aspx?n1=2&n2=5&n3 = 11)
- CONAGUA, 2012. Comisión Nacional del Agua/ Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Organismo de Cuenca Pacífico Norte. Informes del estado de las presas.<http://www.conagua.gob.mx/OCPN07/Contenido/Documentos/PRESASgrpn.pdf>.
- CONAGUA, 2014. Comisión Nacional del Agua/ Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Programa de Medidas Preventivas y de Mitigación de la Sequía, Consejos de Cuenca Ríos Presidio al San Pedro, Ríos Mocarito al Quelite y Fuerte al Sinaloa. <http://www.conagua.gob.mx/pronacose/Contenido.aspx?n1=7&n2=54> Consultada el 12/01/2014.
- Department of Water Resources of Yunnan Province, 2011. 2010 bulletin of water resources in Yunnan Province, Kunming, Yunnan, China.
- Domínguez J., 2016. Revisión de las sequías en México: de la explicación divina a la incorporación de la ciencia. ISSN 2007-2422. *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. III, núm. 5, pp. 77-93.
- Douriet J.C., 2010. Caracterización y evaluación de escenarios por sequía en la cuenca y acuífero del río Culiacán. Tesis de Maestría. Consultada el 22/03/2013
- EDO, 2016. <http://edo.jrc.ec.europa.eu/scado/php/index.php?id=3120>
- Florescano E. 2000. Breve historia de la sequía en México (2ª ed.). México, DF: Consejo Nacional para Cultura y las Artes.
- García-Acosta V., 1993. Las sequías históricas de México: desastres y sociedad. *Revista semestral de la Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina*, 1(1), 5-185.
- Hyun S. and Salas J. D., 2000. Regional drought analysis based on neural networks. *J. of Hydrologic Engineering* 5(2):145-155.
- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2013. TerraMa2 Monitoreo Análisis y Alerta. Manual de Instalación.
- Keshavarz M., Karami E., Vanclay F., 2013. The social experience of drought in rural Iran. *Journal of Land Use Policy* 30, 120–129.
- Krose B.J.A.; Van der Smagt P.P., 1993. *An Introduction to Neural Networks*. Eighth edition. University of Amsterdam, 1996.
- Ma M., Song S., Ren L., Jiang S., Song, J., 2013. Multivariate drought characteristics using trivariate Gaussian and Student t copulas. *Hydrol.Process*.27 (8), 1175– 1190.<http://dx.doi.org/10.1002/hyp.8432>.
- Magaña V, 2000. Los impactos de “El Niño” en México. Centro de Ciencias de la Atmósfera UNAM, Dirección General de Protección Civil, Secretaría de Gobernación, México. 229 pp.
- Magaña V. (Editor) 2004. *Los impactos de El Niño en México*. Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México, Secretaría de Gobernación. México, 229 p. http://www.atmosfera.unam.mx/editorial/libros/el_nino/.
- McKee T.B., Doesken N.J., Kleist J., 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. In: *Proceedings of Eighth Conference on Applied Climatology*, Anaheim, CA. American Meteorological Society, Boston, MA, pp. 179–184.
- McKee, T.B., Doesken N.J.y Kleist, J. 1995. Drought monitoring with multiple time scales -Preprints of the 9th Conference on Applied Climatology. Anaheim, California.
- Moradi H.R., Erfanzadeh R., 2001. Investigation of droughts trend in Haraz River Watershed, pp. 283–292.
- Morid S., V. Smakhtin and K. Bagherzadeh, 2007: Drought forecasting using artificial neural networks and time series of drought indices. *Int. J. Climatol.*, 27, 2103–2111.
- North American Drought Monitor (NADM) Workshop, 2016. <https://www.drought.gov/nadm/content/2016-nadm-workshop>.

- National Drought Mitigation Center (NDMC), 2016. What is drought? National Drought Mitigation Center. <http://drought.unl.edu/whatis/what.htm>.
- NeuroDimension, 2014. NEUROSOLUTIONS, versión V4.3.
- NSTC, 2005: Grand challenges for disaster reduction. National Science and Technology Council Rep., 25 pp. [Available online at <http://www.sdr.gov/docs/SDRGrandChallengesforDisasterReduction.pdf>].
- Palmer W.C., 1965. Meteorological droughts. U.S. Department of Commerce Weather Bureau Research Paper 45, 58 pp.
- Qiu J., 2010. China drought highlights future climate threats. *Nature*, 465(7295), 142–143.
- Ravelo A.C., 2007. Monitoreo, evaluación y pronóstico de sequías en el OCPN. Proyecto PREMIA CONAGUA. Informe OMM/PREMIA No. GINT 01/2007. OMM-CONAGUA.
