



“Enseñar la explotación de
la tierra, no la del hombre”

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

POSGRADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

ANÁLISIS Y PRONÓSTICO DE SEQUÍAS EN LA CUENCA DEL RÍO FUERTE, MÉXICO

TESIS

QUE COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y
USO INTEGRAL DEL AGUA**



DIRECCIÓN GENERAL ACADÉMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXÁMENES PROFESIONALES

PRESENTA:

MÓNICA CASTILLO CASTILLO

CHAPINGO, ESTADO DE MÉXICO, DICIEMBRE 2015.



ANÁLISIS Y PRONÓSTICO DE SEQUÍAS EN LA CUENCA DEL RÍO FUERTE, MÉXICO

Tesis realizada por la **C. Mónica Castillo Castillo**, bajo la dirección del Comité Asesor indicado, aprobado por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

DIRECTOR:



DRA. LAURA ALICIA IBÁÑEZ CASTILLO

ASESOR:



DR. RAMÓN ARTEAGA RAMÍREZ

ASESOR:



DR. MARIO ALBERTO VÁZQUEZ PEÑA

DEDICATORIA

Ely y Darío

Marijose y Emmanuel

“Soy el fruto de aquel árbol...”

Gracias por su amor incondicional y por creer siempre en mí... Por dejarme volar y realizar mis sueños... Los amo profundamente

A papá J. Nieves Castillo Alonso †

“Llegaron los camperos con sus guitarras cantando alegres...”

Tu amor por el campo y la naturaleza es una de mis grandes inspiraciones, sé que siempre estarás orgulloso de mí

A Erick

Por tu amor y apoyo incondicional, porque siempre has estado a mi lado... Te amo

A Lety y Arturo

Por su cariño y el apoyo que me han dado, por considerarme parte de su familia

A mis amigos

Miguel H., Jesús G., Leydi G., David S., Egbert C., Fco. Marín., y Josué P., por su apoyo y compañía durante mi vida académica, por los momentos de trabajo y de diversión que compartimos

AGRADECIMIENTOS

Al CONSEJO NACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA (CONACyT) por brindar los recursos económicos para realizar mis estudios de maestría y estancia de investigación.

A la Universidad Autónoma Chapingo que me dio la formación profesional en licenciatura y maestría, por permitirme seguir siendo parte de su gran historia y ser mi hogar durante muchos años.

Al Posgrado Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua por permitirme continuar con mi preparación profesional y por el apoyo brindado durante mis estudios de maestría.

A la PhD. Laura A. Ibáñez Castillo por ayudarme a concebir este proyecto y guiarme siempre con su experiencia y conocimiento. Gracias por toda la confianza que depositó en mí y darme la oportunidad de realizar una estancia de investigación, por brindarme su amistad y por el apoyo profesional y moral que recibí bajo su dirección.

Al Dr. Ramón Arteaga Ramírez por su buena disposición para colaborar en el desarrollo de esta investigación, por sus pertinentes observaciones y recomendaciones para la mejora de este trabajo.

Al Dr. Mario A. Vázquez Peña por su apoyo y disposición para compartir sus conocimientos, y por sus acertadas recomendaciones a este trabajo de tesis.

Al PhD. Juan B. Valdés del Departamento de Hidrología de la Universidad de Arizona por su apoyo durante la estancia de investigación que realicé bajo su asesoría, por los buenos consejos y grandes aportaciones a este trabajo.

A Mayra I. Luna secretaria del Posgrado IAUIA por el apoyo brindado en los procesos administrativos durante la realización de la maestría, por su buena disposición y amistad.

DATOS BIOGRÁFICOS

Mónica Castillo Castillo nació el 11 de marzo de 1989 en Santiago Papasquiaro, Durango. A la edad de 3 años cambió su residencia al Ejido “El Abra”, municipio de El Mante, en el Estado de Tamaulipas.

En sexto grado de Primaria ganó el Primer Lugar Estatal de la Olimpiada del Conocimiento Infantil, obteniendo el derecho de ser la representante de la delegación de Tamaulipas en la Convivencia Cultural 2001 en la Ciudad de México y recibir su reconocimiento de manos del Ex Presidente de la República Vicente Fox Quesada.

Durante su educación secundaria participó en el Concurso Confrontación Académica de Tamaulipas, donde fue acreedora del Primer Lugar Estatal durante los tres años de su formación.

Cursó la educación media superior en el C.E.B. 6/15 “Maestro Lauro Aguirre”, en San José de las Flores, Güémez, Tamaulipas, concluyendo en 2007 como el mejor promedio de su generación.

En julio de 2007 ingresa al Nivel Propedéutico de la Universidad Autónoma Chapingo en la Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas (URUZA) en Bermejillo, Durango. En 2008 ingresa a la carrera de Ingeniería en Recursos Naturales Renovables en el Departamento de Suelos de la UACH perteneciendo en cuatro ocasiones al grupo de Alto Rendimiento Académico, obtuvo su título de licenciatura en junio de 2013 con Mención Honorífica.

En agosto de 2013 ingresó a la Maestría en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua en la Orientación Uso integral del Agua bajo la dirección de la PhD Laura A. Ibáñez Castillo. Durante la maestría realizó una estancia de investigación bajo la asesoría del PhD Juan B. Valdés en el Departamento de Hidrología de la Universidad de Arizona, en Tucson AZ, US.

ANÁLISIS Y PRONÓSTICO DE SEQUÍAS EN LA CUENCA DEL RÍO FUERTE, MÉXICO

ANALYSIS AND FORECASTING OF DROUGHTS IN THE FUERTE RIVER BASIN, MEXICO

Mónica Castillo Castillo¹

Laura Alicia Ibáñez Castillo²

RESUMEN

El análisis de sequías se realizó en el periodo 1961-2011 con los índices SPI y SPEI a escalas de 3, 6, 12 y 24 meses. En el pronóstico se evaluaron cuatro enfoques, con los filtros de Kalman Discreto y Ensemble y dos modelos autorregresivos para evaluar el pronóstico con 1, 2, 3 y 4 meses de adelanto. Los resultados muestran que la intensidad de las sequías es mayor a partir de 1980; el SPEI define mejor los periodos secos y refleja mejor los efectos del cambio climático; las sequías más intensas fueron en 1999-2004 y en 2011. El pronóstico con el enfoque DKF-AR (2) presenta el mejor ajuste en términos de RMSE, Nash-Sutcliffe y R, así como a escala de 12 y 24 meses; el pronóstico a 1 mes de adelanto tiene mejor ajuste que a 2, 3 y 4 meses; el SPEI es más estable que el SPI por lo que presenta mejor ajuste.

Palabras clave: SPI, SPEI, Kalman Discreto, Kalman Ensemble, modelos autorregresivos

ABSTRACT

The drought analysis was conducted in the period 1961-2011 with SPI and SPEI indices, time scales of 3, 6, 12 and 24 months. Forecasting four approaches were evaluated, with Kalman filter and Discrete Ensemble and two autoregressive models to assess the forecast with 1, 2, 3 and 4 months in advance. The results show that the intensity of droughts is greater from 1980; SPEI defined better dry periods and reflects better the effects of climate change; the most intense drought occurred in 1999-2004 and in 2011. The forecasting with DKF-AR (2) approach presents the best fit in terms of RMSE, Nash-Sutcliffe and R as well as of 12 and 24 months; forecast 1 month ahead has better fit than 2, 3 and 4 months; SPEI is more stable than the SPI and thus has better fit.

Keywords: SPI, SPEI, Kalman Discrete, Kalman Ensemble, autoregressive models

TABLA DE CONTENIDO

DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTOS	IV
DATOS BIOGRÁFICOS	V
ÍNDICE DE CUADROS	IX
ÍNDICE DE FIGURAS	X
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS	3
OBJETIVO GENERAL	3
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
CAPITULO 2. ANÁLISIS DE SEQUÍAS EN LA CUENCA DEL RÍO FUERTE	4
1. INTRODUCCIÓN	6
1.1. Las sequías	7
1.2. Tipos de sequías	9
1.3. Índices de sequía	12
1.3.1. Índice Estandarizado de Precipitación (SPI)	14
1.3.2. Índice Estandarizado de Precipitación-Evapotranspiración (SPEI)	16
1.3.3. Clasificación de los índices SPI y SPEI	18
1.4. El cambio climático y la sequía	19
1.4.1. El Niño – Southern Oscillation (ENSO) y la sequía	21
1.4.2. ENSO y la sequía en México	23
2. MATERIALES Y MÉTODOS	25
2.1. Cuenca del río Fuerte	25
2.2. Información básica	33
2.3. Metodología	37
2.3.1. Estimación de datos perdidos	37
2.3.2. SPI	40
2.3.3. SPEI	46
2.3.4. Evolución temporal y distribución espacial de las sequías	52
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	53
3.1. Análisis temporal de las variables climatológicas	53
3.2. Análisis de sequías	56
3.2.1. Parte alta de la cuenca del río Fuerte	58
3.2.2. Parte media de la cuenca del río Fuerte	63

3.2.3.	Parte baja de la cuenca del río Fuerte	66
3.2.4.	Cuenca del río Fuerte	69
4.	CONCLUSIONES	88
5.	LITERATURA CITADA	90
CAPÍTULO 3. PRONÓSTICO DE SEQUÍAS EN LA CUENCA DEL RÍO FUERTE		101
1.	INTRODUCCIÓN	103
1.1.	Pronóstico de sequías	103
1.2.	Filtro de Kalman	106
1.2.1.	Filtro de Kalman Discreto (DKF)	107
1.2.2.	Filtro de Kalman Ensemble o de Conjuntos (EnKF)	110
1.3.	Modelos autorregresivos	112
1.3.1.	Modelos autorregresivos de orden p AR (p)	113
1.3.2.	Modelos autorregresivos con entrada exógena ARX	113
1.3.3.	Formulación en espacio de estados del modelo ARX	114
1.4.	Filtros de Kalman en el pronóstico de sequías	116
2.	MATERIALES Y MÉTODOS	119
2.1.	DKF	120
2.1.1.	DKF – AR (2)	120
2.1.2.	DKF – ARX	123
2.2.	EnKF	127
2.2.1.	EnKF – AR (2)	127
2.2.2.	EnKF – ARX	128
2.3.	Presentación de resultados	129
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	130
3.1.	Pronóstico de sequías en la cuenca del río Fuerte	130
3.2.	DKF	132
3.3.	EnKF	142
3.4.	Comparación DKF – EnKF	151
3.5.	Pronóstico de sequías con 1, 2, 3 y 4 meses de anticipación	158
4.	CONCLUSIONES	170
5.	LITERATURA CITADA	172

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Categorías y clasificación del SPI y SPEI (McKee <i>et al.</i> 1993).	18
Cuadro 2. Estaciones meteorológicas seleccionadas en la cuenca.	36
Cuadro 3. Periodos de sequía obtenidos con el SPI 3.	70
Cuadro 4. Periodos de sequía obtenidos con el SPEI 3.	71
Cuadro 5. Periodos de sequía obtenidos con el SPI 6.	74
Cuadro 6. Periodos de sequía obtenidos con el SPEI 6.	75
Cuadro 7. Periodos de sequía obtenidos con el SPI 12.	78
Cuadro 8. Periodos de sequía obtenidos con el SPEI 12.	79
Cuadro 9. Periodos de sequía obtenidos con el SPI 24.	82
Cuadro 10. Periodos de sequía obtenidos con el SPEI 24.	83
Cuadro 11. Estaciones seleccionadas para la presentación de resultados.	131
Cuadro 12. Resumen estadístico del pronóstico del SPI a cuatro escalas temporales con el DKF - AR2 y DKF - ARX.	133
Cuadro 13. Resumen estadístico del pronóstico del SPEI a cuatro escalas temporales con el DKF - AR2 y DKF - ARX.	134
Cuadro 14. Resumen estadístico del pronóstico del SPI a cuatro escalas temporales con el EnKF - AR2 y EnKF - ARX.	143
Cuadro 15. Resumen estadístico del pronóstico del SPEI a cuatro escalas temporales con el EnKF - AR2 y EnKF - ARX.	144
Cuadro 16. Resumen de estadísticas del SPI de 12 y 24 meses. Enfoques DKF - AR (2) y EnKF - AR (2).	154
Cuadro 17. Resumen de estadísticas del SPEI de 12 y 24 meses. Enfoques DKF - AR (2) y EnKF - AR (2).	156
Cuadro 18. Resumen estadístico del pronóstico del SPI de 12 meses con 1, 2 y 3 meses de anticipación.	159
Cuadro 19. Resumen estadístico del pronóstico del SPEI de 12 meses con 1, 2, 3 y 4 meses de anticipación.	160

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura. 1. Impactos de los diferentes tipos de sequía. National Drought Mitigation Center, University of Nebraska-Lincoln, 2015.	11
Figura. 2. Ubicación de la cuenca del río Fuerte en México y red hidrográfica.	25
Figura. 3. Unidades climáticas presentes en la cuenca del río Fuerte.	26
Figura. 4. Distribución de la precipitación media anual en la cuenca del río Fuerte.	28
Figura. 5. Distribución de la temperatura mínima en la cuenca del río Fuerte.	30
Figura. 6. Distribución de temperatura máxima en la cuenca del río Fuerte.	30
Figura. 7. Red hidrográfica y cuerpos de agua de la cuenca del río Fuerte.	32
Figura. 8. Estaciones meteorológicas en operación y suspensión.	34
Figura. 9. Estaciones seleccionadas para el análisis de sequías.	35
Figura. 10. Transformación de equiprobabilidad de la distribución ajustada a la distribución normal estándar (Edwards and McKee, 1997).	42
Figura. 11. Ejemplo del archivo *.cor de la estación 25044 Huites, Sinaloa.	44
Figura. 12. Interface del SPI.exe para calcular el SPI.	45
Figura. 13. Archivo *.dat generado por el SPI.exe que contiene el SPI.	45
Figura. 14. Estructura de la tabla *.csv para la estación 25044 Huites.	50
Figura. 15. Activación de las paqueterías para calcular el SPEI en RStudio.	51
Figura. 16. Script en RStudio para el cálculo del SPEI.	51
Figura. 17. Vista en Excel de la tabla de salida de la paquetería SPEI.R.	51
Figura. 18. Valor medio mensual por década de las variables que intervienen en el cálculo de los índices SPI y SPEI.	54
Figura. 19. SPI y SPEI de 3 meses para Creel y Guadalupe.	59
Figura. 20. SPI y SPEI de 6 meses para Creel y Guadalupe.	60
Figura. 21. SPI y SPEI de 12 meses para Creel y Guadalupe.	61
Figura. 22. SPI y SPEI de 24 meses para Creel y Guadalupe.	62
Figura. 23. SPI y SPEI de 3 meses para Batopilas.	63
Figura. 24. SPI y SPEI de 6 meses para Batopilas.	64

Figura. 25. SPI y SPEI de 12 meses para Batopilas.	65
Figura. 26. SPI y SPEI de 24 meses para Batopilas.	65
Figura. 27. SPI y SPEI de 3 meses para Bocatoma.	66
Figura. 28. SPI y SPEI de 6 meses para Bocatoma.	67
Figura. 29. SPI y SPEI de 12 meses para Bocatoma.	68
Figura. 30. SPI y SPEI de 3, 6, 12 y 24 meses para Bocatoma, Sin.	68
Figura. 31. SPI y SPEI medio de 3 meses para la cuenca del río Fuerte.	70
Figura. 32. Mes máximo de intensidad de la sequía con el SPI y SPEI de 3 meses.	72
Figura. 33. SPI y SPEI medio de 6 meses para a cuenca del río Fuerte.	73
Figura. 34. Mes de máxima intensidad de la sequía con el SPI y SPEI de 6 meses.	76
Figura. 35. SPI y SPEI medio de 12 meses para la cuenca del río Fuerte.	77
Figura. 36. Mes de máxima intensidad de la sequía con el SPI y SPEI de 12 meses.	80
Figura. 37. SPI y SPEI de 3, 6, 12 y 24 meses para la cuenca del río Fuerte.	81
Figura. 38. Mes de máxima intensidad de la sequía con el SPI y SPEI de 12 meses.	84
Figura. 39. Diferentes componentes de la modelación de sequías (Mishra and Singh, 2011).	104
Figura. 40. Componentes del pronóstico de sequías (Mishra and Singh, 2011).	105
Figura. 41. Algoritmo para el filtro de Kalman Discreto.	109
Figura. 42. Descripción del pronóstico del SPI para L pasos adelante.	125
Figura. 43. Proceso de la estimación de parámetros del modelo por periodos del modelo ARX.	126
Figura. 44. Variantes evaluadas en el pronóstico de los índices de sequía.	130
Figura. 45. SPI de 3 meses observado y el pronosticado por el DKF - AR (2).	135

Figura. 46. SPEI de 3 meses observado y pronosticado por el DKF - AR (2).	135
Figura. 47. SPI de 6 meses observado y el pronosticado por el DKF - AR (2).	136
Figura. 48. SPEI de 6 meses observado y pronosticado por el DKF - AR (2).	136
Figura. 49. SPI de 12 meses observado y pronosticado por el DKF - AR (2).	136
Figura. 50. SPEI de 12 meses observado y pronosticado por el DKF - AR (2).	137
Figura. 51. SPI de 24 meses observado y pronosticado por el DKF - AR (2).	137
Figura. 52. SPEI de 24 meses observado y pronosticado por el DKF - AR (2).	137
Figura. 53. SPI observado vs pronosticado de 12 meses para la estación 8038 Creel, Chih. Enfoque DKF - AR (2).	139
Figura. 54. SPI observado vs pronosticado de 12 meses para la estación Creel, Chih. DKF - ARX (Pt, PET, Tmin y Tmax). De izquierda a derecha y de arriba hacia abajo.	139
Figura. 55. SPEI observado vs pronosticado de 12 meses para la estación 8038 Creel, Chih. Enfoque DKF - AR (2).	140
Figura. 56. SPI observado vs pronosticado de 12 meses para la estación Creel, Chih. DKF - ARX (Pt, PET, Tmin y Tmax). De izquierda a derecha y de arriba hacia abajo.	140
Figura. 57. SPI de 3 meses observado y pronosticado por el EnKF - AR (2).	146
Figura. 58. SPEI de 3 meses observado y pronosticado por el EnKF - AR (2).	146
Figura. 59. SPI de 6 meses observado y pronosticado por el EnKF - AR (2).	146

Figura. 60. SPEI de 6 meses observado y pronosticado por el EnKF - AR (2).	147
Figura. 61. SPI de 12 meses observado y pronosticado por el EnKF-AR (2).	147
Figura. 62. SPEI de 12 meses observado y pronosticado por el EnKF-AR (2).	147
Figura. 63. SPI de 24 meses observado y pronosticado por el EnKF-AR (2).	148
Figura. 64. SPEI de 24 meses observado y pronosticado por el EnKF-AR (2).	148
Figura. 65. SPI observado y pronosticado de 12 meses para la estación 25025 Presa Miguel Hidalgo. Enfoque EnKF - AR (2).	149
Figura. 66. SPI observado vs pronosticado de 12 meses para la estación 25025 Presa Miguel H., Sin. EnKF - ARX (Pt, PET, Tmin y Tmax). De izquierda a derecha y de arriba hacia abajo.	149
Figura. 67. SPEI observado vs el pronosticado de 12 meses para la estación 25025 Presa Miguel Hidalgo, Sinaloa. Enfoque EnKF – AR (2).	150
Figura. 68. SPEI observado vs pronosticado de 12 meses para la estación 25025 Presa Miguel H., Sin. EnKF - ARX (Pt, PET, Tmin y Tmax). De izquierda a derecha y de arriba hacia abajo.	150
Figura. 69. SPI observado, pronosticado e intervalo de confianza al 95 % para 1, 2, 3 y 4 meses de anticipación de la estación Huites.	161
Figura. 70. SPEI observado, pronosticado e intervalo de confianza al 95 % para 1, 2, 3 y 4 meses de anticipación de la estación Huites.	162
Figura. 71. Diagramas de dispersión para el SPI y SPEI para cuatro pasos de adelanto, estación 25044 Huites, Sin.	164
Figura. 72. Distribución de los errores del pronóstico del SPI SPEI a diferentes pasos de adelanto, estación 25044 Huites, Sin.	165
Figura. 73. Diagrama de cajas de la distribución de los errores en los diferentes pasos del pronóstico del SPI y SPEI para la estación Huites.	167

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

La sequía es uno de los fenómenos meteorológicos que causa más estragos a nivel ecológico, económico y social en el mundo. Es un fenómeno extremo que consiste en la nula precipitación o en su reducción por debajo del promedio durante un periodo de tiempo. Los efectos del cambio climático acentúan sus efectos destructivos, tales como su intensidad, severidad y duración.

Los efectos del cambio climático en el planeta provocan un comportamiento errático del clima y la alteración de los ciclos fisicoquímicos globales, esto ha incrementado la frecuencia y severidad de las sequías, así como los efectos adversos que produce. El análisis de sequías consiste en la caracterización del fenómeno mediante índices de sequía. En las últimas décadas se han desarrollado diversos índices para caracterizar y definir las sequías, un índice de sequía es una variable principal para evaluar los efectos de sequía y definir sus diferentes parámetros (Mishra and Singh, 2010).

En las últimas décadas las sequías han mostrado alteraciones tanto en su distribución, como en su intensidad y duración, por lo que se hace necesaria la búsqueda de herramientas para de pronóstico que permitan establecer planes de prevención de sus efectos destructivos, es por ello que el pronóstico de sequías juega un rol muy importante en el control y manejo de los recursos hídricos.

Las técnicas estadísticas de pronóstico constituyen una valiosa herramienta para la producción de pronósticos a partir del análisis de información previa. El filtro de Kalman Discreto (DKF) fue propuesto por Kalman (1960) como una solución recursiva por el método de mínimos cuadrados al problema de filtrado lineal de datos discretos. Éste algoritmo pronostica el nuevo estado a partir de una estimación previa, añadiendo un término de corrección proporcional al error de predicción, de tal forma que este último es minimizado estadísticamente. Por esta razón, si se tiene conocimiento del sistema dinámico, las estadísticas del sistema ruidoso, los errores de medición y las condiciones iniciales, se puede estimar el estado para un sistema dinámico (Gelb, 1974; Simon, 2001; Welch & Bishop, 2006).

En México, la sequía se presenta principalmente en la franja de alta presión de latitud Norte, donde se localizan zonas áridas y semiáridas, coincidiendo latitudinalmente con los grandes desiertos asiáticos y africanos (CENAPRED, 2013). El presente trabajo consistió en el análisis de la sequía en la cuenca del río Fuerte, en el noroeste de México mediante la desarrollo de los índices SPI y SPEI para conocer la distribución temporal y espacial de la sequía. Para el pronóstico de sequías se propuso la implementación del algoritmo del filtro de Kalman Discreto y el Filtro de Kalman Ensemble con dos modelos: uno autorregresivo de segundo orden AR (2) y otro autorregresivo con entrada exógena ARX, como variables exógenas se consideró la precipitación, la evapotranspiración potencial, la temperatura mínima y máxima.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Analizar la sequía histórica en la Cuenca del río Fuerte, ubicada en el norte de México, mediante el desarrollo de los índices de sequía SPI (Índice Estandarizado de Precipitación) y SPEI (Índice Estandarizado de Precipitación-Evapotranspiración), y evaluar la implementación del filtro de Kalman para su pronóstico a corto y mediano plazo.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Desarrollar el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) y el Índice Estandarizado de Precipitación- Evapotranspiración (SPEI) para las estaciones meteorológicas de la cuenca del río Fuerte.

Caracterizar las sequías en la cuenca del río Fuerte temporal y espacialmente con los índices de sequía SPI y SPEI a diferentes escalas temporales.

Implementar el algoritmo del filtro de Kalman Discreto (DKF) y del filtro de Kalman de Conjuntos (EnKF) con un modelo autorregresivo de segundo orden (AR2) y uno autorregresivo con entrada exógena (ARX) para el pronóstico de los índices de sequía de la cuenca del río Fuerte.

Comparar los pronósticos realizados con 1, 2, 3 y 4 meses de anticipación con los diferentes modelos implementados DKF-AR2, DKF-ARX, EnKF-AR2 y EnKF-ARX.

CAPITULO 2. ANÁLISIS DE SEQUÍAS EN LA CUENCA DEL RÍO FUERTE

Mónica Castillo Castillo¹

Laura Alicia Ibáñez Castillo²

RESUMEN

En éste trabajo se realiza un análisis temporal y espacial de la sequía en la cuenca del río Fuerte para el periodo de 1961 a 2012. La cuenca del río Fuerte se ubica al Noroeste de México, en la zona de baja presión donde coinciden en latitud los grandes desiertos del mundo; en dicha cuenca se ubica una zona agrícola bajo riego muy importante. Se calcularon dos índices de sequía: (1) el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) y, (2) el Índice Estandarizado de Precipitación-Evapotranspiración (SPEI); ambos fueron calculados en 14 estaciones del área de estudio para escalas de 3, 6, 12 y 24 meses. Se utilizaron datos de precipitación, temperatura mínima y máxima para el cálculo. Los índices fueron calculados y analizados temporal y espacialmente mediante sus series históricas y mapas de los meses con sequías más intensa. Los resultados mostraron que las sequías han alterado su patrón de ocurrencia y se presentan con mayor frecuencia, intensidad y duración en las últimas décadas. Las sequías que impactan a las presas, ríos y acuíferos se presentan a partir de 1980, y se encontraron dos periodos de sequías extremas, de 1999 a 2004 y del 2011 en adelante. El SPEI define mejor los periodos secos, tiene un comportamiento más estable que el SPI, y muestra una tendencia más clara del aumento en la intensidad de la sequía en los últimos años.

Palabras clave: SPI, SPEI, escala temporal, análisis temporal y espacial de sequías

ABSTRACT

In this research is presented a temporal and spatial analysis of droughts in the Fuerte river basin for the period 1961 to 2012. The Fuerte river basin is located Northwest of México, in the area of low pressure which match the great deserts of the world; in this basin is located an important irrigation farming area. Two index were calculated: (1) the Standardized Precipitation Index (SPI), and, (2) Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI); both index were calculated in 14 stations of the study area for scales of 3, 6, 12 and 24 months. Data of precipitation, minimum and maximum temperatures were used for the index calculation. The indices were calculated and analyzed in time and space through their historical series and maps of months with more intense droughts. Results showed that droughts has altered its occurrence patterns and presents with more frequency, intensity and duration in the last decades. Droughts that impact on dams, rivers and groundwater were presented since 1980, and found two periods with extremes droughts, from 1999 to 2004 and from 2011 onwards. SPEI defines drought periods better and presents a behavior more stable than SPI, moreover shows a clear trend of increase in drought intensity in recent years as a result of reduction on precipitation and increase of temperatures.

Keywords: SPI, SPEI, temporal and spatial drought analysis.

1. INTRODUCCIÓN

Los estudios sobre la variabilidad climática son importantes para el diseño y manejo de los sistemas de recursos hídricos. Pero los sistemas de recursos hídricos han sido planeados y son operados sobre el supuesto de que las características climáticas deben ser similares a las observadas hace 30 años. Recientemente, se ha debatido sobre el aparente incremento en grandes áreas del planeta de los eventos secos y sobre las posibles causas de este fenómeno. Por lo tanto, a fin de evaluar objetivamente la ocurrencia de la sequía y comprender mejor las recientes fluctuaciones climáticas, vale la pena estudiar series de precipitación a largo plazo en regiones con condiciones climático-hidrológicas no homogéneas (Bonaccorso *et al.* 2003)

La incidencia de las sequías, sin importar su severidad, ha venido siendo más común en años recientes en paralelo a los cambios globales del clima. La sequía es un fenómeno gradual, que en casos severos, puede durar por muchos años y puede tener efectos devastadores en las condiciones socioeconómicas, agrícolas y ambientales que pueden ser el resultado de uno o más de los factores de la escasez del agua como precipitación insuficiente, alta evapotranspiración y sobre explotación de los recursos hídricos (Al-Qinna *et al.* 2010).

El análisis de sequías en un sitio determinado tiene como fin conocer las características de los periodos secos que se presentan de acuerdo a los valores de un índice.

1.1. Las sequías

Las sequías son reconocidas como un desastre ambiental, ocurren virtualmente en todas las zonas climáticas, así como en áreas de alta y baja precipitación, y están principalmente relacionadas a la reducción en la cantidad de precipitación recibida en un extendido periodo de tiempo, tal como una estación o un año (Mishra and Singh, 2010).

Las diferencias en las variables hidrometeorológicas y los factores socioeconómicos, así como la naturaleza estocástica de la demanda de agua en las diferentes regiones alrededor del mundo han sido un obstáculo para tener una definición precisa de la sequía y para su investigación, es por ello que se han desarrollado múltiples definiciones para este fenómeno, algunas de las más usadas se mencionan a continuación:

La Organización Meteorológica Mundial (WMO, 1986), menciona que “sequía significa una sostenida y extendida deficiencia de precipitación”.

Secretaría de Naciones Unidas (UN Secretariat, 1994): La sequía es la natural ocurrencia de un fenómeno que existe cuando la precipitación ha estado significativamente por debajo de los niveles normales registrados, causando un serio desbalance hidrológico que afecta negativamente los sistemas de producción de los recursos de la tierra”.

La Organización de Alimentación y Agricultura de la Naciones Unidas (FAO, 1983) define la sequía como “el porcentaje de años cuando los cultivos se pierden por la ausencia de humedad”.

La Enciclopedia del Clima y del Estado del Tiempo (Schneider, 1996) señala a la sequía como “un periodo extendido (una estación, un año o varios años) de deficiencia de lluvia relativa a la estadística media multianual para una región”.

Palmer (1965) describe una “sequía como una significativa desviación de las condiciones hidrológicas normales de un área”. Gumbel (1963) la definió como “el valor anual más pequeño de caudal diario”. Linsely *et al.* (1959) menciona que “una sequía es un periodo de tiempo sostenido sin precipitación significativa”.

Las definiciones de la sequía varían en función de la variable usada para describirlas, pero es posible llegar a un punto común: la escasez o ausencia de precipitación, dado que es el factor más señalado para la aparición de una sequía, la cual es comparada con un comportamiento considerado “normal” que está dado por los valores promedio de su serie histórica.

Sin embargo, también se destacan otros factores que juegan un rol significativo en su ocurrencia como: La temperatura, vientos fuertes, baja humedad relativa, características de las lluvias como su distribución diaria durante la estación de crecimiento de los cultivos, su intensidad y duración, y punto de inicio y término (Mishra and Singh, 2010).

1.2. Tipos de sequías

El Centro Nacional de Mitigación de Sequías de E.U. (NDMC, The National Drought Mitigation Center) (2015a) menciona que en 1985, Wilhite y Glantz, categorizaron las definiciones de sequía en cuatro enfoques básicos, los primeros tres tratan con maneras para medir la sequía como un fenómeno físico, y el cuarto trata la sequía en términos de suministro y demanda, siguiendo los efectos de la escasez mediante los sistemas socioeconómicos.

Sequía meteorológica. Este tipo de sequía es definida usualmente con base en el grado de sequedad (en comparación a una cantidad “normal” o promedio) y la duración del periodo seco, se refiere a una reducción por debajo del promedio de la precipitación. Las definiciones de sequía meteorológica deben ser consideradas como específicas de una región ya que las condiciones atmosféricas que resultan en deficiencias de precipitación son altamente variables de una región a otra. Otras definiciones pueden relacionar las actuales salidas de precipitación a la cantidad promedio en escalas de tiempo mensual, estacional o anual.

Sequía hidrológica. Este tipo de sequía está asociada con los efectos de periodos de escasa precipitación (incluyendo la nieve) en el suministro de agua superficial o subsuperficial (caudal, reservorios y el nivel de lagos, agua subterránea). La frecuencia y severidad de la sequía hidrológica es frecuentemente definida a una escala de cuenca hidrográfica o hidrológica. Usualmente la sequía hidrológica aparece con retraso de la ocurrencia de las

sequías meteorológica y la agrícola, ya que toma más tiempo a las deficiencias de precipitación aparecer en los componentes del sistema hidrológico, tales como humedad del suelo, caudal y agua subterránea y niveles de reservorios.

Sequía agrícola. La sequía agrícola vincula varias características de la meteorológica (o hidrológica) a sus impactos en la agricultura, centrándose en la escasez de precipitación, las diferencias entre la evapotranspiración actual y potencial, la deficiencia de humedad del suelo, agua subterránea reducida o los niveles de reservorios, etcétera. La demanda de agua de la planta depende las condiciones prevalecientes del clima, las características biológicas específicas de la planta, la estación de crecimiento, y las propiedades físicas y biológicas del suelo. La deficiencia de humedad en el suelo puede generar una baja densidad de plantas por hectárea y la reducción de la producción agrícola.

Sequía socioeconómica. La definición de este tipo de sequía está asociado al suministro y demanda de algunos bienes económicos con los elementos de la sequía meteorológica, la hidrológica y la agrícola. El suministro de muchos bienes económicos, tales como el agua, forraje, granos, pescado, y energía hidroeléctrica, dependen del estado del tiempo, y debido a la variabilidad natural del clima estas necesidades pueden satisfacerse unos años y otros no. La sequía socioeconómica ocurre cuando la demanda de un bien económico excede el suministro como resultado de un déficit relacionado al clima en el suministro de agua.

Todas las sequías son originadas por una deficiencia de precipitación o sequía meteorológica, pero los otros tipos de sequía son producto de los efectos en cascada de esta deficiencia. La figura 1 muestra la secuencia de ocurrencia e impactos de la sequía para los tipos de sequía comúnmente aceptados, dado por la influencia de la deficiencia de precipitación y otros factores en su desarrollo.

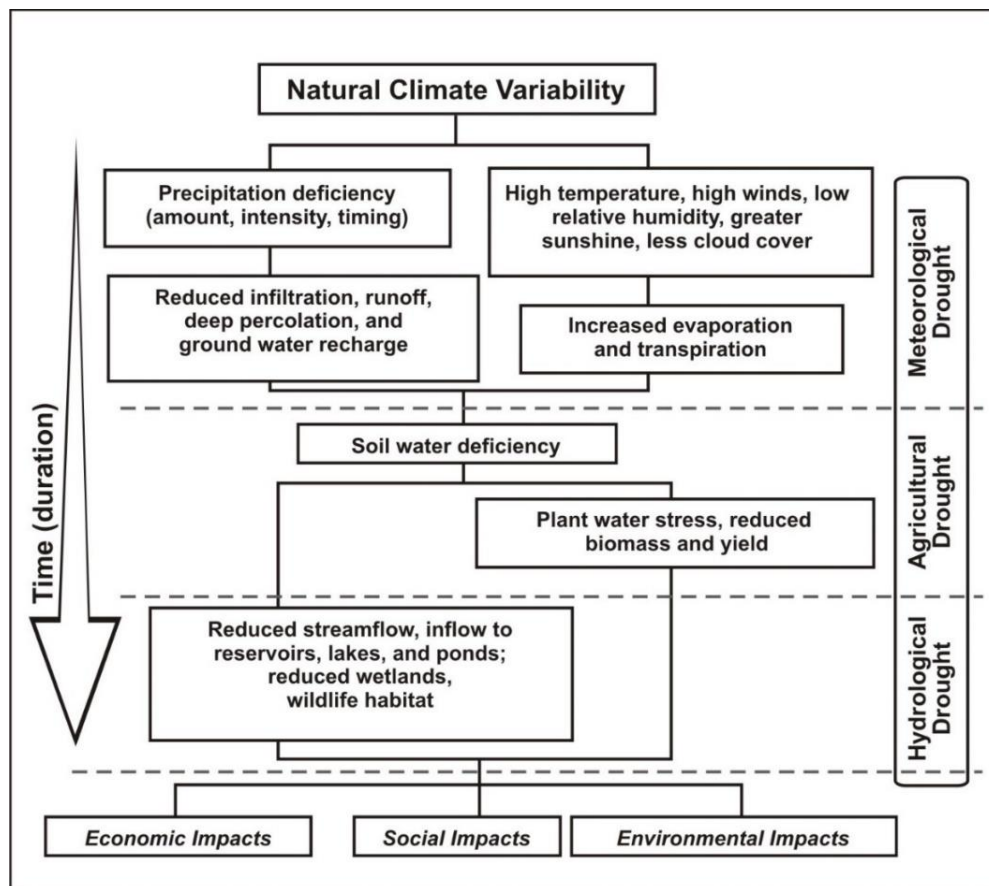


Figura. 1. Impactos de los diferentes tipos de sequía. National Drought Mitigation Center, University of Nebraska-Lincoln, 2015.

1.3. Índices de sequía

Recientemente la sequía ha llamado la atención de ambientalistas, hidrólogos, meteorólogos y agrónomos, debido a los graves daños que ha dejado en diversas partes del mundo, sus esfuerzos se han concentrado en analizar y cuantificar sus características en términos de intensidad, magnitud, duración y extensión espacial, así como en el desarrollo de índices de sequía o en la mejora de los existentes, de tal manera que su cálculo sea más preciso y genere resultados objetivos.

La sequía meteorológica, hidrológica y agrícola están frecuentemente representadas en el sentido de los índices de sequía, estos índices fueron desarrollados para reducir el número de variables que intervienen en una sequía a un simple número, con el propósito de definirlas y compararlas. Los índices más simples hacen uso únicamente de la precipitación media, otros más complejos utilizan, además de la precipitación, algunas otras variables como temperatura, evapotranspiración, pérdida de humedad del suelo y humedad antecedente del suelo (Escalante y Reyes, 2005).

La mayoría de los índices han intentado identificar las características meteorológicas de las sequías, tales como los índices de Thornthwaite, Prescott, Capot-Rey, Bailey, Moral y Palmer, a pesar de sus limitaciones su uso resulta benéfico, debido a que proporcionan una medida comparativa del impacto y de la severidad de las sequías que ocurrieron en varios sitios en diferentes ocasiones (Escalante y Reyes, 1998).

Existen muchos índices para medir la cantidad de precipitación durante un periodo determinado de tiempo que se ha desviado de las normas establecidas históricamente. Aunque ninguno de los principales índices es inherentemente superior al resto en todas las circunstancias, algunos índices se adaptan mejor que otros para ciertos usos, por ejemplo, el Índice de Severidad de Sequía de Palmer (PDSI) ha sido ampliamente usado por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos para determinar cuándo conceder asistencia de emergencia por sequía, pero este índice trabaja mejor en áreas con topografía uniforme, por lo que en regiones montañosas se deben utilizar otros índices (NDMC, 2015b).

En la selección del índice de sequía a desarrollar para un área determinada es necesario conocer cuál es la información disponible y su calidad, el tipo de sequía que cuantifica y su escala espacial (continental, nacional, regional, etc.). Sin embargo, se han generado índices que por su facilidad de cálculo, bajo requerimiento de información, comparabilidad de resultados entre diferentes regiones del mundo y su cálculo bajo diversas escalas temporales, son ahora utilizados por los principales monitores de sequía del mundo, estos índices son: el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) y el Índice Estandarizado de Precipitación-Evapotranspiración (SPEI).

1.3.1. Índice Estandarizado de Precipitación (SPI)

Durante los años recientes varios índices han sido desarrollados para detectar y monitorear la sequía, de entre todos estos uno de los que han sido más usado es el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) (Bonaccorso *et al.* 2003).

El SPI es un indicador de severidad de sequía ampliamente utilizado, fue diseñado por McKee en 1993 para facilitar la detección y monitoreo de sequías (Kim *et al.* 2002). Es un índice basado en la probabilidad de precipitación para cualquier escala de tiempo y está diseñado para cuantificar el déficit de precipitación, es una útil herramienta para estimar la severidad, magnitud, duración y extensión de una sequía (Velasco *et al.* 2004).

El SPI ofrece la capacidad para monitorear las condiciones climáticas sobre un amplio espectro de escalas de tiempo; esto permite comparar periodos secos y húmedos en diferentes lugares; se basa solamente en precipitación, así que la evaluación de la sequía es posible aún si otras mediciones meteoro-hidrológicas no están disponibles (Bonaccorso *et al.* 2003).

En diversas partes del mundo el SPI ha sido utilizado para evaluar la sequía, por ejemplo, Al-Qinna *et al.* (2010) empleó el SPI para realizar un análisis de sequías en Jordania, uno de los tres países del mundo con mayores limitaciones hídricas, encontrando que la severidad de sequía, magnitud y duración se incrementó con el tiempo de niveles normales a extremos especialmente en la última década alcanzando magnitudes de más de 4.

Bonaccorso *et al.* (2003) analizó la variabilidad espacial de la sequía en Sicilia con el SPI, sus resultados sugieren que la isla entera es caracterizada por una variabilidad de la sequía con fluctuaciones multianuales y una tendencia hacia periodos más secos de los años setenta en adelante.

En 2004, Wu y Wilhite, desarrollaron un modelo de evaluación operacional de riesgo de sequía agrícola mediante el SPI y el Índice de Sequía de Cultivo Específico (CSDI), el SPI fue seleccionado por su cualidad multitemporal.

Manatsa *et al.* (2010) realizaron un análisis multidimensional de las sequías agrícolas en Zimbabwe usando el SPI, para el cual emplearon un método empírico de análisis ortogonal para analizar la frecuencia y las características espaciotemporales en un contexto de vulnerabilidad. Los resultados indican que la sequía es un rasgo natural de la región y ocurre de vez en vez en periodos definidos; sin embargo, sequías severas y extremas tienden a concentrarse cerca del final de las series de tiempo.

Por sus múltiples ventajas es ahora utilizado en los principales monitores de sequía del mundo, entre ellos el de Norteamérica y el de México. Además, los expertos del Taller Internacional sobre Índices y Sistemas de Alerta Temprana para Sequías realizado en 2009 en la Universidad de Nebraska-Lincoln, elaboraron y aprobaron la Declaración Lincoln sobre Índices de Sequía (2010), donde recomendaron el SPI para ser utilizado por todos los Servicios Nacional Meteorológico e Hidrológico (NMHSs) de todo el mundo para la caracterización de la sequía meteorológica.

1.3.2. Índice Estandarizado de Precipitación-Evapotranspiración (SPEI)

La mayor crítica al SPI es que su cálculo está basado solamente en datos de precipitación, este índice no considera otras variables que pueden influir en la severidad de la sequía. El SPEI es un índice propuesto recientemente por Vicente *et al.* (2010), en él se incluye, además de la precipitación, datos de temperatura para la estimación de la variable evapotranspiración.

El SPEI combina la sensibilidad del PDSI a los cambios en la demanda evaporativa (causada por los cambios de la temperatura) con la simplicidad de cálculo y la naturaleza multitemporal del SPI. Es particularmente adecuado para detectar, monitorear, y explorar las consecuencias del calentamiento global en condiciones de sequía (Vicente *et al.* 2010).

El SPEI está basado en un balance hídrico climático (precipitación menos evapotranspiración) mensual o semanal, el cual es sometido a un procedimiento de cálculo similar al del SPI. Entre los significantes avances del SPEI es que puede, así como el SPI, ser calculado en diferentes escalas de tiempo para monitorear sequías con respecto a su severidad, duración, punto de inicio, extensión y punto de fin. Pero la principal ventaja del SPEI frente a otros índices de sequía ampliamente usados reside en su capacidad para identificar el rol de la variabilidad de la evapotranspiración y la temperatura en la evaluación de la sequía en el contexto de calentamiento global (Potop-Mozny, 2011).

EL SPEI es un índice de reciente creación por lo que la cantidad de estudios donde es utilizado es mucho menor que la del SPI, que es ampliamente reconocido y utilizado e incluso es el índice empleado por el Monitor de Sequías de Norteamérica.

Sin embargo, cada vez son más los investigadores que ponen su atención en el SPEI obteniendo buenos resultados. Entre ellos, Potop-Mozny, quién en 2011 realizó un estudio sobre la aplicación del SPEI en la República Checa para discutir su uso potencial en la evolución de las sequías. Como resultados encontraron que el SPEI es capaz de detectar una intensificación de la severidad de la sequía debido al incremento de las temperaturas.

Vicente *et al.* (2012) realizaron el desarrollo de índices de sequía para aplicaciones ecológicas, agrícolas e hidrológicas, compararon el desempeño de varios índices de sequía (el SPI, cuatro versiones del Índice de Severidad de Sequía de Palmer, y el SPEI). Encontraron una superior capacidad del SPEI y el SPI para capturar los impactos de la sequía en las variables ecológicas, agrícolas e hidrológicas.

Recientemente, Edossa *et al.* (2014) realizaron un análisis de sequías en la región central de Sudáfrica y su asociación con los eventos de El Niño. En este estudio el SPEI fue utilizado para cuantificar el déficit de precipitación en el tiempo y el espacio a través de la captación para las escalas de tiempo que son importantes para la planeación y el manejo de los recursos hídricos.

1.3.3. Clasificación de los índices SPI y SPEI

Conceptualmente, estos índices representan un valor de z, o el número de desviaciones standard sobre y debajo que un evento está separado de la media. Sin embargo, esto no es exactamente cierto para escalas de tiempo cortas ya que la distribución original de la precipitación está sesgada. A pesar de eso, durante el periodo base para el cual los parámetros gamma (SPI) y log logística (SPEI) son estimados el índice tendrá una distribución normal con media cero y varianza uno (Edwards and McKee, 1997).

Los índices de sequía SPI y SPEI emplean la misma clasificación para las condiciones de sequía, la interpretación de los resultados se realiza con base en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Categorías y clasificación del SPI y SPEI (McKee *et al.* 1993).

VALOR DEL ÍNDICE	CATEGORÍA
> 2.00	Extremadamente húmedo
1.50 a 1.99	Severamente húmedo
1.00 a 1.49	Moderadamente húmedo
-0.99 a 0.99	Cercano a lo normal
-1.49 a -1.00	Moderadamente seco
-1.99 a -1.49	Severamente seco
< -2.00	Extremadamente seco

1.4. El cambio climático y la sequía

Los patrones climáticos globales fluctúan a lo largo de las estaciones, decenios y siglos en respuesta a variables tanto naturales como humanas. La variabilidad natural del clima en distintas escalas temporales obedece a los ciclos y las tendencias de la órbita de la tierra, la radiación solar incidente, la composición química de la atmósfera, la circulación de los océanos, la biosfera, entre otras causas (OMM, 2013).

El clima de la Tierra ha cambiado a través de la historia, sólo en los últimos 650,000 años ha habido 7 ciclos de avance y retroceso glacial, y con el término abrupto de la última era de hielo hace cerca de 7,000 años inició la era climática moderna. Existe evidencia de que estos cambios se están realizando más rápidamente, la tendencia del calentamiento global es de particular significancia porque mucho de este calentamiento es inducido por la actividad humana y avanza a un ritmo sin precedentes en los últimos 1,300 años (NASA, 2015).

El “calentamiento global” se refiere al calentamiento de largo plazo del planeta. Las temperaturas globales muestran un bien documentado incremento desde inicios de siglo XX y más notablemente desde finales de 1970s. Alrededor del mundo, desde 1881 el promedio de la temperatura superficial ha aumentado en cerca de 0.8 °C, en relación a la línea base de mitad del siglo XX (NASA, 2015).

Los rápidos cambios que se han producido desde mediados del siglo pasado se han debido, en gran medida, a las emisiones de gases de efecto invernadero de la humanidad en la atmósfera, y a las modificaciones de la superficie terrestre como la urbanización y la deforestación. Estos patrones climáticos cambiantes, por ejemplo, ponen en peligro la producción de alimentos debido a la alta imprevisibilidad de las precipitaciones, a la contaminación de las reservas de agua dulce por la elevación del nivel del mar, y la propagación de plagas hacia los polos (UNEP, 2015).