- Ravelo A.C., 2008. Desarrollo de un Sistema Operativo para el Monitoreo, Evaluación y Pronóstico de Sequías (SOS) en el ámbito del Organismo de Cuenca Pacífico Norte (OCPN/CNA), Área de estudio: Cuenca del río Culiacán. Informe OMM/PREMIA No. GINT 02/2008. OMM-CONAGUA.
- Ravelo A.C., 2012. Monitoreo, Pronóstico y Evaluación de Riesgo por Sequía Hidrológica en la RH10 el OCPN; Utilización de información satelital en el monitoreo de las sequías. Informe OMM/PREMIA No. GINT 01/2012. OMM-CONAGUA. 85 págs.
- Ravelo A.C., Douriet, J.C., 2014. Determinación de la Vulnerabilidad y el Riesgo de Sequías en Sinaloa, México. En el International Expert Symposium en Santiago de Chile "Coping with Droughts" 'Building a Community of Practice on Drought Management Tools'.
- Ravelo A.C., Sanz R. & Douriet J.C., 2014. Detección, evaluación y pronóstico de las sequías en la región del Organismo de Cuenca Pacífico Norte, México. *Agriscientia* 31(1):11-24.
- Ravelo A.C.; Planchuelo A.M.; Zanvetor R.E.; Boletta, P.E.C., 2016. Sistema de monitoreo y evaluación de las sequías en Argentina. *Agrometeoros*, Passo Fundo, v.24, n.1, p.113-120.
- Ravelo A.C., Planchuelo A.M., Aroche R., Douriet C.J.C., Hallack A.M., Jimenez R., Maureira H., Peña P.T., Tiscornia G., Zamvetor R., and Zimmermann R., 2016. Monitoreo y Evaluación de las Sequías en América Central, Estudio de Caso: Corredor seco de El Salvador, Honduras y Nicaragua. Serie de Estudios Temáticos EUROCLIMA-acción en desertificación, degradación de tierras y sequías (DDTS). Reporte Técnico del Joint Research Centre de European Commission. JRC Science Hub, <https://ec.europa.eu/jrc>. JRC102117, EUR27974ES. ISBN9789279594106.
- Sanz R.R.; Douriet C. J.C., Ravelo A. y Ornelas S.V.J., 2012. Monitoreo de la sequía 2011-2012 en la RH10-OCPN. XXII Congreso Nacional de Hidráulica. http://www.revistatlatloc.org.mx/amh-congreso/articulos/CambioClimaticoyEventosExtremos/021Art_rsr1.pdf> Consultada el 22/11/2013.
- SCADO 2013. Factsheets of SCADO Indicators. Vegetation Productivity Anomaly (FAPAR Anomaly).: South-Central American Drought Observatory.. Joint Research Center. scado.jrc.ec.europa.eu/.../factsheets/factsheet_fapar.pdf 6 pp.
- Serio, D., Afechtal, M., Attard D., Choueiri, E., Gumus, M., Kaymark, S., 2010. Detection by tissue printing hybridiza SCADO 2013. Factsheets of SCADO Indicators. Vegetation Productivity Anomaly (FAPAR Anomaly). : South-Central American Drought Observatory.. Joint Research Center. scado.jrc.ec.europa.eu/.../factsheets/factsheet_fapar.pdf 6 pp.
- Serio, L; P. Martín y G. Murphy, 2010. Evaluación de una metodología de pronóstico estadístico para la condición hídrica del suelo en la región pampeana argentina. *Agriscientia* 27(1): 11-17.
- Servicio Meteorológico Nacional (SMN), 2016. El uso correcto de términos climáticos. XXX Foro de Perspectivas Climáticas en la República Mexicana y VI Encuentro de Servicios Climáticos, Gerencia de Meteorología y Climatología. CONAGUA. Consultor Oscar Sánchez M.,
- Torrecillas N., Miguel A. Ravelo A., 2013. PMPMS 2013. Programa de Medidas Preventivas y de Mitigación de Sequías de los Consejos de Cuenca de los ríos Fuerte y Sinaloa, Mocolito al Quelite y Presidio al San Pedro. www.conagua.gob.mx.
- UE, 2017.<http://edo.jrc.ec.europa.eu/scado/php/index.php?id=3000>.
- Velasco I., 2002. Plan de Preparación para Afrontar sequías en un Distrito de Riego. Tesis Doctoral. División de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería. UNAM. Campus Cuernavaca Morelos. México.
- Zongxing L., He Y., Wang P., H., Theakstone W.H., An W., Wang X., Lu A., Zhang W., Cao W., 2012. Changes of daily climate extremes in southwestern China during 1961–2008. *Global and Planetary Change*, 80–81, 255–272. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloplacha.2011.06.008>