Con el incremento de la temperatura global proyectado, se cree que el ciclo global hidrológico se intensificará. Los Modelos Generales de Circulación (General Circulation Models, GCMs) indican que la precipitación global podría incrementarse de 7 a 15 %. Mientras tanto, la evapotranspiración global podría incrementarse de 5 a 10 % (OTA, 1993).

Los impactos combinados del incremento de la temperatura, precipitación y evapotranspiración, afectaría el deshielo, escurrimiento, y las condiciones de humedad del suelo. Los modelos generalmente muestran que la precipitación se incrementará en latitudes altas y decrecerá en latitudes bajas y medias. Por lo tanto, en las regiones medias del continente, la evapotranspiración será más grande que la precipitación y ahí existe un potencial para sequías más severas y más duraderas en estas áreas (NDMC, 2015c).

Los cambios en la variabilidad climática, incluyen eventos extremos más frecuentes y perjudiciales como la sequía, que es uno de los muchos

impactos anticipados del cambio climático (Coelho *et al.* 2009). Según Dilley *et al.* (2005), la mayoría de los riesgos, pérdidas económicas y riesgo de mortalidad relacionados a la sequía residen en los trópicos.

América Latina es una de las zonas más expuesta a amenazas naturales, muchas de las cuáles están dadas por la variabilidad climática, que se manifiesta en intensas sequías, inundaciones y fuertes vientos, se ve exacerbada como consecuencia de la ocurrencia del fenómeno “El Niño”. Debido a la polarización del régimen pluvial, ocurren sequías e incendios de bosques en algunos lugares y lluvias torrenciales, así como deslizamientos de tierra e inundaciones en otros (Clarke, 2000).

1.4.1. El Niño – Southern Oscillation (ENSO) y la sequía

Frecuentemente, la variabilidad natural del clima a corto plazo puede relacionarse con modelos recurrentes de presión atmosférica y circulación oceánica. Por ejemplo, los episodios del El Niño y La Niña son consecuencia de cambios rápidos producidos en la temperatura de la superficie del océano Pacífico ecuatorial. Ambos fenómenos influyen en las características meteorológicas de todo el mundo a través de posteriores interacciones a gran escala y transferencias de calor en el sistema climático acoplado océano-atmósfera. Otras características afectan al clima al fortalecer o debilitar corrientes de aire a gran altitud denominadas corrientes en chorro (OMM, 2013).

El Niño se caracteriza por temperaturas oceánicas inusualmente cálidas en el Pacífico ecuatorial, a diferencia de La Niña, la cual se caracteriza por temperaturas oceánicas inusualmente frías en el Pacífico ecuatorial (NOAA, 2015).

En décadas recientes, los científicos han reconocido que El Niño está vinculado a otros cambios en los patrones del clima global. Uno de los fenómenos estrechamente vinculados al Niño es la Oscilación del Sur (Southern Oscillation, SO), la cual es un sube y baja de presión atmosférica entre el Pacífico ecuatorial y las zonas Indo-Australianas (Glantz *et al.* 1991), durante el evento El Niño – Southern Oscillation (ENSO) la Oscilación del Sur se invierte. Los eventos ENSO son aquellos en los cuales una Oscilación del Sur extrema y El Niño ocurren juntos, lo que generalmente pasa, aunque también pueden ocurrir por separado. El término ENSO es quizás un mejor término que El Niño para propósitos de la comprensión de los patrones climáticos globales (NDMC, 2015d).

Durante el evento ENSO, la sequía puede ocurrir virtualmente en cualquier parte del mundo, aunque los investigadores han encontrado las conexiones más fuertes entre ENSO y la sequía intensa en Australia, India, Indonesia, Las Filipinas, Brasil, partes del Este y Sur de Sudáfrica, las islas occidentales de la cuenca del Pacífico (incluyendo Hawai), Centroamérica y varias partes de Estados Unidos. El noroeste de Sudamérica desde Brasil hasta Venezuela presenta una de las más fuertes relaciones, en 17 eventos ENSO esta región tuvo 16 episodios secos (NDMC, 2015d).

1.4.2. ENSO y la sequía en México

Las principales sequías prolongadas en México durante el siglo XX están relacionadas a veranos secos anómalos, tales como los observados en 1930s, 1950s, 1990s. Las sequías en el norte de México frecuentemente coinciden con condiciones anómalamente húmedas sobre el sur de México y Centroamérica y viceversa, presentando una dominante estructura “sube y baja” en persistentes anomalías de precipitación, mayormente en relación a las anomalías de la temperatura de la superficie del mar (Sea Surface Temperature, SST) (Méndez and Magaña, 2010).

De acuerdo a Mendoza *et al.* (2005), el clima de México está influenciado por la posición y fuerza de los sistemas de alta presión subtropical del Atlántico Norte y el noreste del Océano Pacífico, así como también por la localización de la zona de convergencia intertropical al sur del país. Uno de los sistemas que influye directa y más claramente sobre la fluctuación de la lluvia es la perturbación climática de escala global asociada con el fenómeno El Niño, en una búsqueda sobre la relación entre El Niño y las sequías, Jáuregui (1995) encontró que la más alta frecuencia de sequías reportadas en algunas regiones de México para 1822 – 1987 ocurrieron en los años con El Niño a un 0.5 % de nivel de significancia.

En México, las condiciones de El Niño (La Niña) durante el verano dejan por abajo (por arriba) de la precipitación normal sobre la mayoría del territorio, por lo que El Niño no está asociado con un incremento en la precipitación en

México. Como la disponibilidad de agua en el norte de México es escasa, los impactos de las sequías en esta región son considerados más severos que en el sur, y consecuentemente han sido más profundamente analizadas. En esta forma, sequías severas en el norte de México durante los 1910s, los 1930s, los 1950s, y los 1990s han sido documentadas, mientras que se registraron en 1940s, 1970s o a mediados de los 1980s, condiciones relativamente secas en el centro y sur del país, lo cual contrastó con las condiciones relativamente húmedas en el norte, caracterizando el patrón “sube y baja” en las anomalías de precipitación (Méndez and Magaña, 2010).

Durante el decenio de 2001 – 2010 no se experimentó ningún fenómeno de El Niño importante, que normalmente se relaciona con el calentamiento del clima mundial (como ocurrió en el entonces año cálido récord de 1998). Hasta a mediados de 2006 prevalecieron los episodios de La Niña y las condiciones neutras, seguidos de un breve episodio de El Niño. Las condiciones de enfriamiento de La Niña se repitieron desde finales de 2007 y desde junio de 2009 se produjo un breve episodio de El Niño al que siguió un intenso episodio de La Niña que comenzó a mediados de 2010. Esta variabilidad natural a corto plazo puede haber enmascarado algunos de los efectos del cambio climático a largo plazo (OMM, 2013).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Cuenca del río Fuerte

La cuenca del río Fuerte se localiza en la zona noroeste de México, en los estados de Sinaloa, Sonora, Durango y Chihuahua, como parte de la Región Hidrológica No. 10 Sinaloa. Geográficamente se ubica entre los 25.68° y 28.24° de Latitud Norte, y entre -106.12 ° y -109.43 ° de Longitud Oeste, y tiene un área total de 36,456.6 km² (Figura 2).

El río Fuerte nace en la Sierra Madre Occidental y desemboca al norte del estado de Sinaloa en el Golfo de California, en su parte media y baja se localiza el Valle de El Fuerte, importante zona agrícola de México.

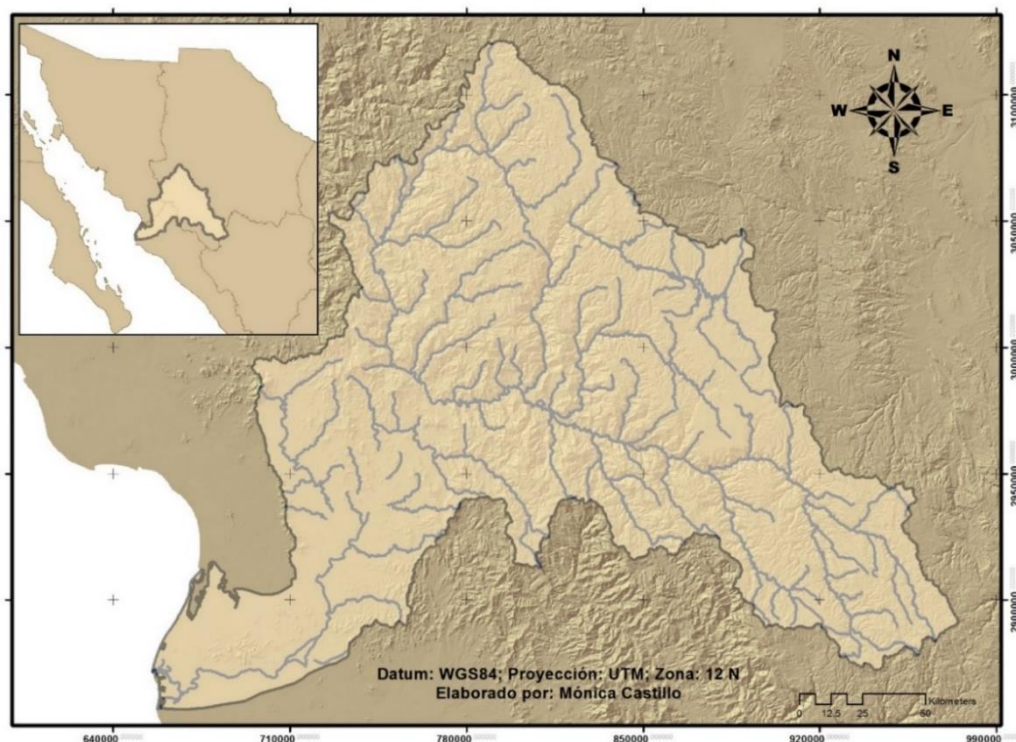


Figura. 2. Ubicación de la cuenca del río Fuerte en México y red hidrográfica.

Climas

El clima en la cuenca del río Fuerte posee una gran variabilidad. En la parte alta el clima es templado, húmedo con régimen de lluvias uniforme, verano fresco y largo; oscilación térmica anual de 0.6 °C a 31 °C. La parte media presenta un clima semiseco, cálido, con lluvias en verano, y oscilación anual de la temperatura mayor de 17 °C. La cuenca baja tiene un clima seco, cálido con lluvias en verano, oscilación anual de la temperatura mayor a 21 °C (PRONACOSE, 2014).

En la figura 3 se observa que en el área de estudio se presentan diversos climas, desde el semifrío subhúmedo hasta el muy seco cálido, debido a su extensión desde la sierra Madre Oriental hasta la llanura costera de Sinaloa.

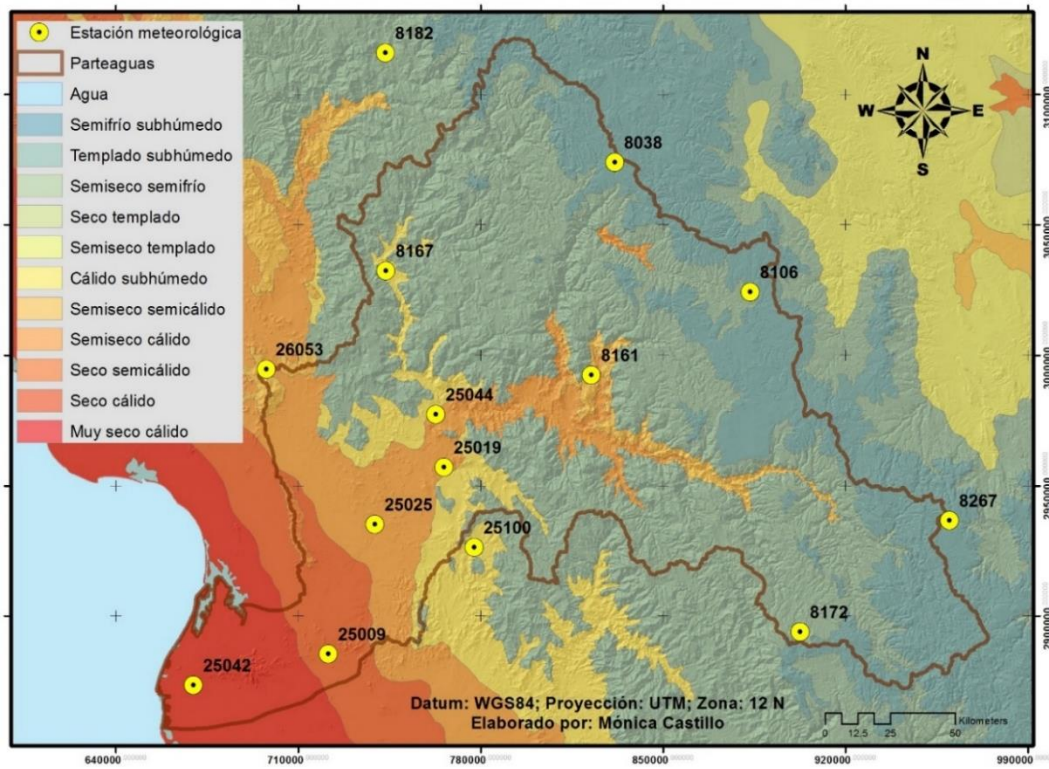


Figura. 3. Unidades climáticas presentes en la cuenca del río Fuerte.

Precipitación

Con base en las Normales Climatológicas del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) para el periodo 1961 – 2012, la precipitación media anual de la cuenca es de 690.7 milímetros determinada con polígonos de Thiessen. En cuanto a la distribución temporal de la precipitación, se tienen definidos dos periodos de lluvias en la zona: las lluvias de verano y las de invierno. Las primeras son producidas por la temporada normal de lluvias y eventos meteorológicos como ciclones, los cuales se presentan con regularidad, generalmente en los meses de julio a septiembre. La segunda etapa lluviosa es producto de los frentes fríos, durante los meses de diciembre a febrero. Por otro lado, el periodo de estiaje ocurre de marzo a mayo. La evaporación media anual es de 2,178 milímetros, es decir, es mayor a la precipitación en un 314% (PRONACOSE, 2014).

La precipitación media en la parte alta de la cuenca presenta valores que van de los 800 a más de 1000 mm, los valores máximos de precipitación se concentran en los meses de julio a septiembre, siendo la lluvia acumulada mayor a 500 mm los cuatro meses del año más lluviosos del año. En la parte media de la cuenca se presenta una precipitación media de 600-800 mm anuales, los meses de máxima precipitación son de julio a septiembre con una lluvia acumulada de 400 a 600 mm en estos meses. En la parte baja la precipitación media anual va de 300 a 600 mm, al igual que para las demás estaciones, los meses de mayor precipitación son de julio a septiembre con una lluvia acumulada en este periodo de 200 a 400 mm.

En la figura 4 se muestra la distribución de la precipitación en la cuenca, las áreas de mayor precipitación se localizan hacia el noroeste y al sureste, en la zona de barlovento de la Sierra Madre Occidental y de mayor altitud de la cuenca (cerca del parteaguas) ambas en el estado de Chihuahua, donde la precipitación media anual está por encima de los 800 milímetros.

En las zonas centro norte y noreste de la cuenca la precipitación se reduce hasta por debajo de los 600 milímetros, esta es la parte de sotavento de la Sierra Madre Occidental donde los vientos ya no llevan suficiente humedad y la precipitación disminuye. En la parte media y baja de la cuenca la precipitación se va reduciendo conforme se acerca a la línea costera donde se presentan láminas anuales menores a 400 milímetros.

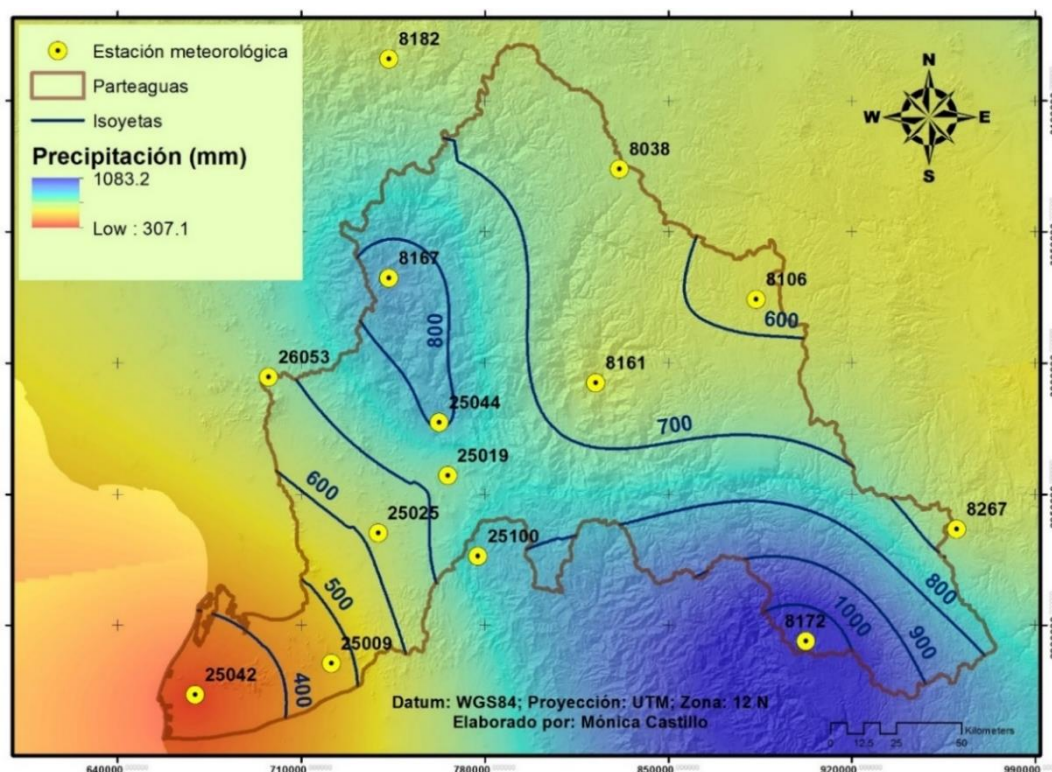


Figura. 4. Distribución de la precipitación media anual en la cuenca del río Fuerte.

Temperatura

La cuenca del río Fuerte presenta gran variedad de topoformas y su rango de altura es de -9 m a 3,168 msnm, por lo que la temperatura media mensual oscile entre 0 °C y 35 °C. La temperatura media de la cuenca es de 19.4 °C, obtenido mediante el método de polígonos de Thiessen con la información de las Normales Climatológicas del SMN.

La temperatura mínima media es de 10.9 °C, y las isotermas de temperatura mínima oscilan entre 0 °C y 18 °C (Figura 5). En la parte media y alta la temperatura disminuye en dirección suroeste – noreste. Mientras que la parte media sigue el patrón de la parte baja, la isoterma de 16 °C se mueve por la zona del valle del Fuerte, la cual es una zona cálida y con altitudes por debajo de los 500 msnm, lo que indica que los vientos mueven masas de aire caliente desde la costa hacia dentro de la cuenca por una ventana orográfica, modificando el comportamiento de las isotermas en esta zona.

La temperatura máxima media de la cuenca es de 28.0 °C, las isotermas oscilan entre 17 °C y 35 °C (Figura 6). Las temperaturas máximas de la parte media a la parte alta disminuyen en dirección suroeste – noreste conforme aumenta la altura sobre el nivel del mar. Pero difiere en la parte media y baja, ya que la zona de mayor temperatura no se presenta cercana a la costa, si no que se localiza en la parte media, esto se debe a que los vientos del océano Pacífico mueven las masas de aire caliente hacia el interior de la cuenca y lo concentran en la zona media.

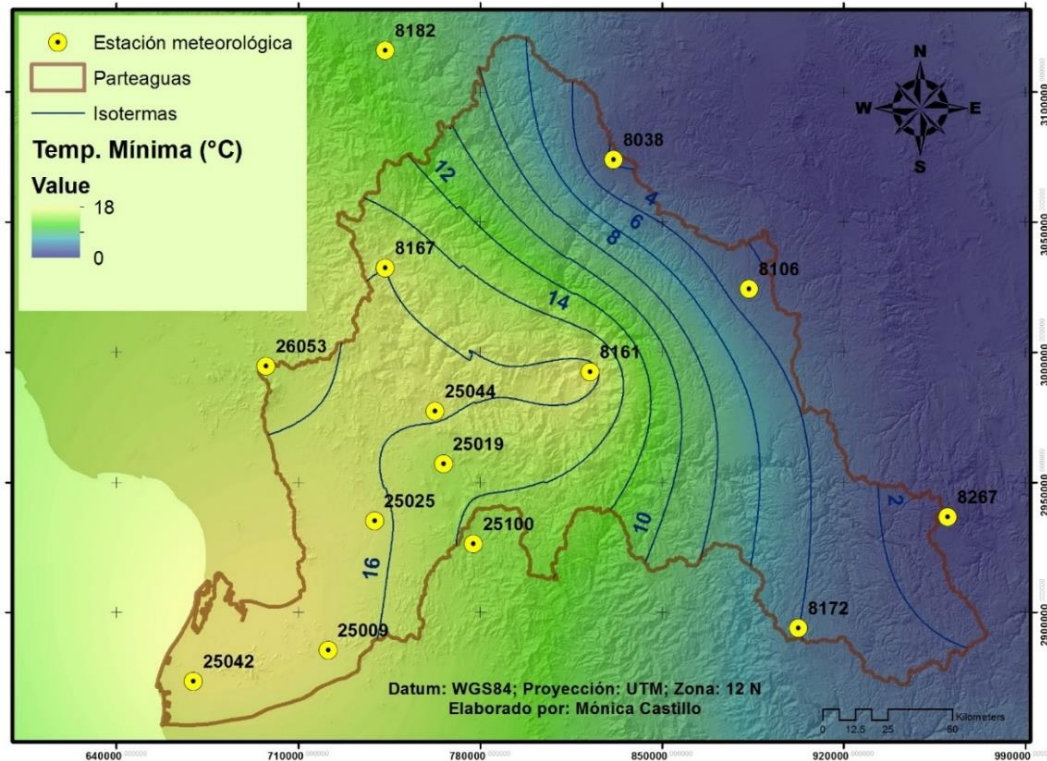


Figura. 5. Distribución de la temperatura mínima en la cuenca del río Fuerte.

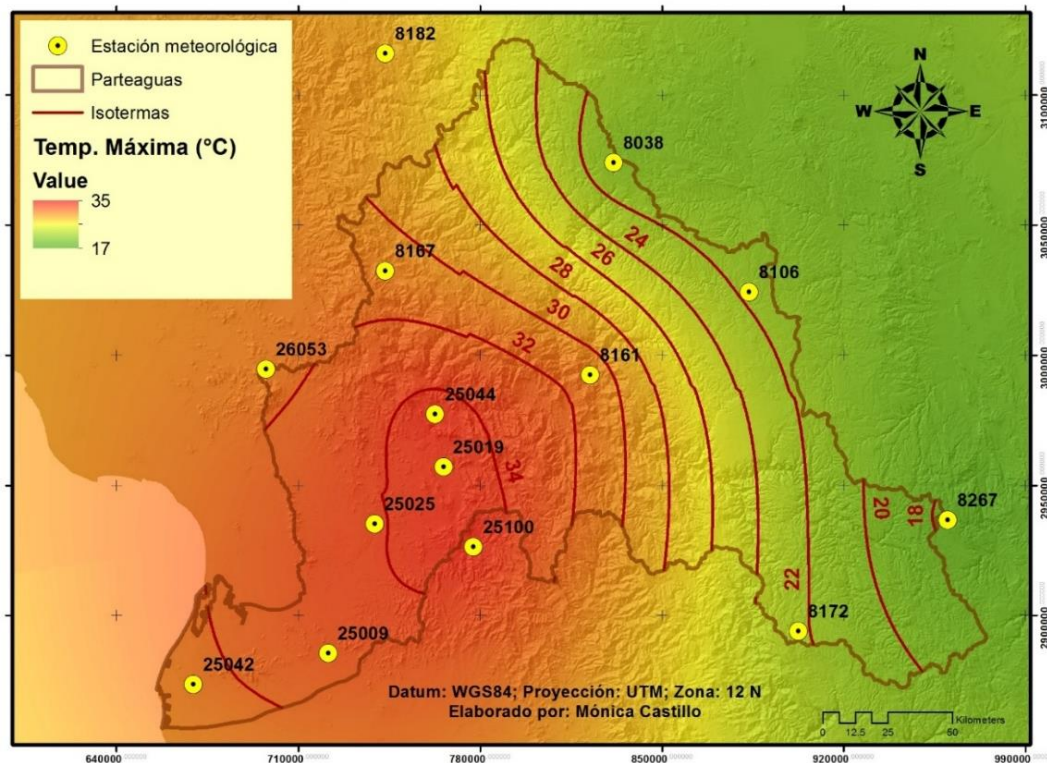


Figura. 6. Distribución de temperatura máxima en la cuenca del río Fuerte.

Hidrografía

La cuenca del río Fuerte es una de las más importantes de la Región Hidrológica No. 10, tanto por su gran extensión superficial, como por el volumen de los escurrimientos que en ella se generan y sus obras hidráulicas.

La subregión hidrológica Río Fuerte abarca las cuencas hidrológicas: Río Fuerte 1, el cual tiene su origen en Durango en la corriente llamada Río Verde, recibe su nombre aguas debajo de la confluencia de los ríos Urique y San Miguel, el volumen de la cuenca es de 129.2 millones de m³ desde su nacimiento hasta la presa Luis Donaldo Colosio (Huites); Río Choix, se origina a 1,837 msnm y se desarrolla dentro de Sinaloa hasta su confluencia con el Río Fuerte 98 km abajo, su superficie de aportación es de 1,403 km² y su volumen disponible es de 9.41 millones de m³ desde su nacimiento hasta donde se localiza la estación hidrométrica Choix; Arroyo Álamos, nace en los límites de Chihuahua y Sonora, su recorrido es de 160 km desde su nacimiento hasta donde se une con el río Fuerte, su volumen disponible es de 3.1 millones de m³ hasta la estación hidrométrica Cazanate; y el Río Fuerte 2 se desarrolla en Sinaloa, su corriente principal es el río Fuerte, tiene una superficie de aportación de 5,326 km² y un volumen disponible de 267.92 millones de m³ desde la presa Huites y las estaciones Choix y Cazanate, hasta su desembocadura al Golfo de California (DOF, 2010).

Las presas son la fuente principal de abastecimiento de agua para uso energético, agrícola, industrial y urbano. En la cuenca se localiza la presa Miguel Hidalgo y Costilla también conocida como “El Mahome” ubicada sobre la corriente del río Fuerte y operada por el Distrito de Riego 075, su agua se utiliza para irrigación y generación de electricidad; la presa Luis Donaldo Colosio llamada “Huites” se ubica sobre el río Fuerte y es operada por la CONAGUA, su uso es irrigación y generación de electricidad; y la presa Josefa Ortiz de Domínguez que se ubica sobre el río Álamos y es también llamada “El Sabino”, es operada por el Distrito de Riego 076 y su agua es utilizada con fines de irrigación (CONAGUA, 2010).

La cuenca del río Fuerte es exorreica con drenaje angulado, el parteaguas tiene una elevación máxima de 3,168 y mínima de -9 msnm (figura 7).

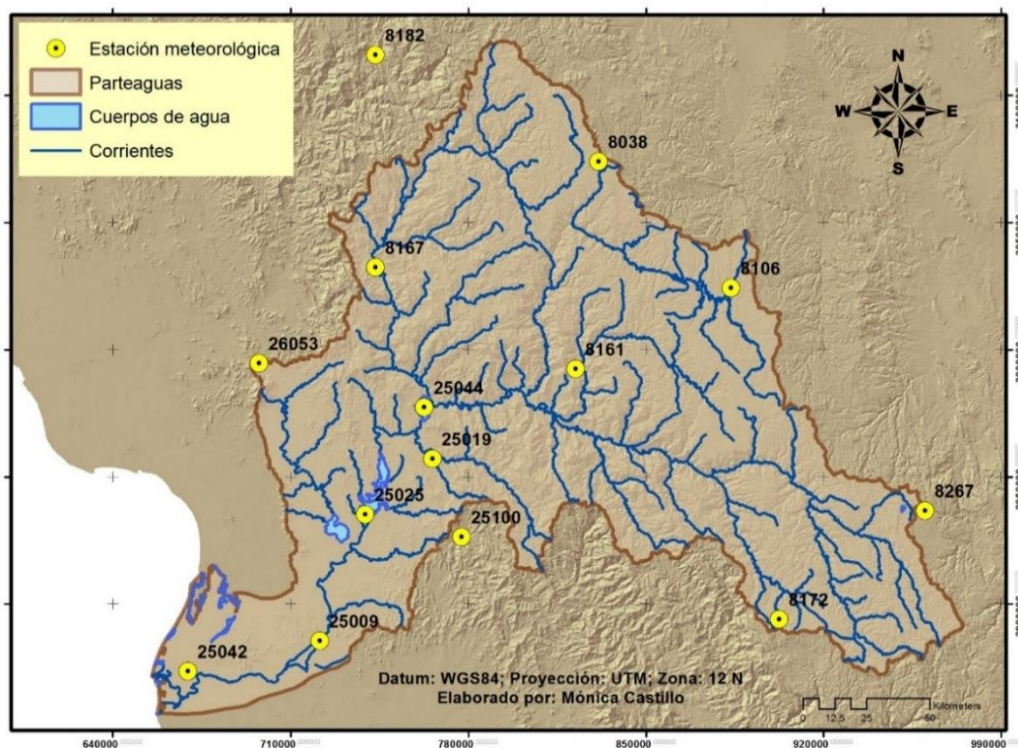


Figura. 7. Red hidrográfica y cuerpos de agua de la cuenca del río Fuerte.

2.2. Información básica

La información cartográfica e hidrológica utilizada en la caracterización física del área de estudio, como modelos de elevación digital, coberturas digitales de cuencas, ríos y presas, etc., se obtuvo del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y la Comisión Nacional del Agua (CNA).

El cálculo de los índices de sequías SPI y SPEI requirió realizar el acopio de información climatológica de las estaciones meteorológicas dentro de la cuenca del río Fuerte y en sus alrededores (figura 7), específicamente los datos mensuales de precipitación y temperatura mínima y máxima, los cuáles fueron extraídos del CLICOM (SMN, 2014) y del ERIC III 2.0 (IMTA, 2009).

Para el cálculo del primer índice, el SPI, se requirió la serie histórica de precipitación mensual con datos completos del periodo comprendido entre los años 1961 a 2011-2012 para las estaciones seleccionadas de la cuenca del río Fuerte, para el cálculo del segundo índice, el SPEI, se requirió de las series completas de precipitación, temperatura mínima y máxima, y la radiación extraterrestre (RA) media de cada mes del año.

En la figura 8 se puede apreciar la ubicación de las estaciones meteorológicas del Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2014) en suspensión y operación en el área de influencia de la cuenca del río Fuerte, de las estaciones que actualmente están operando sólo el 25% contienen series históricas mayores a 30 años, lo cual es un requisito para el cálculo de los índices de sequía (WMO, 2012).

La mayoría de las estaciones en la parte alta y media de la cuenca se encuentran suspendidas al año 2012, esto indica un rezago en la generación de información climatológica que limita la investigación y el conocimiento de las condiciones actuales de la cuenca, lo que es necesario para el adecuado aprovechamiento y administración de sus recursos hídricos.

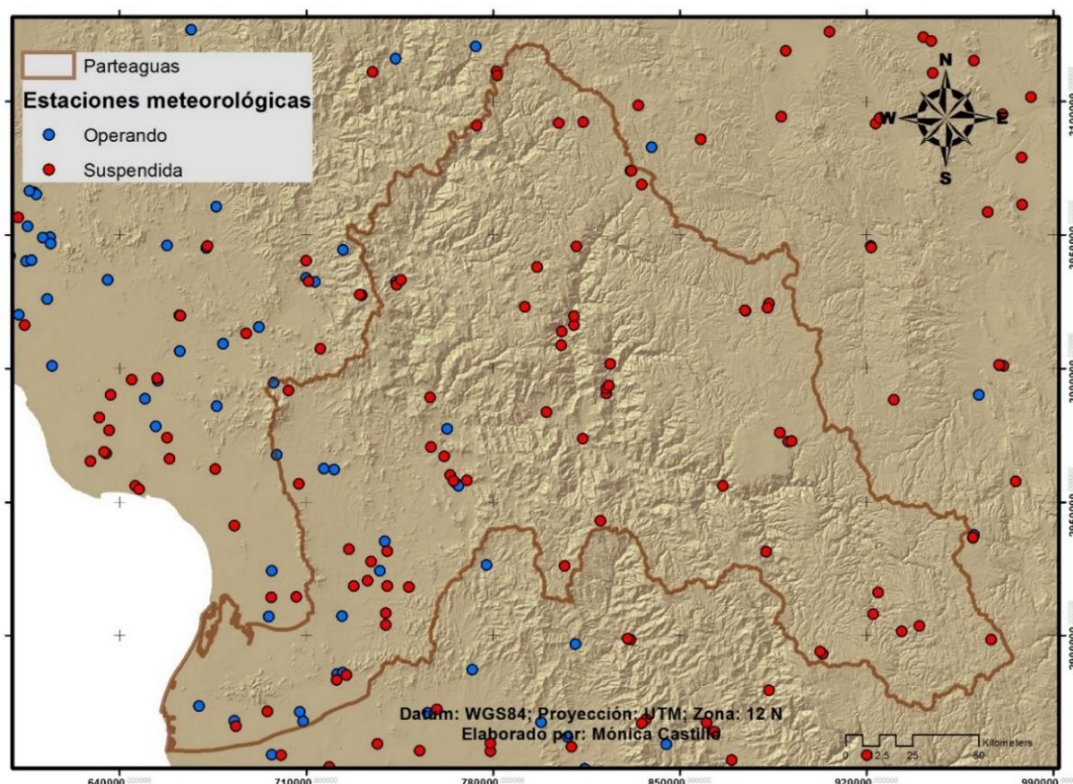


Figura. 8. Estaciones meteorológicas en operación y suspensión.

Se seleccionaron 14 estaciones meteorológicas de los Estados de Sinaloa, Chihuahua y Sonora, se eligieron aquellas con un porcentaje de datos perdidos menor a 25 % y que estuvieran distribuidas por toda el área de la cuenca: parte alta, media y baja (figura 9). Únicamente se aceptó la estación Batopilas con 29.6 % de datos faltantes ya que cerca de ella se localizan las

estaciones 8007 y 8341, a 1.5 y 2 km respectivamente, y presentan datos en los registros faltantes de Batopilas, la corta distancia genera mayor confiabilidad al generar los datos faltantes. Las series de datos corresponden a las siguientes variables meteorológicas: precipitación, temperatura mínima y máxima.

Las series de datos mensuales se obtuvieron para el periodo 1961 – 2011 para las estaciones meteorológicas de Chihuahua y Sonora, y de 1961 – 2012 para las estaciones de Sinaloa.

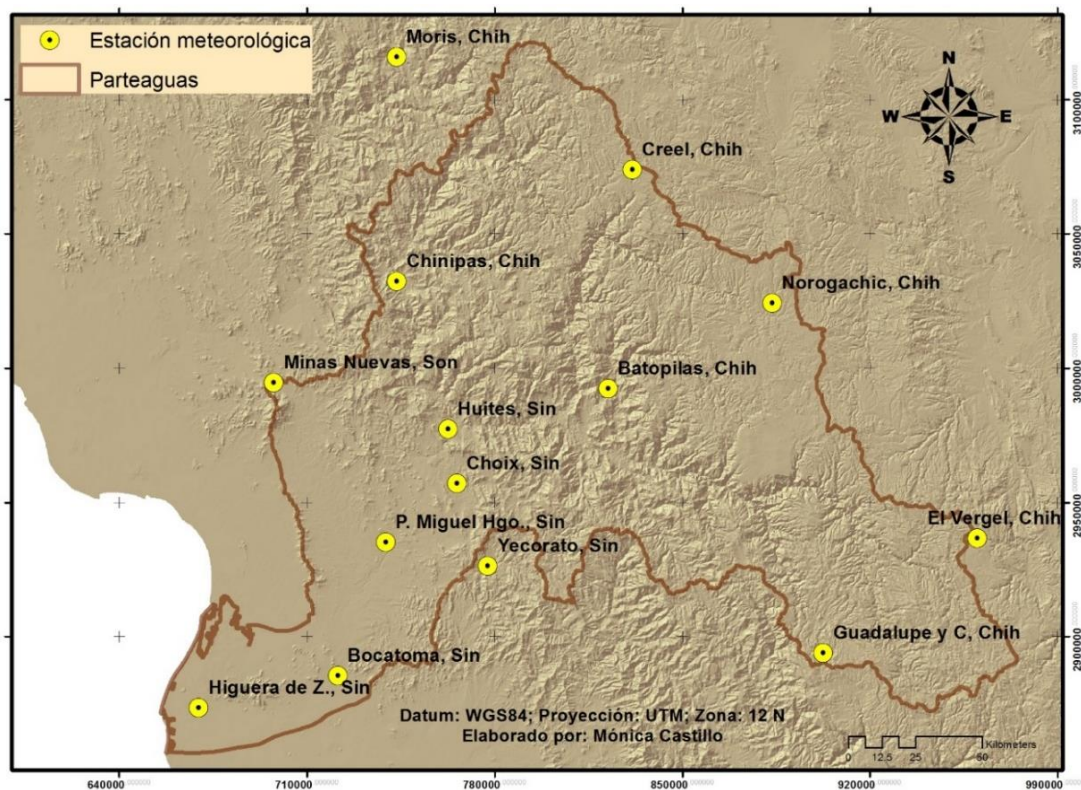


Figura. 9. Estaciones seleccionadas para el análisis de sequías.

El Cuadro 2 presenta las 14 estaciones meteorológicas seleccionadas, están distribuidas en toda el área de la cuenca con el objetivo de conocer la evolución de los índices SPI y SPEI en el periodo de análisis y su distribución espacial representando toda la zona de estudio. Las estaciones están ubicadas en un rango de 10 a 2,348 msnm, con precipitaciones anuales entre 307.1 y 1,083.2 mm; el rango de temperatura media mínima va de 0.6 a 17.3 °C y la máxima entre 17.6 y 34.9 °C, esto nos asegura gran variabilidad de condiciones y una adecuada representación de las características de la cuenca en los resultados.

Cuadro 2. Estaciones meteorológicas seleccionadas en la cuenca.

Clave	Estación	Altitud (msnm)	Pt. media (mm)	T. Mín. (°C)	T. Máx. (°C)	Periodo	% Datos generados
8038	Creel, Chih.	2,348	648.7	1.7	20.2	1961 – 2011	10.8
8106	Norogachic, Chih.	2,088	578.8	2.7	21.6	1961 – 2011	20.7
8161	Batopilas, Chih.	678	603.4	16.7	31.3	1961 – 2011	29.4
8167	Chinipas, Chih.	440	838.2	16.0	31.0	1961 – 2011	2.6
8172	Guadalupe, Chih.	2,279	1,083.2	4.0	22.3	1961 – 2011	2.9
8182	Moris, Chih.	754	627.8	11.0	29.4	1961 – 2011	3.1
8267	El Vergel, Chih.	2,740	629.7	0.6	17.6	1961 – 2012	24.8
25009	Bocatoma, Sin.	31	456.6	17.0	33.0	1961 – 2012	2.6
25019	Choix II, Sin.	239	707.0	14.2	34.2	1961 – 2012	1.9
25025	P. Miguel H., Sin.	144	619.8	16.6	33.8	1961 – 2012	1.3
25042	Higuera, Sin.	10	307.1	17.3	31.5	1961 – 2012	7.9
25044	Huites, Sin.	269	812.7	16.4	34.8	1961 – 2012	2.4
25100	Yecorato, Sin.	400	796.1	13.5	34.9	1961 – 2012	6.1
26053	Minas Nuevas, Son.	480	672.4	15.0	31.2	1961 – 2011	5.7

2.3. Metodología

La metodología que se describe a continuación fue desarrollada para realizar el análisis de la sequía en la cuenca del río Fuerte, México, de los índices de sequía SPI y SPEI. Para desarrollarla se requirió de series de tiempo completas de las variables de interés: precipitación (Pt), temperatura mínima (Tmin) y máxima (Tmax) a nivel mensual, las cuales comprendieron del año 1961 al 2011-2012 (estaciones de Chihuahua-Sonora y estaciones de Sinaloa, respectivamente).

El proceso de análisis de sequía consistió en el desarrollo de los índices de sequía SPI y SPEI de cuatro escalas temporales de las 14 estaciones meteorológicas seleccionadas de la cuenca, las escalas temporales consideradas para el análisis fueron: 3, 6, 12, y 24 meses.

2.3.1. Estimación de datos perdidos

Uno de los problemas que se presenta al utilizar series históricas de información climatológica es que algunos registros no presentan datos. Esto puede ser causado por diversos motivos, ya sea por causa del personal encargado de tomar las lecturas o por la falla del equipo e/o instrumental meteorológico, para resolver este problema se han desarrollado algunos métodos, uno de los más utilizados es el Método del Inverso del Cuadrado de la Distancia o Método del U.S. National Weather Service.

Método del Inverso del Cuadrado de la Distancia o del US NWS

ASCE (1996) propone el método U.S. National Weather Service por su implementación en estudios hidrológicos y geográficos, Aparicio (2001) indica que este método se puede emplear cuando se basa en registros simultáneos de tres estaciones que se encuentran lo más cerca posible a la estación en estudio.

Se generaron datos perdidos de precipitación y temperatura mínima y máxima mensual con el método del Inverso del Cuadrado de la Distancia para las estaciones que presentaron datos faltantes, en este caso las 14 estaciones meteorológicas seleccionadas lo requirieron en menor o mayor medida de acuerdo al Cuadro 2.

Este método considera que el dato faltante de una estación A puede ser estimado con base en los datos observados en las estaciones circundantes, y puede aplicarse para estimar valores diarios, mensuales y anuales faltantes (Campos, 1998).

El procedimiento consiste en ponderar los valores observados en una cantidad W, igual al recíproco del cuadrado de la distancia (D) entre cada estación vecina y la estación A, el dato buscado P_x será igual a:

$$P_x = \sum (P_i - W_i) / \sum W_i \quad (1)$$

Dónde:

P_i , es el dato observado para la fecha faltante, en las estaciones auxiliares circundantes (mínimo 2), en las unidades del dato buscado

$W_i = \frac{1}{D_i^2}$, D_i es la distancia entre cada estación circundante y la estación incompleta, en km

Se procuró seguir la recomendación de utilizar cuatro estaciones auxiliares (más cercanas a la estación con el dato faltante), sin embargo, cuando no fue posible se utilizaron las dos o tres más cercanas a la estación.

Entre los aspectos más importantes relacionados a la sequía están los diferentes tipos de sequía, así como su cuantificación, monitoreo y predicción. En cuanto a su cuantificación, se han desarrollado varias metodologías, de las cuales entre las más populares se encuentran los índices de sequía (De Jesús *et al.* 2014).

Una vez con las series de datos completas para los periodos indicados anteriormente, se procedió a realizar el cálculo de los índices de sequías. Los índices de sequía son elementos importantes y útiles para monitorear y evaluar la sequía, para la cuenca del río Fuerte se desarrollaron los índices SPI y SPEI de 3, 6, 12 y 24 meses de escala temporal.

2.3.2. SPI

El cálculo del SPI para cualquier lugar está basado en registros de precipitación a largo plazo (mayores de 30 años) para un periodo deseado. Estos registros son ajustados a una distribución de probabilidad, la cual es entonces transformada en una distribución normal, tal que la media del SPI para el lugar periodo deseado es cero. Los valores positivos del SPI indican precipitación por arriba de la media, y valores negativos indican precipitación menor a la media. La sequía inicia cuando el valor del SPI es igual o por debajo de -1.0 y termina cuando este valor se vuelve positivo (WMO, 2012).

El SPI se obtuvo para las 14 estaciones meteorológicas con el programa SPI.exe desarrollado en la Lincoln-Nebraska University, la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2012) recomienda este programa para calcularlo.

El desarrollo del proceso que realiza el SPI.exe para el cálculo del SPI tiene sus bases en el procedimiento descrito por Edwards y McKee (1997).

Su cálculo comprende en primer lugar el ajuste de una función de densidad de probabilidad (fdp) del registro de precipitación para cada estación meteorológica. Thom (1966) encontró que la distribución gamma ajusta bien a las series de tiempo de precipitación.

$$g(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} \quad \text{para } x > 0 \quad (2)$$

Dónde

$\alpha > 0$, α es el parámetro de forma

$\beta > 0$, β es el parámetro de escala

$x > 0$, x es la cantidad de precipitación

$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} y^{\alpha-1} e^{-y} dy$, $\Gamma(\alpha)$ denota la función gamma

α y β son estimados para cada estación, escala de tiempo (3, 6 meses, etc.) y mes del año. Las expresiones obtenidas por máxima verosimilitud para estimarlos son:

$$\hat{\alpha} = \frac{1}{4A} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right) \quad y \quad \hat{\beta} = \frac{\bar{x}}{\hat{\alpha}} \quad (3)$$

Dónde

$$A = \ln(\bar{x}) - \frac{\sum \ln(x)}{n}$$

n , número de observaciones de precipitación

$\bar{x}$, precipitación media mensual (media de enero, febrero, etc.), de sumas móviles

x , precipitación de cada mes en cuestión, de sumas móviles

Los parámetros son utilizados para encontrar la probabilidad acumulativa de un evento de precipitación en un mes dado y a la escala en cuestión.

La probabilidad acumulativa está dada por

$$G(x) = \int_0^{\infty} g(x) dx = \frac{1}{\hat{\beta}^{\hat{\alpha}} \Gamma(\hat{\alpha})} \int_0^x x^{\hat{\alpha}-1} e^{-\frac{x}{\hat{\beta}}} dx \quad (4)$$

Haciendo $t = x/\hat{\beta}$ esta ecuación se convierte en la función gamma incompleta

$$G(x) = \frac{1}{\Gamma(\hat{\alpha})} \int_0^x t^{\hat{\alpha}-1} e^{-t} dt \quad (5)$$

Como la función gamma esta indefinida para $x \geq 0$ y la distribución de la precipitación puede contener ceros, la probabilidad acumulativa viene a ser:

$$H(x) = q + (1 - q)G(x) \quad (6)$$

Donde

q , es la probabilidad de un cero. Si m es el número de ceros en una serie de precipitación q puede ser estimada por m/n .

La probabilidad acumulativa, $H(x)$, es entonces transformada a la variable aleatoria Z con distribución normal estándar con media cero y varianza uno, el cual es el valor del SPI (figura 10).

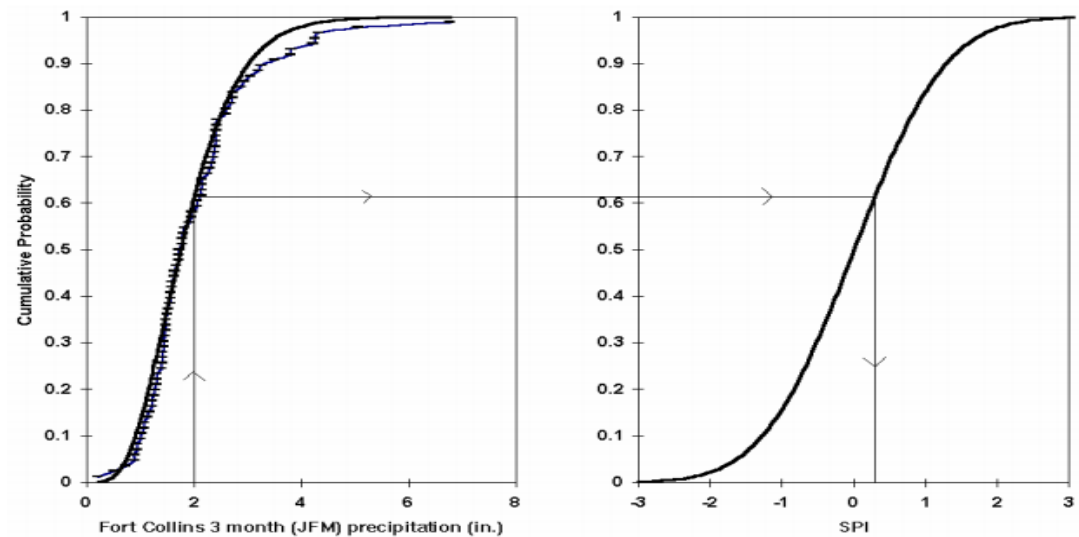


Figura. 10. Transformación de equiprobabilidad de la distribución ajustada a la distribución normal estándar (Edwards and McKee, 1997).

El valor de Z o SPI puede ser fácilmente calculado usando una aproximación dada por Abramowitz y Stegun (1965), que convierte la probabilidad acumulativa en la variable aleatoria normal estándar Z:

$$Z = SPI = - \left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right) \text{ for } 0 < H(x) \leq 0.5 \quad (7)$$

$$Z = SPI = + \left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right) \text{ for } 0.5 < H(x) < 1.0 \quad (8)$$

Dónde:

$$t = \sqrt{\ln \left(\frac{1}{(H(x))^2} \right)} \text{ for } 0 < H(x) \leq 0.5 \quad (9)$$

$$t = \sqrt{\ln \left(\frac{1}{(1.0 - H(x))^2} \right)} \text{ for } 0.5 < H(x) < 1.0 \quad (10)$$

$$c_0 = 2.515517; c_1 = 0.802853; c_2 = 0.010328$$

$$d_1 = 1.432788; d_2 = 0.189269; d_3 = 0.001308$$

Conceptualmente, el SPI representa un valor de Z, o el número de desviaciones estándar que un evento está por arriba o debajo de la media. Sin embargo, este no es exactamente verdadero para cortas escalas de tiempo debido a que la precipitación es sesgada.

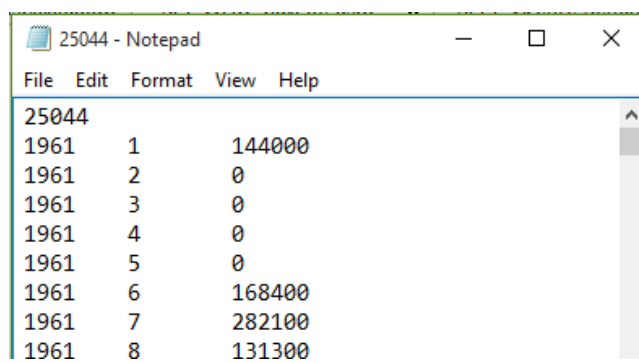
El SPI tendrá una distribución normal estándar con un valor esperado de cero y varianza uno. Tener estos parámetros fijos permite hacer comparaciones de los valores del índice entre diferentes estaciones y regiones.

Para periodos de tiempo mayores a un mes, el procedimiento básico inicial para estimar el SPI es tomar sumas móviles de la precipitación, al disponer de una serie larga y confiable es posible calcular el SPI en cualquier mes del registro para los i meses previos (Velasco *et al.* 2004).

La naturaleza del SPI permite un análisis para determinar la rareza de una sequía o un evento húmedo anómalo a una escala de tiempo particular para cualquier lugar del mundo con registros de precipitación.

El procedimiento anterior fue realizado automáticamente por el SPI.exe mediante los siguientes pasos:

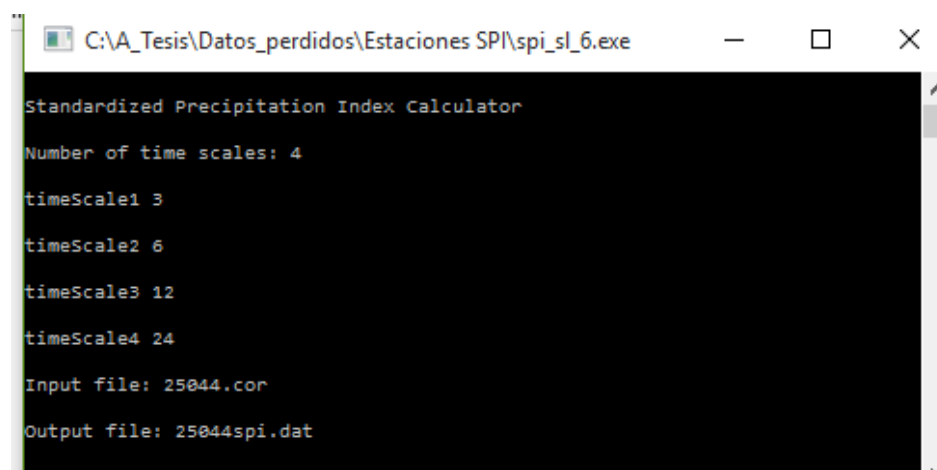
- a. Crear un archivo de texto con extensión ***.cor** que contenga año, mes y precipitación (en milímetros por 1000, el programa no procesa decimales), en la primera línea se coloca el nombre de la estación (figura 11).



25044		
1961	1	144000
1961	2	0
1961	3	0
1961	4	0
1961	5	0
1961	6	168400
1961	7	282100
1961	8	131300

Figura. 11. Ejemplo del archivo ***.cor** de la estación 25044 Huites, Sinaloa.

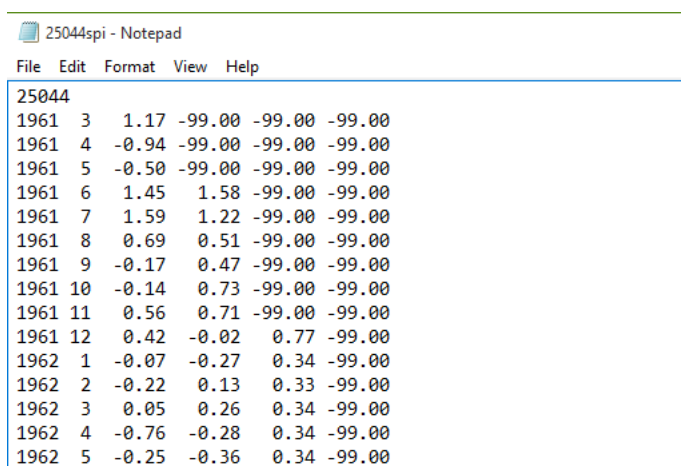
- b. Ejecutar el programa ***spl_sl_6.exe***; introducir el número de escalas a calcular (6 máximo); especificar las escalas de tiempo del SPI (1, 3, 6, 9, 12, y/o 24 meses); ingresar el nombre del archivo de entrada ****.cor*** y especificar el nombre del archivo de salida con extensión ****.dat*** (figura 12)



```
Standardized Precipitation Index Calculator
Number of time scales: 4
timeScale1 3
timeScale2 6
timeScale3 12
timeScale4 24
Input file: 25044.cor
Output file: 25044spi.dat
```

Figura. 12. Interface del SPI.exe para calcular el SPI.

- c. Archivo con extensión ****.dat***, el SPI a las diferentes escalas (figura 13).



25044						
1961	3	1.17	-99.00	-99.00	-99.00	-99.00
1961	4	-0.94	-99.00	-99.00	-99.00	-99.00
1961	5	-0.50	-99.00	-99.00	-99.00	-99.00
1961	6	1.45	1.58	-99.00	-99.00	-99.00
1961	7	1.59	1.22	-99.00	-99.00	-99.00
1961	8	0.69	0.51	-99.00	-99.00	-99.00
1961	9	-0.17	0.47	-99.00	-99.00	-99.00
1961	10	-0.14	0.73	-99.00	-99.00	-99.00
1961	11	0.56	0.71	-99.00	-99.00	-99.00
1961	12	0.42	-0.02	0.77	-99.00	-99.00
1962	1	-0.07	-0.27	0.34	-99.00	-99.00
1962	2	-0.22	0.13	0.33	-99.00	-99.00
1962	3	0.05	0.26	0.34	-99.00	-99.00
1962	4	-0.76	-0.28	0.34	-99.00	-99.00
1962	5	-0.25	-0.36	0.34	-99.00	-99.00

Figura. 13. Archivo ****.dat*** generado por el SPI.exe que contiene el SPI.

En los resultados se observa que las series contienen valores de -99.00, esto no indica la presencia de datos perdidos, sino que esto refleja que el SPI de 3 meses (tercera columna) no puede tener valores para enero o febrero de 1961 porque se necesitan tres meses de precipitación acumulada para poder calcular el valor del índice del tercer mes, es por ello que la serie inicia en marzo de 1961, lo mismo aplica para las siguientes columnas de escala temporal de 6, 12 y 24 meses donde los valores del SPI inician hasta el sexto, doceavo y vigésimo segundo mes de la serie, respectivamente.

2.3.3. SPEI

En el año 2010 Vicente *et al.*, propusieron el Índice Estandarizado de Precipitación Evapotranspiración SPEI como un nuevo índice climático de sequías. El SPEI está basado en datos de precipitación y temperatura, y tiene la ventaja de combinar el carácter multiescalar con la capacidad de incluir los efectos de la variabilidad de la temperatura en la evaluación de la sequía.

El SPEI es fácil de calcular, está basado en el procedimiento de cálculo original del SPI. El SPI fue calculado utilizando precipitación mensual como dato de entrada, mientras que el SPEI utilizó la diferencia entre precipitación y evapotranspiración potencial mensual, lo que representa un balance hídrico climático simple (Thornthwaite, 1948) que fue calculado a diferentes escalas para obtener el SPEI.

El cálculo del SPEI fue realizado con la paquetería SPEI.R para el programa RStudio desarrollada por Beguería y Vicente (2014). Para ello se requirieron los datos de precipitación, temperatura máxima y mínima, así como el dato de latitud de cada estación, y el método seleccionado para el cálculo de la evapotranspiración fue el de Hargreaves (Hargreaves, 1994). El procedimiento es similar al del SPI, pero en lugar de precipitación el SPEI utiliza el valor de la diferencia entre la precipitación y evapotranspiración, y esta diferencia es ajustada a una distribución log-logística.

El procedimiento que realiza la paquetería del SPEI.R para calcular el SPEI está basado en el procedimiento descrito por Vicente *et al.* (2010).

El primer paso, es el cálculo de la evapotranspiración potencial (PET), dentro de la paquetería SPEI.R se incluyen tres métodos diferentes, Thornthwaite, Hargreaves y Penman-Monteith. Los datos de temperatura, ya sea media o máxima y mínima, son utilizadas en este primer paso.

Con el valor de la PET, la diferencia entre precipitación (P_t) y PET para el mes i es calculado usando:

$$D_i = P_i - PET_i \quad (11)$$

El cual provee una simple medida del superávit o déficit para el mes analizado. El valor calculado D_i son agregados a diferente escala de tiempo, siguiendo el mismo procedimiento del SPI. La diferencia $D_{i,j}^k$ en un mes j y año i dado depende del tiempo de escala k seleccionado. Por ejemplo, la

diferencia acumulada para un mes en un particular año i con una escala de 12 meses es calculado usando

$$X_{i,j}^k = \sum_{l=13-k+j}^{12} D_{i-1,l} + \sum_{l=1}^j D_{i,l}, \quad \text{si } j < k \quad y \quad (12)$$

$$X_{i,j}^k = \sum_{l=j-k+1}^j D_{i,l}, \quad \text{si } j \geq k \quad (13)$$

Donde $D_{i,l}$ es la diferencia Pt – PET en el primer mes del año i , en mm.

A diferencia del SPI que es calculado utilizando una distribución de probabilidad gamma de dos parámetros para el ajuste de la precipitación, el SPEI necesita una distribución de tres parámetros para ser calculado. En una distribución de dos parámetros la variable x tiene como límite inferior el cero ($0 < x < \infty$), mientras que una distribución de tres parámetros x puede tomar valores dentro del rango ($\gamma < x < \infty$), donde γ es el parámetro de origen de la distribución; consecuentemente, x puede tener valores negativos, lo cual es común en las series de D .

La distribución log-logística fue seleccionada para estandarizar la serie D y obtener el SPEI. La función de densidad de probabilidad de una distribución de tres parámetros log-logística es expresada de la siguiente manera

$$f(x) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{x - \gamma}{\alpha} \right)^{\beta-1} \left[1 + \left(\frac{x - \gamma}{\alpha} \right)^{\beta} \right]^{-2} \quad (14)$$

Donde α , β y γ son los parámetros de escala, forma y origen, respectivamente, para valores de D en el rango ($\gamma > D < \infty$).

La distribución log-logística está adaptada muy bien a las series de D para todas las escalas de tiempo. La función de distribución de probabilidad para las series de D , de acuerdo a la distribución log-logística, está dada por

$$F(x) = \left[1 + \left(\frac{\alpha}{x-\gamma} \right)^\beta \right]^{-1} \quad (15)$$

Con $F(x)$ el SPEI puede ser fácilmente obtenido como los valores estandarizados de $F(x)$. Por ejemplo, siguiendo la aproximación clásica de Abramowitz and Stegun (1965),

$$SPEI = w - \frac{C_0 + C_1W + C_2W^2}{1 + d_1W + d_2W^2 + d_3W^3} \quad (16)$$

Donde

$$W = \sqrt{-2\ln(P)} \quad \text{para } P \leq 0.5 \quad (17)$$

Y P es la probabilidad de excedencia de un determinado valor de D , $P = 1 - F(x)$. Si $P > 0.5$, entonces P es reemplazado por $1 - P$ y el signo del SPEI resultante es invertido. Las constantes son

$$c_0 = 2.515517; c_1 = 0.802853; c_2 = 0.010328$$

$$d_1 = 1.432788; d_2 = 0.189269; d_3 = 0.001308$$

El valor promedio del SPEI es 0, y la desviación estándar es 1. El SPEI es una variable estandarizada, y por lo tanto puede ser comparado con otros valores del SPEI en cualquier tiempo y espacio. Un SPEI de 0 indica un valor correspondiente al 50 % de la probabilidad acumulativa de D , de acuerdo a la distribución log-logística. La naturaleza del SPEI permite un análisis para determinar la rareza de una sequía o un evento húmedo anómalo a una escala de tiempo particular para cualquier lugar del mundo con registros de precipitación.

El procedimiento anterior fue realizado por la paquetería SPEI.R en el programa RStudio como se describe a continuación:

- Seleccionar un método de cálculo de la PET, se eligió el método de Hargreaves, en función de éste crear la tabla de entrada con los datos necesarios: la precipitación, la temperatura mínima, máxima y la radiación solar extraterrestre (RA), la cual se estima para cada mes del año mediante una función en Matlab ®.
- Crear una tabla con extensión compatible en RStudio, se utilizó la extensión ***.csv** (delimitado por comas). Cada tabla incluyó los campos año, mes, Pt, Tmin, Tmax y RA como se muestra en la figura 14.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	YEAR	MONTH	PRCP	TMIN	TMAX	RA		
2	1961	1	144	13.1	27.2	9.42525474		
3	1961	2	0	9.6	31.4	11.2722326		
4	1961	3	0	11	37.9	13.3906196		
5	1961	4	0	13.8	45.2	15.3490183		
6	1961	5	0	17.3	48.9	16.4213645		
7	1961	6	168.4	21.6	48	16.7724414		
8	1961	7	282.1	22	45.4	16.5656439		

Figura. 14. Estructura de la tabla *.csv para la estación 25044 Huites.

c. En RStudio se activan las paqueterías SPEI.R y Imomco.R (figura 15).

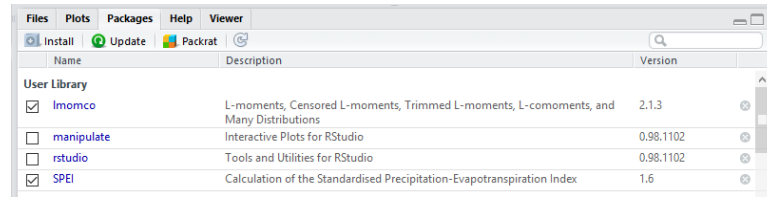


Figura. 15. Activación de las paqueterías para calcular el SPEI en RStudio.

d. Crear el script de cálculo en RStudio, de acuerdo al manual del SPEI Package (Beguería and Vicente, 2014) (figura 16).

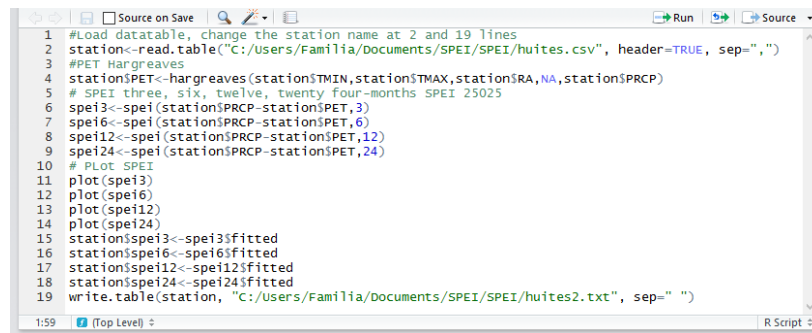


Figura. 16. Script en RStudio para el cálculo del SPEI.

e. Se genera una tabla con extensión *.txt que incluye el valor de la PET, y el SPEI de 3, 6, 12 y 24 meses (figura 17).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	SPEI											
2		YEAR	MONTH	PRCP	TMIN	TMAX	RA	PET	spei3	spei6	spei12	spei24
3	1	1961	1	144	13.1	27.2	9.4252547	38.843373	NA	NA	NA	NA
4	2	1961	2	0	9.6	31.4	11.272233	65.900713	NA	NA	NA	NA
5	3	1961	3	0	11	37.9	13.39062	111.40435	0.957356	NA	NA	NA
6	4	1961	4	0	13.8	45.2	15.349018	155.92827	-1.896034	NA	NA	NA
7	5	1961	5	0	17.3	48.9	16.421364	186.62695	-2.9717467	NA	NA	NA
8	6	1961	6	168.4	21.6	48	16.772441	156.35109	-0.6898984	0.4334925	NA	NA
9	7	1961	7	282.1	22	45.4	16.565644	134.21772	0.1430274	-0.8529797	NA	NA
10	8	1961	8	131.3	22.7	45.8	15.723378	136.34147	-0.5394079	-1.3800909	NA	NA
11	9	1961	9	120.3	22.1	45.5	14.067714	118.81069	-1.2827964	-1.3765948	NA	NA
12	10	1961	10	112.1	18.9	38.2	11.894701	79.866663	-1.0126533	-0.680317	NA	NA
13	11	1961	11	12.6	12.5	31.4	9.8415633	56.583475	0.0972607	-0.4004324	NA	NA
14	12	1961	12	6	11.2	28.8	8.8928372	47.688095	0.2672598	-0.8886822	-0.587145	NA
15	13	1962	1	42	9.1	29.2	9.4252547	53.728109	-0.0398819	-0.8639311	-1.019547	NA
16	14	1962	2	0	10.9	31.7	11.272233	64.946959	-0.2686268	-0.2124659	-0.9818055	NA
17	15	1962	3	2.5	8.8	35.8	13.39062	105.83243	-0.2850294	0.0061006	-0.9483028	NA
18	16	1962	4	0	15	41.5	15.349018	133.38003	-1.2415986	-0.6039672	-0.8574447	NA

Figura. 17. Vista en Excel de la tabla de salida de la paquetería SPEI.R.

2.3.4. Evolución temporal y distribución espacial de las sequías

Una vez obtenidos los resultados para ambos índices durante los periodos de estudio, se procedió a su análisis temporal con el objetivo de conocer la evolución de las sequías a diversas escalas temporales, identificar los periodos de sequía moderada, severa y extrema, definir su intensidad, duración y sus puntos de inicio y término.

Es importante conocer, además de la evolución temporal de las sequías, la distribución espacial de los estados secos más intensos, mediante la interpolación en la cuenca de los resultados puntuales de los índices para los periodos con sequía más intensos presentados en la serie histórica.

Esta representación espacial se realizó con el propósito de conocer cuáles son las áreas más afectadas por este fenómeno y dónde se presenta con mayor intensidad dentro de la cuenca, con fines de planeación y prevención de desastres esta información nos puede indicar las zonas estratégicas de aplicación de medidas preventivas y de mitigación ante la ocurrencia de sequías.

Para conocer la evolución temporal de los índices SPEI y SPEI se desarrollaron scripts en Matlab ®, los cuales muestran la serie histórica de cada índice, para cada escala temporal de cada estación. Por otra parte, la distribución espacial de la sequía para una fecha determinada se realizó en ArcGIS ®, mediante la interpolación de los valores del índice en el área de la cuenca.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Análisis temporal de las variables climatológicas

Se realizó el análisis de las variables que intervinieron en el desarrollo de los índices SPI y SPEI, mediante sus valores medios mensuales en cada década del periodo 1961 – 2011 para las estaciones 8038 Creel y 8172 Guadalupe, 8161 Batopilas y 25009 Bocatoma ubicadas en la parte alta, media y baja de la cuenca, respectivamente. Además, se analizaron las variables de manera general para la cuenca, su valor medio se obtuvo con polígonos de Thiessen.

Este análisis temporal se realizó con el propósito de conocer el comportamiento de la precipitación, el balance $P_t - PET$, la temperatura mínima y máxima en las diferentes décadas de estudio de la presente investigación.

De acuerdo al IPCC (2013), los cambios observados en el sistema climático global comprenden principalmente su calentamiento, desde 1950 muchos de los cambios observados no tienen precedentes en décadas o milenios. La atmósfera y el océano se han calentado, la cantidad de nieve y hielo ha disminuido, el nivel del mar se ha elevado, y la concentración de los gases de invernadero se ha incrementado. Cada una de las últimas tres décadas ha sido, sucesivamente, más caliente en la superficie de la Tierra que cualquier década anterior desde 1850, en el Hemisferio Norte, 1982 – 2012, fue probablemente el periodo de 30 años más cálido de los últimos 1400 años.



Figura. 18. Valor medio mensual por década de las variables que intervienen en el cálculo de los índices SPI y SPEI.

De acuerdo a la figura 18, la precipitación media mensual en las cuatro estaciones varía en cada década. En la estación Guadalupe, la estación con más alta precipitación, se ha reducido la lámina media mensual en casi 40 mm de la década de los 60 a la última de la serie; para las estaciones Creel y Batopilas se redujo en cerca de 10 mm, y en Bocatoma es prácticamente igual que en la década inicial. Se observa un pico máximo en la lámina precipitada mensual en las décadas de los 80s y 90s.

El balance Pt-PET mostró su valor más bajo o más negativo en la última década para las cuatro estaciones, indicando que la PET media mensual en el periodo 2000-2012 ha incrementado su valor a comparación de los años 60s. El mayor cambio se presentó en Guadalupe y el menor en Bocatoma.

En el periodo 2000-2012 la temperatura mínima se incrementó en todas las estaciones a comparación de la década de los 60s, en Creel y Guadalupe el valor medio mensual aumentó, 2.4 °C y 1.5 °C, respectivamente; en cambio, para Batopilas y Bocatoma el aumento fue de 0.9 °C y 0.6 °C, respectivamente.

La diferencia en la magnitud de los cambios nos sugiere que los efectos del calentamiento global se manifiestan más claramente en las partes de altas de la cuenca, donde prevalecen los climas templados y fríos, y en menor medida en los climas cálidos y secos.

La temperatura máxima media mensual ha aumentado gradualmente en tres de las cuatro estaciones, de acuerdo a los valores de la década inicial y final de la serie de estudio, en Creel aumentó 5.3 °C, en Batopilas 2.9 °C y en Bocatoma 0.8 °C; sólo en Guadalupe se observó una reducción en la temperatura máxima en 1.5 °C.

El comportamiento de la estación Guadalupe en la última década puede ser debido a la ocurrencia del fenómeno La Niña, que normalmente se relacionan con la ocurrencia de temperaturas bajas, ya que de acuerdo a la OMM (2013) hasta a mediados del año 2006 prevalecieron los episodios de La Niña y condiciones neutras, estas condiciones de enfriamiento se repitieron en 2007 y 2010. Esta variabilidad natural a corto plazo puede haber enmascarado algunos efectos del cambio climático a largo plazo en la zona más húmeda de la cuenca del río Fuerte.

3.2. Análisis de sequías

Se realizó el cálculo de los índices SPI y SPEI para cada una de las 14 estaciones meteorológicas seleccionadas en la cuenca del río Fuerte, y se obtuvieron a las escalas temporales de 3, 6, 12 y 24 meses para cada uno, el periodo de análisis fue de 1961 – 2011.

Los resultados se presentan a diferentes niveles: para las diferentes partes de la cuenca y de manera general. Para ello se consideraron las estaciones meteorológicas: 8038 Creel, Chih., y 8172 Guadalupe, Chih., en la parte alta; 8161 Batopilas, Chih., en la parte media; y 25009 Bocatoma, Sin., en la parte baja de la cuenca; se realizó de esta manera con el propósito de conocer el comportamiento espacial de la sequía en estaciones con diferente altitud y precipitación media. A nivel general de cuenca se utilizó el valor medio del SPI y SPEI, obtenido mediante polígonos de Thiessen de las 14 estaciones meteorológicas, en cada fecha de la serie 1961 – 2011.

Estos dos niveles de análisis se presentan a por escala temporal de los índices SPI y SPEI de 3, 6, 12 y 24 meses, con el propósito de comparar los resultados al mismo nivel temporal.

La escala temporal indica el periodo acumulado en que la variable de interés (precipitación en el SPI y precipitación–evapotranspiración en el SPEI) es tomada en cuenta para el cálculo del índice, así el SPI de 3 meses para marzo de 1998 indica que fue considerada la precipitación total del mes en cuestión más la de febrero de 1998 y enero de 1998 para calcular el valor del

índice y conocer el grado de deficiencia o superávit de humedad de marzo de 1998 con respecto a todos los marzos de la serie.

Los valores obtenidos de los índices indican la variabilidad de las variables meteorológicas con respecto a su media histórica, los mapas de los siguientes apartados muestran los patrones espaciales de los meses con mayor intensidad histórica de la sequía a escalas de 3, 6, 12 y 24 meses de los índices, en donde las características para periodos cortos o largos se clasifican según el Monitor de Sequía de México (SMN, 2015) como:

- a. 3 meses. Indica las condiciones de humedad del suelo.
- b. 6/12/24 meses. Indica los impactos en los niveles de reserva de cuerpos de agua en magnitud creciente.

Aunque las escalas de 6, 12 y 24 meses se ubican en una misma categoría, estas escalas se diferencian en el tamaño de los cuerpos de agua que afectan. La escala de 6 meses impacta generalmente a los cuerpos de agua pequeños como aguajes, bordos de almacenamiento, arroyos, etc., y algunas actividades agrícolas como las plantaciones de frutales. La escala a 12 meses refleja impactos en el nivel de agua de presas, ríos y lagos de mediana magnitud, así como la producción agrícola a nivel anual. La escala de 24 meses ve sus efectos en el nivel de las grandes presas, ríos y lagos, así como en el nivel freático de acuíferos.

3.2.1. Parte alta de la cuenca del río Fuerte

En la parte alta de la cuenca se seleccionaron dos estaciones, la estación 8038 Creel, ubicada al norte de la cuenca a 2,348 msnm y con una precipitación media anual de 648.7 mm, y la estación 8172 Guadalupe que se localiza al sureste de la cuenca a una latitud de 2,279 msnm y registra una precipitación media anual de 1,083.2 mm. Se eligieron estas dos debido a que la parte alta de la cuenca tiene una gran extensión con diferentes condiciones de humedad, como se describió, Guadalupe presenta casi el doble de la precipitación que se registra en Creel y ambas se encuentran a más de 2,000 msnm, por lo que es importante analizar ambas condiciones.

Escala de 3 meses

La figura 19 muestra el comportamiento de los índices SPI y SPEI a escala de 3 meses en el periodo 1961-2011, los índices a esta escala se mueven rápidamente entre valores negativos y positivos, esto debido a que el periodo en que las variables son tomadas en cuenta es muy corto y los cambios son asimilados a mayor velocidad.

Para la estación Creel, ambos índices muestran la ocurrencia periódica de eventos secos de moderados a severos en la primera parte de la serie, para el SPI estos son ligeramente más intensos. A partir del año 1988 se observa un aumento en la intensidad de los índices y se presentaron periodos secos y húmedos extremos, de acuerdo al SPI ocurrieron dos eventos secos de alta

intensidad, el primero de más de 5 en el 2009 y de 3 en el 2011, el SPEI los marca de menor intensidad un poco abajo de -2.

En la estación Guadalupe hasta el año 1993 se presentó una sequía extrema, marcada por ambos índices, al inicio de la serie los periodos húmedos son más frecuentes y de mayor intensidad, pero al final de la serie la ocurrencia de periodos secos es dominante, en el 2011 hay una recurrencia de valores por debajo de -1.

En general los valores extremos son representados con mayor intensidad por el SPI, que toma sólo la reducción de la precipitación sin considerar que la PET puede ser baja y contrarrestar esta reducción; el SPEI oscila menos que el SPI definiendo mejor los periodos secos y húmedos; los índices en Creel son más inestables en Guadalupe, esto puede deberse a la menor oscilación térmica y a patrones de lluvia estacional más estables en esta última.

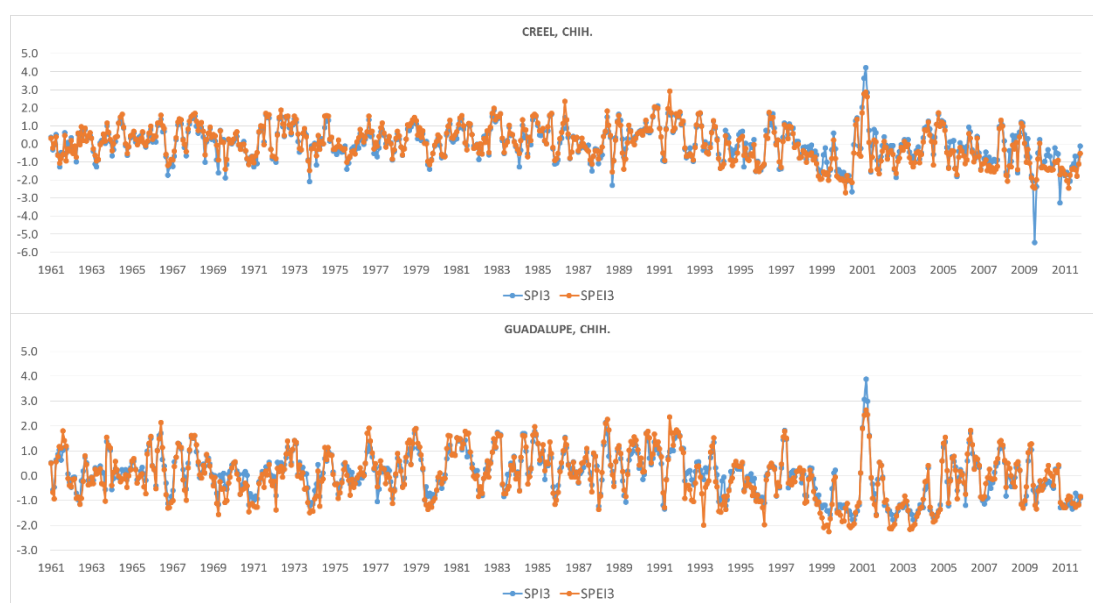


Figura. 19. SPI y SPEI de 3 meses para Creel y Guadalupe.

Escala de 6 meses

A esta escala temporal hay menor oscilación con respecto a la de 3 meses (figura 20). En Creel la primera mitad de la serie los valores se mueven entre 2 y -2, y los periodos secos ocurren periódicamente. A partir de 1999 ocurren eventos secos extremos definidos con mayor intensidad por el SPI, y mayor ocurrencia de periodos con sequía.

En Guadalupe el SPEI se observa por debajo de la serie del SPI, mostrando un estado con menor humedad que el este en prácticamente todo el periodo de estudio. Después del año 1993 se observa dominancia de periodos secos.

De manera general los índices muestran una alteración a partir de 1990, presentando eventos húmedos y secos extremos; el SPEI define mejor los eventos secos; la estación Guadalupe tiene un comportamiento más estable.

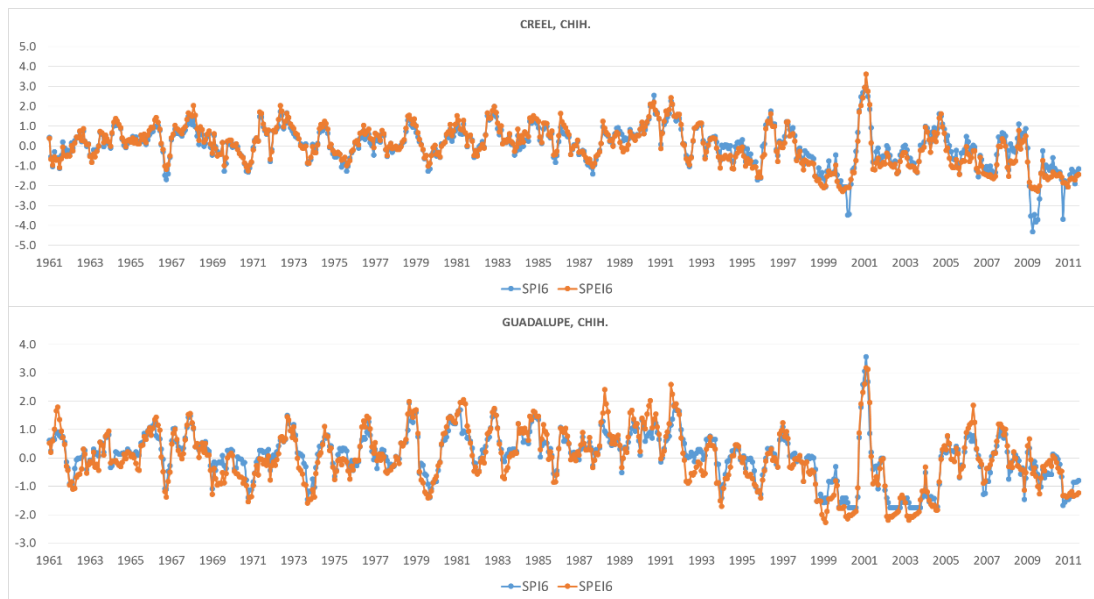


Figura. 20. SPI y SPEI de 6 meses para Creel y Guadalupe.

Escala de 12 meses

En la estación Creel ambos índices señalan que las sequías extremas se presentaron hasta después de 1998. Al inicio de la serie solo ocurrieron sequías moderadas de corta duración, y al final hay mayor presencia de periodos secos, con valores de hasta -4 definidos por el SPI.

En Guadalupe las sequías a esta escala temporal no son de alta intensidad, los valores de los índices oscilan entre -2 y 2 generalmente, entre 1998 y 2005 se presentaron dos sequías extremas de baja intensidad pero de larga duración, en 2010-2011 se observaron eventos secos moderados.

En Creel existen diferencias más marcadas entre el SPI y SPEI al definir eventos extremos que en Guadalupe; el SPEI define mejor los eventos secos y oscila menos que el SPI en ambas estaciones (figura 21).

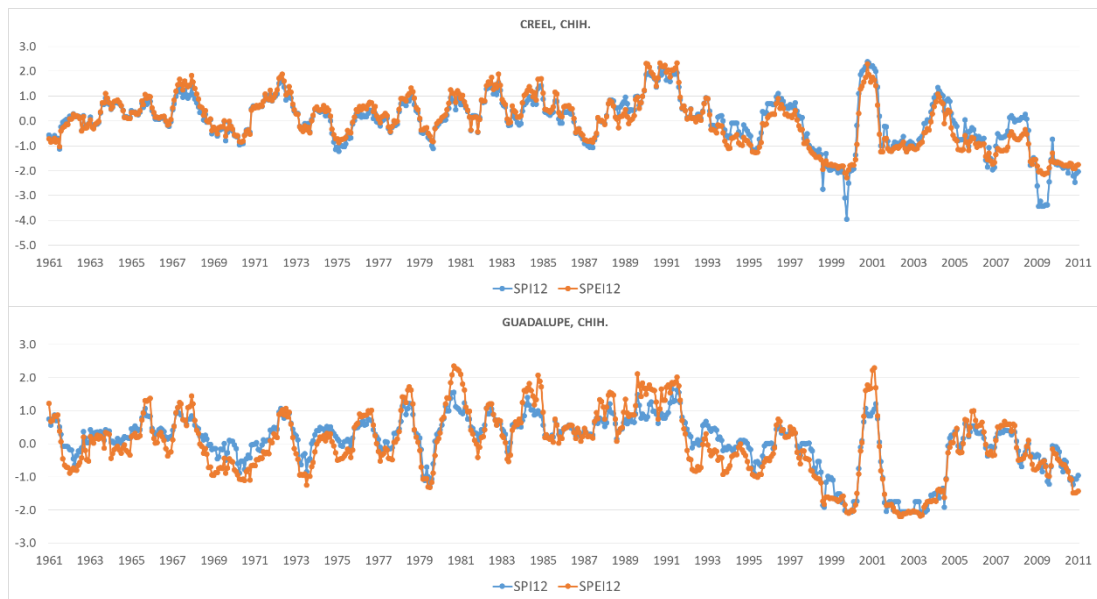


Figura. 21. SPI y SPEI de 12 meses para Creel y Guadalupe.

Escala de 24 meses

De acuerdo a la figura 22, la serie de los índices a esta escala temporal es mucho más suavizada que las anteriores, ya que el periodo de tiempo en que las variables son tomadas en cuenta es mucho mayor y los cambios son asimilados más lentamente.

Creel mostró ocurrencia de sequías después de 1994, la primera definida por el SPEI, a partir de ese año se presentaron sequías extremas de casi -4 en el año 2000 y en 2011 de acuerdo al SPI, ambas de -2 según el SPEI.

Guadalupe señala dominancia de periodos húmedos durante casi toda la serie, en 1999 se presentó la primera sequía extrema y del 2002-2005 una segunda de gran duración, el SPI las señala con mayor intensidad que el SPEI, pero el SPEI define mejor su periodo de ocurrencia.

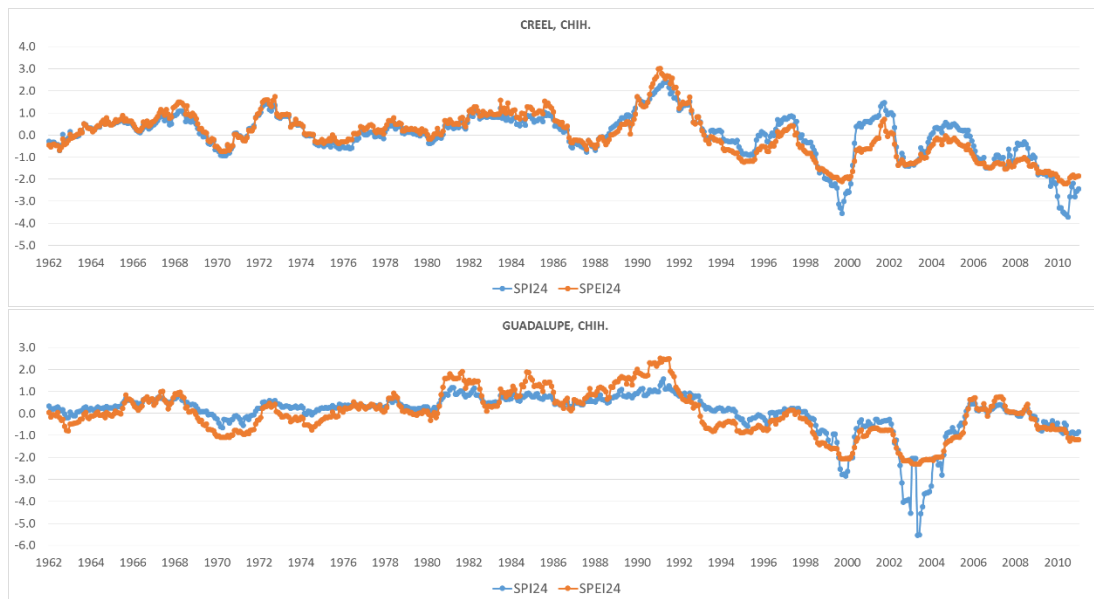


Figura. 22. SPI y SPEI de 24 meses para Creel y Guadalupe.

3.2.2. Parte media de la cuenca del río Fuerte

En esta parte de la cuenca se seleccionó la estación 8161 Batopilas, Chih., que se localiza a 678 msnm y registra una lámina media anual de 603.4 mm. Las figuras 23 a la 26 presentan las series del SPI y SPEI a escala de 3, 6, 12 y 24 meses, en el periodo 1961-2011.

Escala de 3 meses

El índice SPI muestra ocurrencia de sequías extremas desde el inicio de la serie, el SPEI también las identificó pero con menor intensidad. Esta estación presenta mayor frecuencia de estados secos extremos que las de la parte alta, generalmente al final de la serie donde estos son más recurrentes e intensos, a partir de 1990. El SPEI oscila menos que el SPI definiendo mejor la duración de los periodos secos, su punto de inicio y término (figura 23).

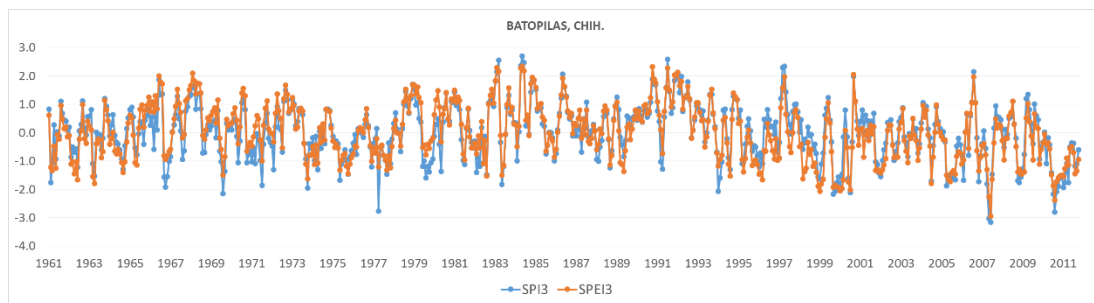


Figura. 23. SPI y SPEI de 3 meses para Batopilas.

Escala de 6 meses

De acuerdo a la figura 24, en esta escala la frecuencia de periodos secos se reduce, el SPI señala periodos más intensos que el SPEI y presenta mayor oscilación. Después del año 1998 se presentaron sequías extremas de mayor intensidad que al inicio de la serie, de más de 3 de acuerdo al SPI y de más de 2 de acuerdo al SPEI, en 1999, 2000, 2006, 2007, 2009 y 2011.

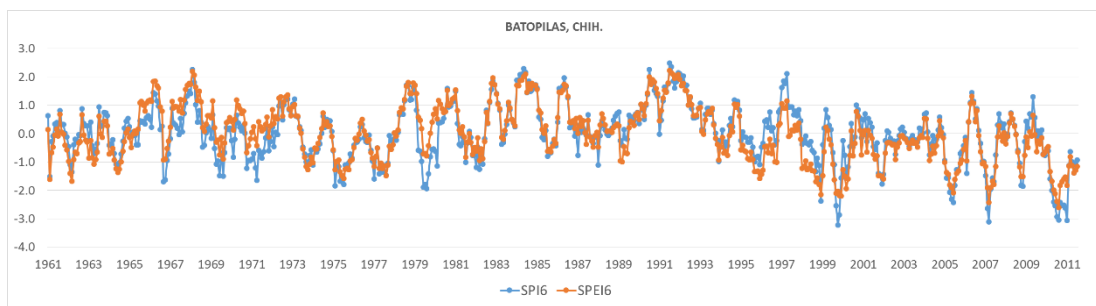


Figura. 24. SPI y SPEI de 6 meses para Batopilas.

Escala de 12 meses

En la figura 25 se observa el SPI y SPEI de 12 meses para Batopilas, se observa que al inicio de la serie el SPI se ubica frecuentemente por debajo de la serie del SPEI, indicando déficit de precipitación pero temperaturas estables que no aumentan la demanda evaporativa. En la segunda mitad de la serie se invierte este comportamiento, el SPEI se ubica por debajo del SPI, indicando que la PET es alta debido a altas temperaturas y, aunque la precipitación no presentó alto déficit de acuerdo al SPI, de demanda evaporativa fue alta.

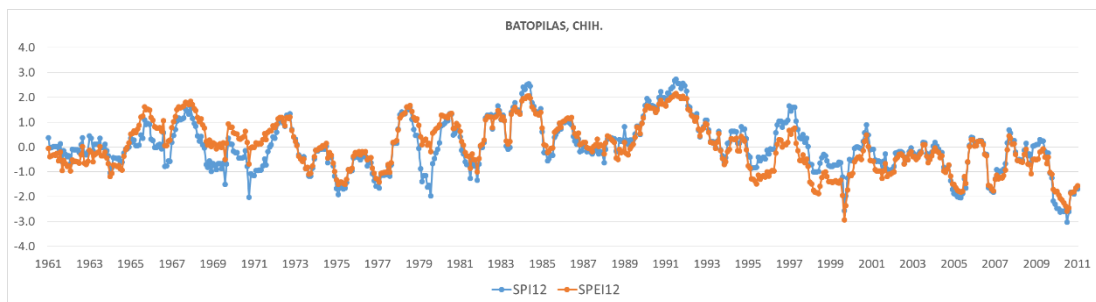


Figura. 25. SPI y SPEI de 12 meses para Batopilas.

Escala de 24 meses

Las series de los índices a esta escala muestran menor ocurrencia de periodos secos pero estos son de mayor duración, al final de la serie se presentan sequías extremas, en 1999 y 2011, mejor definidas por el SPEI. Se observa un comportamiento similar a la escala de 12 meses, al inicio de la serie el SPI está por debajo del SPEI, y al final se invierte indicando un aumento en las temperaturas con dominancia de periodos secos a partir del año 2010 (figura 26).

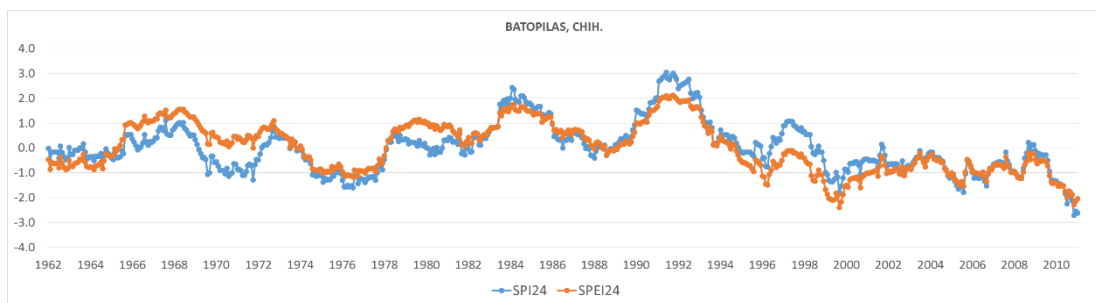


Figura. 26. SPI y SPEI de 24 meses para Batopilas.

3.2.3. Parte baja de la cuenca del río Fuerte

En la parte baja de la cuenca se seleccionó la estación 25009 Bocatoma, Sin., que se localiza a 31 msnm y presenta una lámina de precipitación media anual de 456.6 mm, con esta estación podemos conocer la ocurrencia de sequías en la zona agrícola y la zona urbana generalmente ubicadas en las partes bajas de las cuencas.

Escala de 3 meses

En Bocatoma los índices a 3 meses presentan un comportamiento muy similar en el periodo 1961-2004 con recurrencia periódica de sequías moderas, severas y extremas, a partir del 2005 se observa que ambos índices registran comportamientos diferentes, el SPEI indica sequías severas de hasta -3 en 2007-2009 y el SPI las señala como moderadas o cercano a lo normal, en cambio de 2009-2011 es el SPI quién señala déficit de humedad severo y extremo y el SPEI periodos húmedos extremos (figura 27).

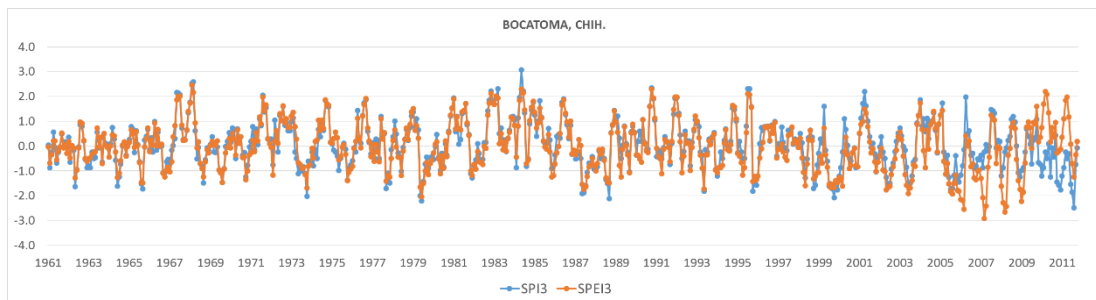


Figura. 27. SPI y SPEI de 3 meses para Bocatoma.

Escala de 6 meses

De acuerdo a la figura 28, a una escala de 6 meses el SPI y SPEI en Bocatoma se comportan muy similar en casi toda la serie, aunque el SPI señala los periodos extremos con mayor intensidad. A partir de 2005 y hasta 2009 el SPEI señala mayor intensidad de los periodos secos, de 2009-2011 es el SPI quién indica periodos secos moderados y severos, en cambio el SPI los indica húmedos en las mismas categorías.

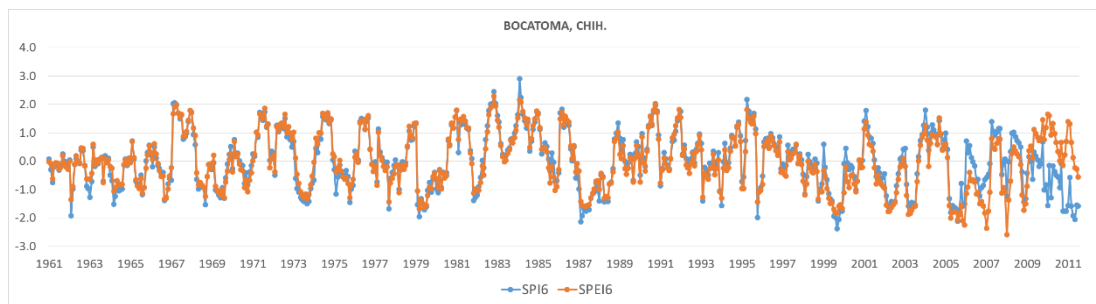


Figura. 28. SPI y SPEI de 6 meses para Bocatoma.

Escala de 12 meses

En la figura 29 se muestran los índices a escala de 12 meses, se observa menor ocurrencia de periodos secos pero de mayor duración que los de escalas anteriores, el SPI señalando mayor déficit de humedad que el SPEI en casi toda la serie, al final de esta se observa el mismo comportamiento descrito para las escalas menores, donde el SPI señala sequía extrema y el SPEI condiciones húmedas de normales a severas.

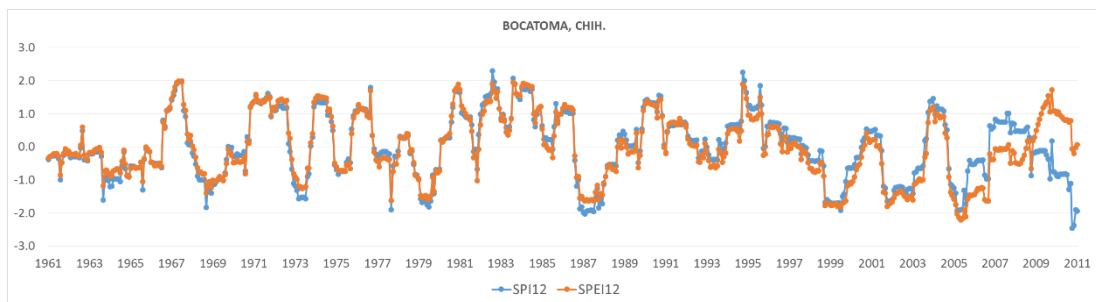


Figura. 29. SPI y SPEI de 12 meses para Bocatoma.

Escala de 24 meses

A esta escala temporal se observa que la ocurrencia de sequías desde el inicio de la serie, y el SPI indica ligeramente mayor intensidad que el SPEI en los eventos extremos, al final de la serie se observa ocurrencia de sequías extremas en 2000, 2003 y 2007 con ambos índices, y en 2011 sólo con el SPI. Se observa que el SPEI presenta menor oscilación por lo que define mejor los periodos secos que el SPI. A pesar del déficit de precipitación que presenta el SPI en el 2011, el SPEI indica que hubo presencia de bajas temperaturas por lo que la demanda evaporativa no fue mayor a la precipitación (figura 30).

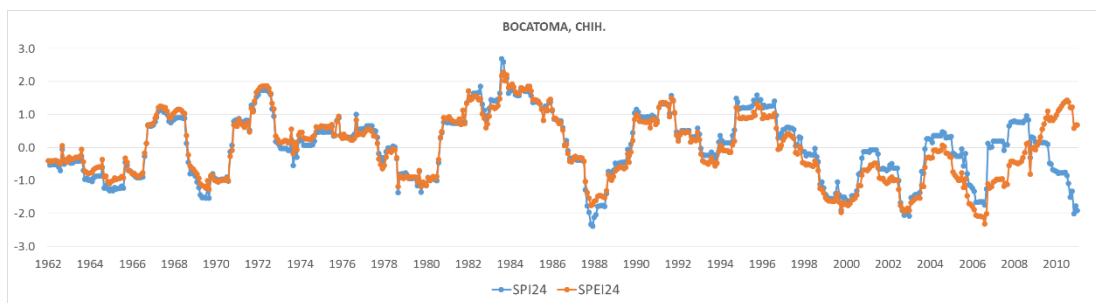


Figura. 30. SPI y SPEI de 3, 6, 12 y 24 meses para Bocatoma, Sin.

3.2.4. Cuenca del río Fuerte

El comportamiento de los índices en la cuenca del río Fuerte fue determinado con el SPI y SPEI medio, el cual se obtuvo mediante polígonos de Thiessen. Una vez que se obtiene la media de los índices a nivel de cuenca se pierde información, principalmente los valores extremos tanto secos como húmedos los cuales son asimilados dentro del valor general, por lo que las series de los índices que se presentan en seguida oscilan en un rango menor que los mostrados anteriormente para las estaciones.

Una parte importante del análisis de sequías es definir sus puntos de inicio y término, así como su intensidad y duración, en este apartado se analizan estas características a partir de la media del índice de cada escala temporal y mes de la serie en la cuenca.

Escala de 3 meses

A nivel de cuenca para la escala de 3 meses se observa que esta cambia con rapidez entre periodos húmedos y secos de corta duración, con un comportamiento muy similar entre el SPI y SPEI, aunque el SPI señala mayor intensidad de los eventos extremos. La ocurrencia de sequías se hace más frecuente conforme se avanza hacia al final de la serie donde estas dominan, indicando frecuentes estados de sequías de moderadas a severas a nivel de cuenca a partir del año 1994 mejor definidas por el SPEI (figura 31).

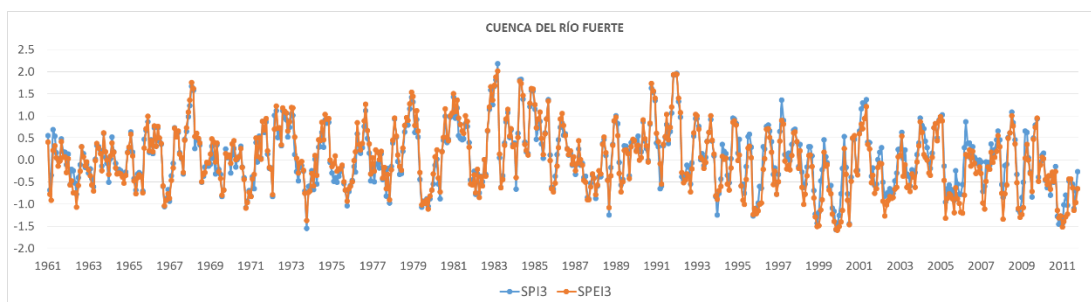


Figura. 31. SPI y SPEI medio de 3 meses para la cuenca del río Fuerte.

De manera general las series del SPI y SPEI de 3 meses señalaron sequías en todo el periodo de estudio. De acuerdo al SPI ocurrieron once periodos de sequía moderada y dos con severa; la sequía más intensa se presentó de 1999 al 2000 con una duración de 8 meses (cuadro 3).

Cuadro 3. Periodos de sequía obtenidos con el SPI 3.

Índice	Categoría de la sequía	Intensidad	Inicio	Término	Duración (meses)
SPI3	Moderada	-1.06	Dic - 1966	Jun - 1967	7
		-1.08	Dic - 1970	Jun - 1971	7
		-1.04	Dic - 1975	Jun - 1976	7
		-1.07	Ago - 1979	May - 1980	10
		-1.24	Nov - 1988	Ene - 1989	3
		-1.25	Mar - 1994	Jun - 1994	4
		-1.27	Dic - 1995	Jun - 1996	7
		-1.44	Ene - 1999	Jun - 1999	6
		-1.45	Sep - 2000	Nov - 2000	3
		-1.19	Ene - 2009	May- 2009	5
		-1.46	Dic - 2010	--	--
	Severa	-1.55	Dic - 1973	May - 1974	6
		-1.58	Nov - 1999	Jun - 2000	8

El SPEI mostró más periodos de sequía, 15 moderadas y 3 severas, con patrones similares de ocurrencia a inicios de la serie de menor intensidad.

Las sequías ocurridas a partir de 1999 son más intensas y duraderas; la sequía más intensa ocurrió de 1999-2000, y duró 8 meses (cuadro 4).

Cuadro 4. Periodos de sequía obtenidos con el SPEI 3.

Índice	Categoría de la sequía	Intensidad	Inicio	Término	Duración (meses)
SPIE3	Moderada	-1.07	Ago - 1962	Nov - 1962	4
		-1.04	Dic - 1966	Jun - 1967	7
		-1.09	Dic - 1970	Jun - 1971	7
		-1.37	Dic - 1973	May - 1974	6
		-1.11	Ago - 1979	Abr - 1980	9
		-1.08	Nov - 1988	Ene - 1989	3
		-1.01	Jul - 1995	Sep - 1995	3
		-1.24	Dic - 1995	Jul - 1996	8
		-1.01	Jun - 1998	Sep - 1998	4
		-1.47	Sep - 2000	Nov - 2000	3
		-1.27	Jun - 2002	Feb - 2003	9
		-1.32	Jun - 2005	Jun - 2006	13
		-1.11	May - 2007	Sep - 2007	5
		-1.34	Abr - 2008	Jul - 2008	4
		-1.30	Ene - 2009	May - 2009	5
	Severa	-1.50	Ene - 1999	Jun - 1999	6
		-1.59	Nov - 1999	Jun - 2000	8
		-1.52	Dic - 2010	--	--

En la figura 32 se muestra la representación espacial del mes más seco de la serie con base en el SPI y SPEI de 3 meses para la cuenca del río Fuerte. Con el SPI se presentó en enero y con el SPEI en febrero del 2000, se observan diferencias en la distribución espacial de los índices, así como las zonas donde fue mayor la intensidad de la sequía.

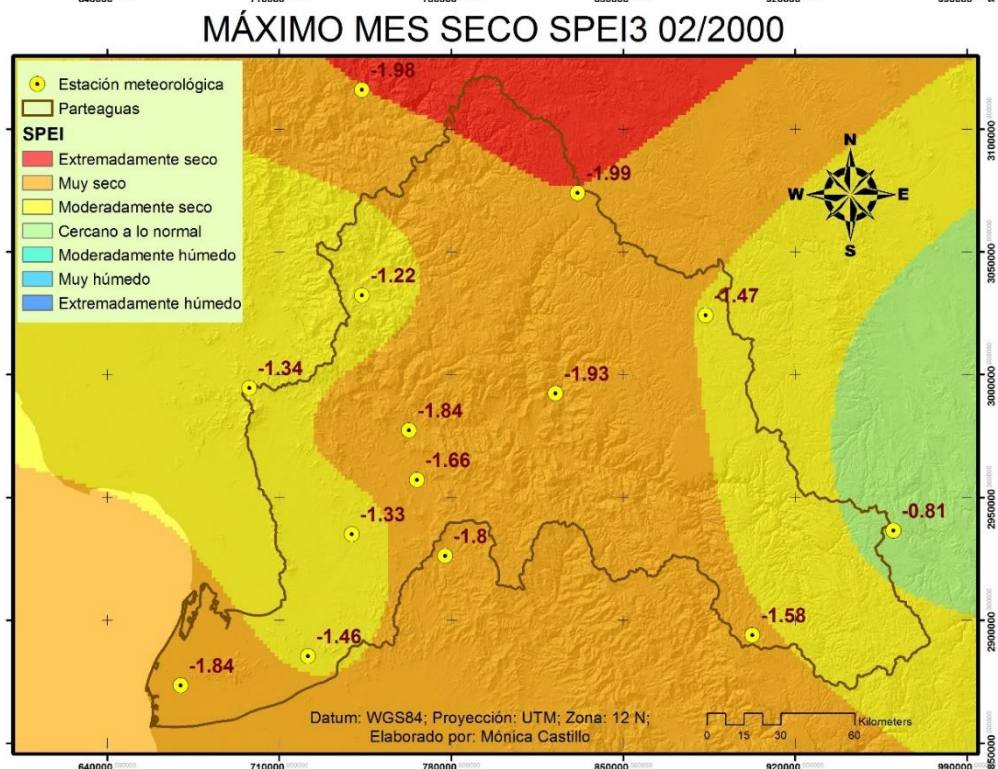
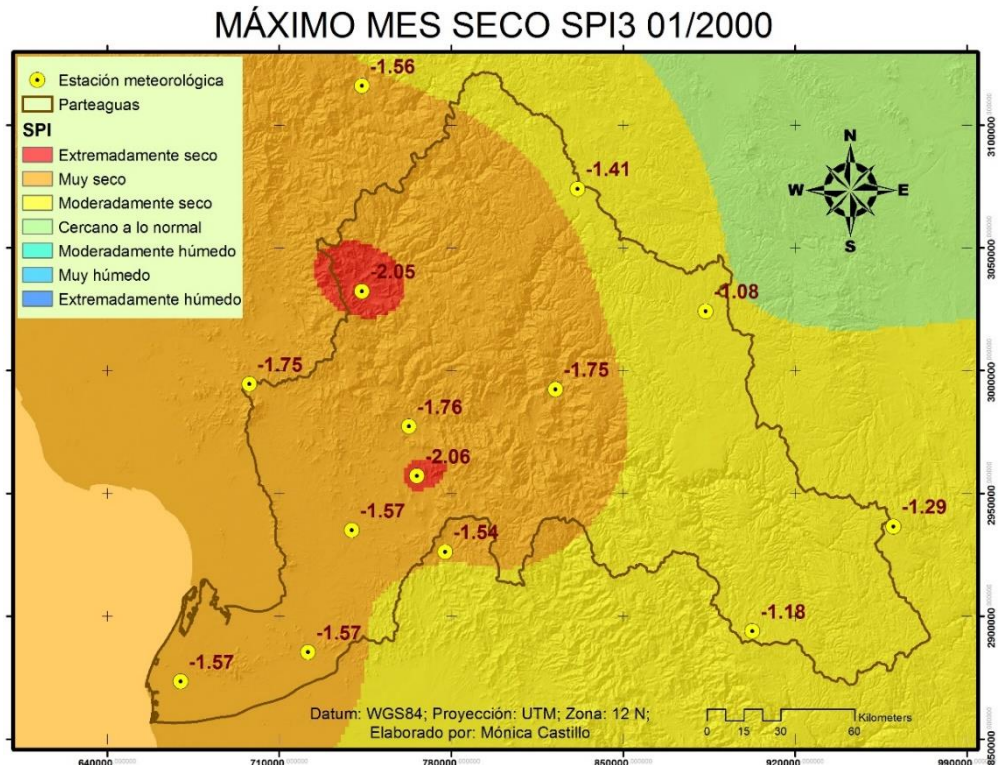


Figura. 32. Mes máximo de intensidad de la sequía con el SPI y SPEI de 3 meses.

Escala de 6 meses

De acuerdo a la figura 33, en la escala de 6 meses a nivel general de la cuenca los índices presentan comportamientos muy similares y oscilan en el rango de -2.5 a 2.5. Las series presentaron sequías moderadas desde el inicio de la serie, las cuales tuvieron una ocurrencia periódica y similar duración, a partir del año 1996 se presentaron eventos secos severos y en 2011 extremos, esto indica un aumento en la intensidad de la sequía hacia los años más recientes, identificados tanto por el SPI como por el SPEI, estos eventos fueron señalados por el SPI como más intensos, en cambio las condiciones normales son señaladas por el SPEI con mayor déficit de humedad que lo indicado el SPI.

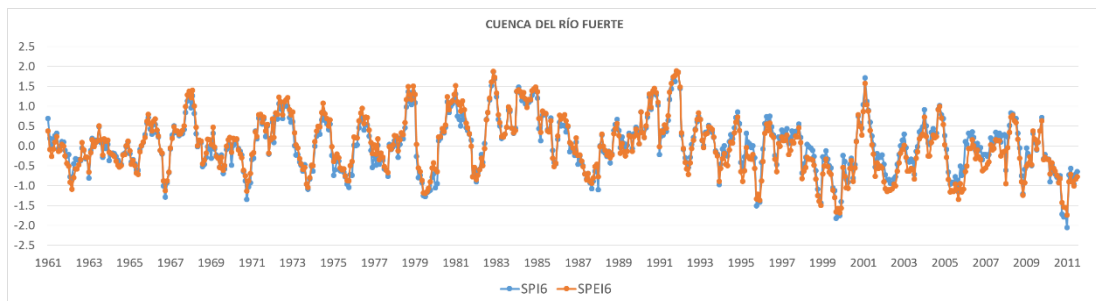


Figura. 33. SPI y SPEI medio de 6 meses para a cuenca del río Fuerte.

En el Cuadro 5 se presentan los periodos de sequía con base en el SPI 6 medio de la cuenca: ocho periodos de sequía moderada, dos de sequía severa y uno con sequía extrema, esta última se presentó en el 2011 y su desarrollo continuó más allá del periodo de análisis, tuvo una intensidad máxima de -2.05. Los periodos secos inician de febrero a abril y terminan

generalmente en la temporada de lluvias de junio a octubre. Se observa que las sequías severas empiezan a presentarse a partir del 1996 y aumentan considerablemente su intensidad y duración en los años siguientes, el periodo seco más extenso definido por el SPI de 6 meses tuvo una duración de 2 años en categoría de severo.

Cuadro 5. Periodos de sequía obtenidos con el SPI 6.

Índice	Categoría de la sequía	Intensidad	Inicio	Término	Duración (meses)
SPI6	Moderada	-1.28	Feb – 1967	Jul – 1967	6
		-1.34	Mar – 1971	Ago - 1971	6
		-1.09	Mar – 1974	Jul – 1974	5
		-1.05	Mar – 1976	Jun - 1976	4
		-1.28	Nov – 1979	Ago - 1980	10
		-1.11	Feb – 1988	Jul - 1988	6
		-1.16	Feb – 2006	Jun - 2006	5
		-1.21	Abr – 2009	Oct - 2009	7
	Severa	-1.51	Mar – 1996	Ago - 1996	6
		-1.82	Mar – 1999	Feb - 2001	24
	Extrema	- 2.05	Mar – 2011	--	--

EL SPEI 6 definió nueve sequías moderadas, dos severas y ninguna extrema. Se observa el incremento de la intensidad de las sequías en la última década, a partir de 1999 se observaron sequías severas en la cuenca y la más intensa se presentó en 2011 y su duración se extendió después del periodo de estudio. El periodo de inicio de la sequía en el SPEI es generalmente en marzo y culmina en la temporada de lluvias. Ambos índices

muestran una sequía severa de dos años de 1999 a 2001, la intensidad que muestra el SPI es mayor que la que estimada por el SPEI (Cuadro 6).

Cuadro 6. Periodos de sequía obtenidos con el SPEI 6.

Índice	Categoría de la sequía	Intensidad	Inicio	Término	Duración (meses)
SPEI6	Moderada	-1.09	Ago – 1962	Feb - 1963	7
		-1.12	Mar – 1967	Jul - 1967	5
		-1.13	Mar – 1971	Ago - 1971	6
		-1.04	Mar – 1974	Jul - 1974	5
		-1.20	Nov – 1979	Ago - 1980	10
		-1.36	Mar – 1996	Ago - 1996	6
		-1.14	Jul – 2002	Jun - 2003	12
		-1.34	Sep – 2005	Oct - 2006	14
		-1.24	Abr – 2009	Oct - 2009	7
	Severa	-1.68	Mar – 1999	Feb - 2001	24
		-1.74	Mar – 2011	--	--

La representación espacial de los meses con sequía más intensa se presentan en la figura 34, para ambos índices se presentó en junio de 2011 por un retraso en el inicio de la temporada de lluvias y las altas temperaturas al inicio del verano, la máxima intensidad del SPI 6 fue de -3.51 y del SPEI 6 de -2.68. La distribución del SPI 6 muestra la zona centro norte y sur, y occidente con altas intensidades de sequía, se debilita hacia afuera en severa y moderada ocupando la totalidad de la cuenca; el SPEI 6 muestra la zona norte y occidente con sequía severa, la intensidad se reduce en sentido centro – sureste y al suroeste y aparecen pequeñas áreas con zonas en condiciones normales.

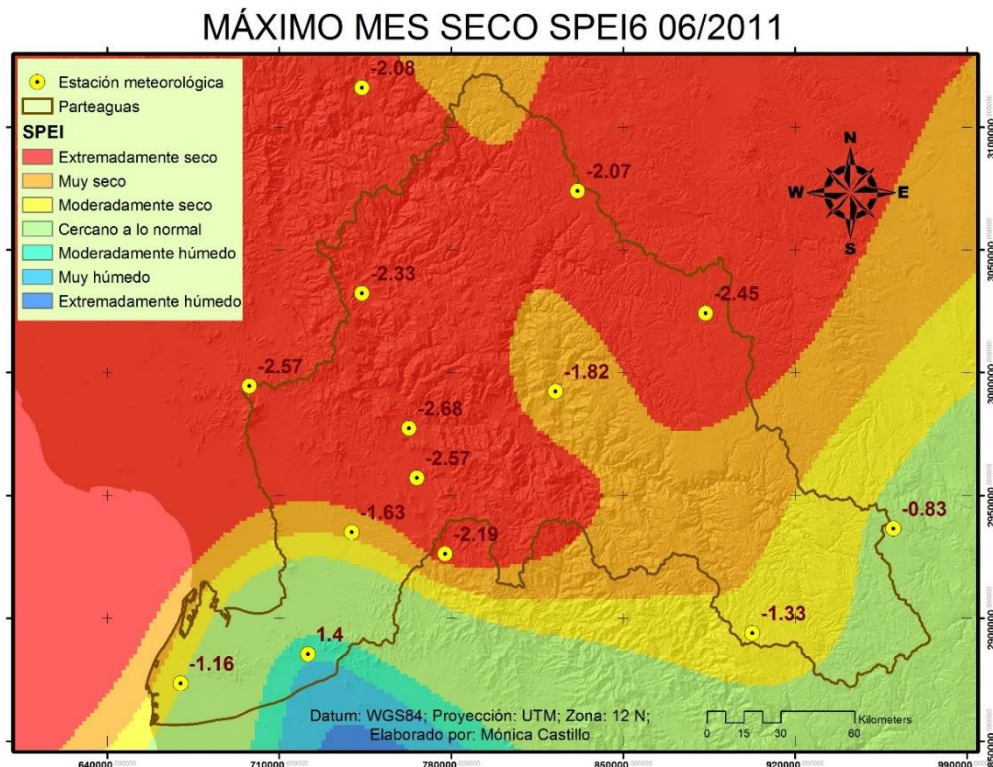
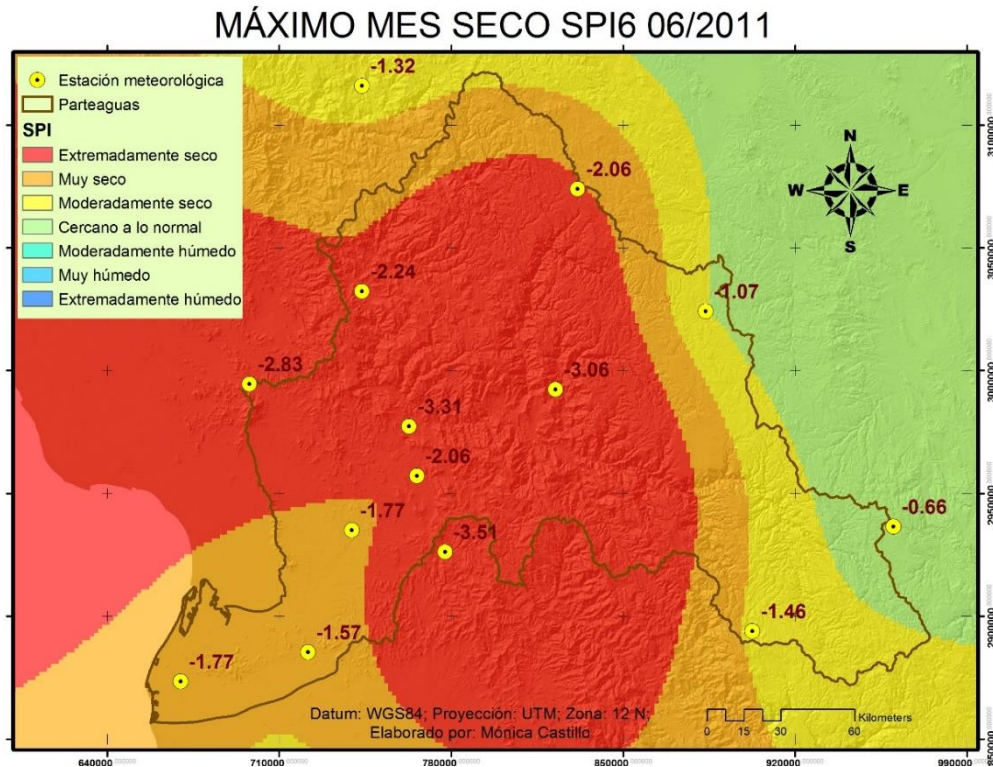


Figura. 34. Mes de máxima intensidad de la sequía con el SPI y SPEI de 6 meses.

Escala de 12 meses

En la figura 35 se presentan las series del SPI y SPEI de 12 meses para la cuenca del río Fuerte, sus valores oscilan entre -2 y 2, lo que sugiere una reducción en la intensidad de las sequías a esta escala temporal, pero en cambio estas son de mayor duración. La primera sequía se presentó en 1980, el SPI la señala de mayor intensidad que el SPEI, la única sequía severa se presentó en el 2000 y a partir de este año la ocurrencia de eventos secos a esta escala es más frecuente con tres eventos más de esta categoría en el 2002, 2005 y 2011. Al final de la serie el SPEI señala mayor intensidad que el SPI en los eventos secos, además de una menor oscilación y mejor definición de éstos.

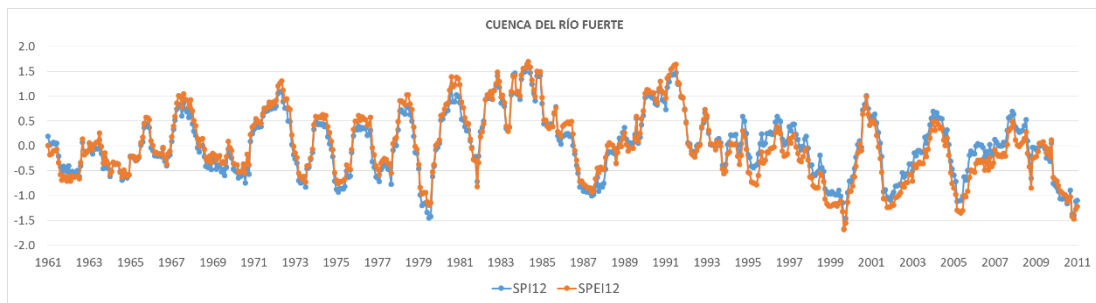


Figura. 35. SPI y SPEI medio de 12 meses para la cuenca del río Fuerte.

De acuerdo al Cuadro 7, el SPI 12 identificó cinco periodos de sequía moderada y uno con severa en la cuenca, los periodos de sequía a esta escala son de mayor duración y menor intensidad que los de escalas temporales menores (3 y 6 meses). El inicio de los eventos de sequía a esta escala es generalmente a inicios de año o durante la temporada de lluvias,

debido a algún retraso en su aparición y en láminas de lluvia por debajo de la media en estos meses, su término se observa aproximadamente uno a dos años después de su aparición en fechas similares a las que inician.

Cuadro 7. Periodos de sequía obtenidos con el SPI 12.

Índice	Categoría de la sequía	Intensidad	Inicio	Término	Duración (meses)
SPI12	Moderada	-1.45	Feb - 1980	Ago – 1980	7
		-1.00	May - 1988	Sep – 1989	18
		-1.09	Sep - 2002	Jul – 2004	23
		-1.12	Feb - 2006	Ene – 2007	12
		-1.40	Feb - 2011	--	12
	Severa	-1.67	Jun - 2000	Abr - 2001	11

En el Cuadro 8, el SPEI 12 muestra cuatro periodos de sequía moderada y uno con sequía severa, al igual que para el SPI 12 empezaron presentarse en 1980, y son de menor intensidad y mayor duración que en las escalas menores. Con el SPEI se observa que las sequías moderadas han ido aumentando su intensidad al paso del tiempo indicando una mayor afectación en los años más recientes; la sequía más intensa se presentó de 1999 al 2001, de los cinco periodos de sequía identificados con el SPEI tres tuvieron una duración mayor a 20 meses, lo que es importante resaltar ya que un estado de sequía sostenido por un largo periodo de tiempo puede desencadenar graves problemas económicos y sociales aunque sea de categoría moderada.

Cuadro 8. Periodos de sequía obtenidos con el SPEI 12.

Índice	Categoría de la sequía	Intensidad	Inicio	Término	Duración (meses)
SPEI12	Moderada	-1.19	May - 1980	Oct - 1980	6
		-1.24	Jul - 2002	Oct - 2004	28
		-1.35	Feb - 2006	Jul - 2008	30
		-1.47	Jun - 2011	--	8
	Severa	-1.69	Sep - 1999	May - 2001	21

El mes de sequía más intenso mostrado por el SPI y SPEI de 12 meses fue agosto del año 2000, su representación espacial para ambos índices se muestra en la figura 36. El SPI presenta una distribución de la sequía con concentración de los valores más intensos en la parte norte centro y suroeste de la cuenca, la parte media - baja de la cuenca muestra condiciones moderadas y severas al igual que al este de la parte alta, al máximo valor del SPI se presenta en la estación 25042 Higuera (-3.34) cerca de la costa.

El SPEI presenta una distribución espacial similar, pero más uniforme indicando que el área de sequía “viene” del sur y “entra” en la cuenca desde ese punto; la zona más intensa se encuentra en el centro sur y norte de la cuenca, y en la costa; sin embargo, cambia el sitio de mayor intensidad de sequía ya que con el SPEI se localiza en la estación 8161 Batopilas (-2.93) en la parte serrana de la cuenca.

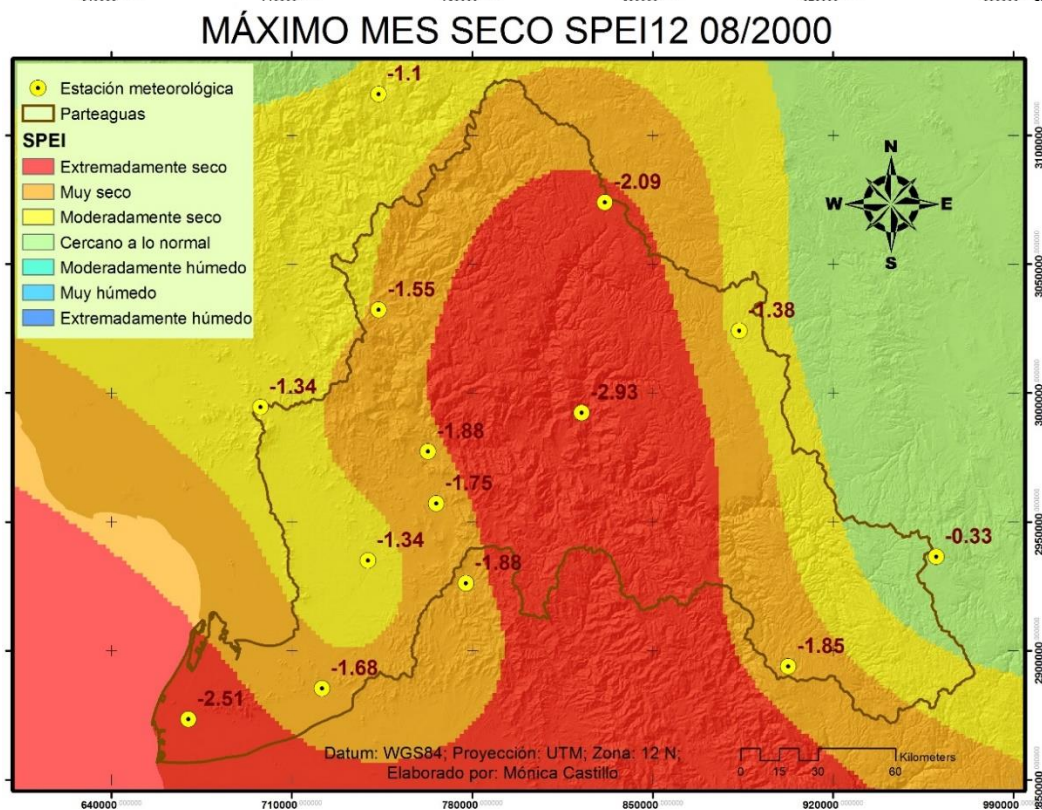
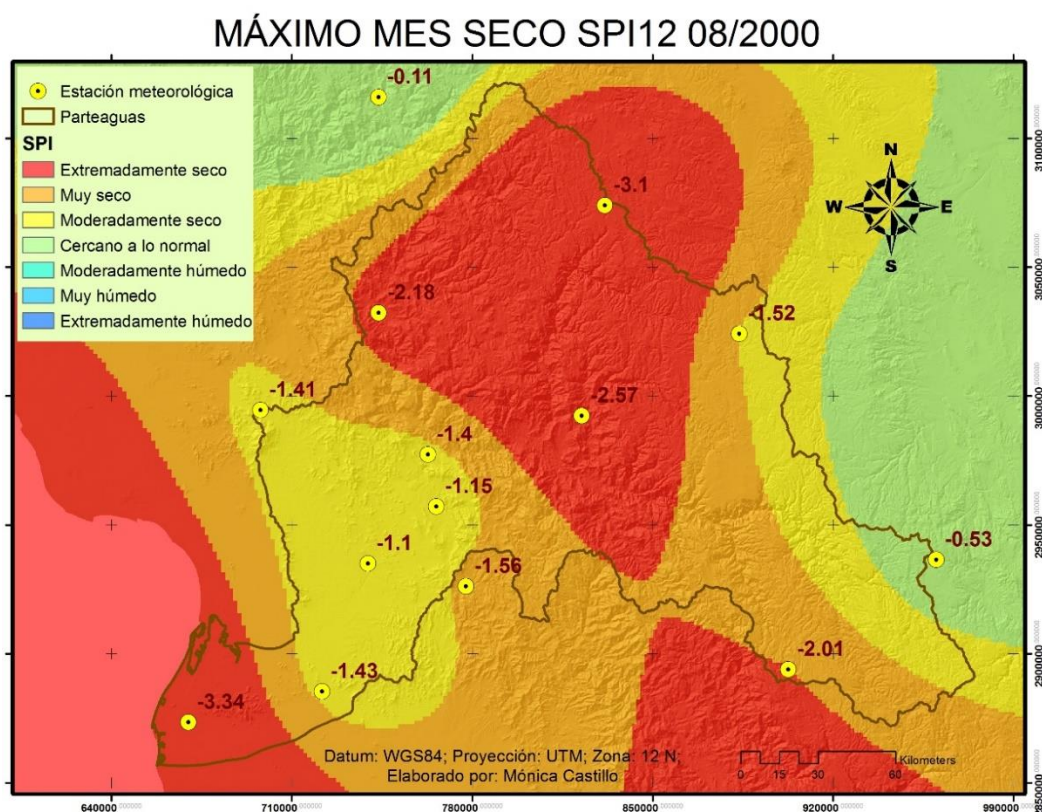


Figura. 36. Mes de máxima intensidad de la sequía con el SPI y SPEI de 12 meses.

Escala de 24 meses

A una escala de 24 meses los índices SPI y SPEI se mueven más lentamente a lo largo del tiempo, los eventos son más duraderos y de menor intensidad.

A inicios de la serie se observa que los índices oscilan entre eventos húmedos y secos, con el SPI señalando mayor déficit de humedad a esta escala, y a partir de 1988 el SPI registra la primera sequía, en categoría de moderada. Después del año 1993 el SPEI se presenta valores más bajos que el SPI, indicando un aumento en los valores de la PET y se mantiene así hasta el final de la serie, en esta segunda mitad de la serie el SPEI se mantiene casi todos los años por debajo de 0, registrando una sequía severa desde el 1999 al 2005, la más duradera registrada. Después del año 1999 la ocurrencia de sequías en la cuenca a escala de 24 meses es más frecuente, la última ocurrida en 2011 y que persiste más allá de la serie de estudio fue señalada con mayor intensidad por el SPI (figura 37).

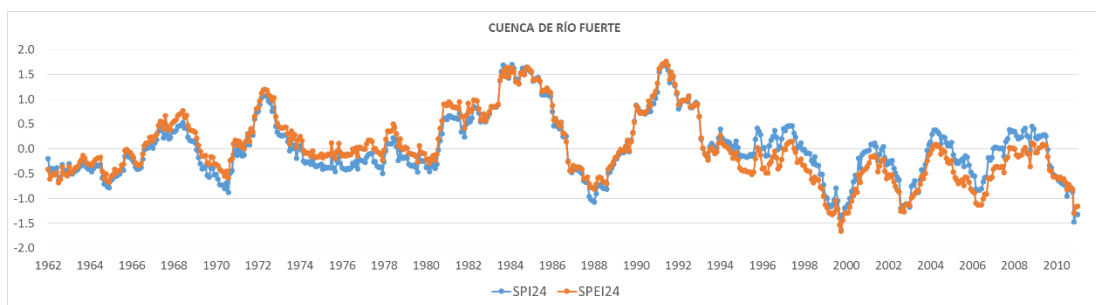


Figura. 37. SPI y SPEI de 3, 6, 12 y 24 meses para la cuenca del río Fuerte.

De acuerdo al Cuadro 9, a una escala de 24 meses el SPI identificó tres periodos de sequía moderada con incremento en su intensidad hacia años más recientes, y una sequía severa de baja intensidad. La primera sequía mostrada por el SPI a esta escala tuvo una duración de 20 meses y se presentó en 1988, ocho años después que la primera ocurrida a una escala de 12 meses, esto indica que en los en las últimas décadas se han empezado a presentar sequías que impactan más a los grandes cuerpos de agua como presas, ríos y acuíferos.

La duración de las sequías a esta escala es mayor, entre 16 y 24 meses, al final del periodo de estudio (2011) se presenta una sequía moderada cuyo término no se pudo conocer por la ausencia de datos después de esa fecha.

Cuadro 9. Periodos de sequía obtenidos con el SPI 24.

Índice	Categoría de la sequía	Intensidad	Inicio	Término	Duración (meses)
SPI24	Moderada	-1.07	Oct - 1988	Jun – 1990	21
		-1.26	Jul - 2003	Nov – 2004	17
		-1.48	Oct - 2011	--	--
	Severa	-1.63	Feb - 2000	Mar - 2002	25

De acuerdo al Cuadro 10, el SPEI 24 mostró dos periodos de sequía moderada y uno con severa, resalta el años de inicio de estos periodos, 1999, a diferencia del SPI, se presentó once años después y con categoría severa. La sequía más intensa ocurrió en 1999 y duró 61 meses, la más duradera encontrada por el SPI y SPEI en todas las escalas temporales, esto

indica importantes bajas en los niveles de ríos, presas y acuíferos e importantes problemas socioeconómicos. La duración mínima encontrada fue de 19 meses, al final de la serie se presentó una sequía moderada la cual se extendió más allá del periodo de estudio.

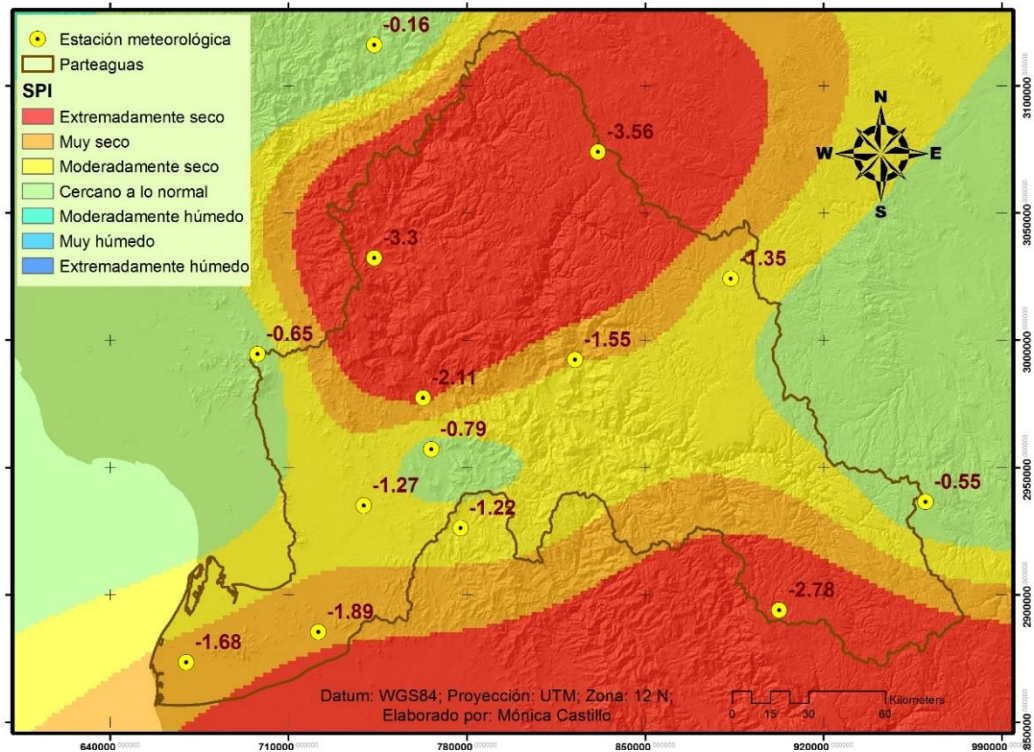
Cuadro 10. Periodos de sequía obtenidos con el SPEI 24.

Índice	Categoría de la sequía	Intensidad	Inicio	Término	Duración (meses)
SPEI24	Moderada	-1.13	Feb - 2007	Sep - 2008	20
		-1.29	Oct - 2011	--	--
	Severa	-1.66	Dic - 1999	Ene - 2005	62

La representación espacial de los estados de mayor intensidad de sequía para el SPI y SPEI de 24 meses se muestra en la figura 38. El mes más seco para el SPI ocurrió en septiembre del año 2000 en la estación Creel (-3.56), esta incidió principalmente en la zona norte y sur de la cuenca tocando las partes altas principalmente, la intensidad de la sequía baja hacia el centro oriente y occidente.

Para el SPEI 24 su distribución espacial es similar a la del SPI, el mes más seco ocurrió en septiembre del año 2000 y las zonas de mayor intensidad son la norte, sureste y noreste de la cuenca, siendo la estación Huites la que presentó la mayor intensidad de sequía (-2.66).

MÁXIMO MES SECO SPI24 09/2000



MÁXIMO MES SECO SPEI24 09/2000

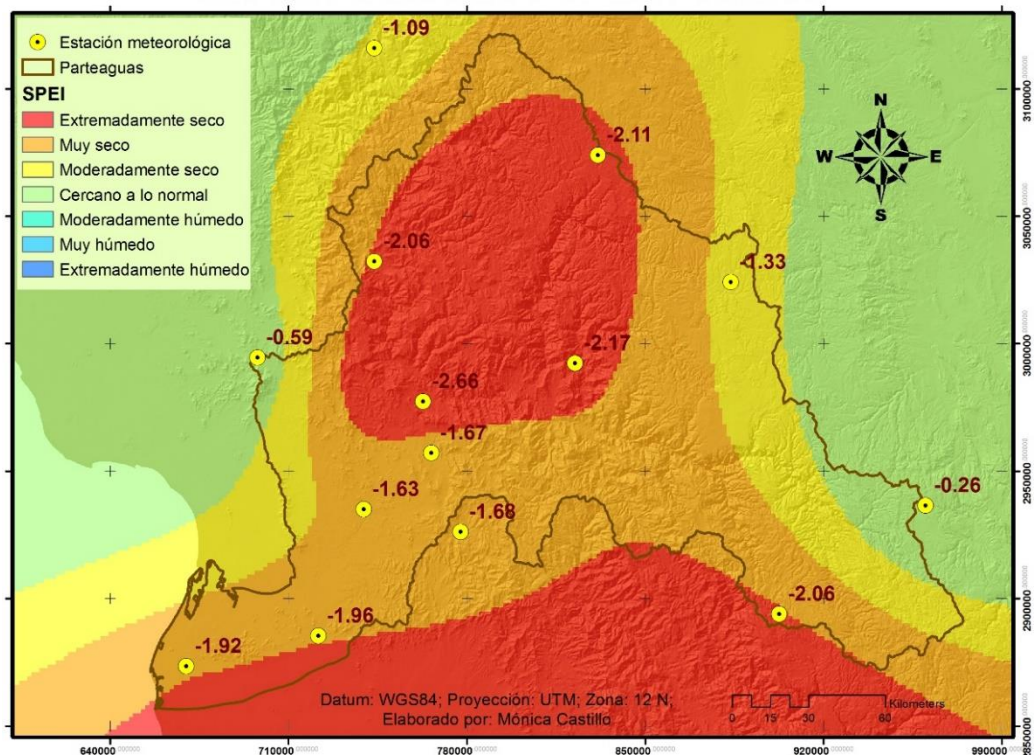


Figura. 38. Mes de máxima intensidad de la sequía con el SPI y SPEI de 12 meses.

La serie del índice de sequía SPI muestra periodos secos de mayor intensidad que el SPEI, guiado sólo por la escasez de precipitación, por lo que los periodos de sequía generalmente inician en enero, inicio del periodo de estiaje, y culminan en junio con el inicio de la temporada de lluvias. Esto define los periodos de sequía durante el invierno y la primavera, lo que limita la temporada agrícola en los meses en que es posible cultivar especies con baja tolerancia a las altas temperaturas.

Por su parte, el SPEI mostró un comportamiento ligeramente diferente, movido por los efectos de la temperatura, los periodos de sequía que define inician generalmente en febrero y terminan en septiembre, inicia en la primavera y no culminan con el inicio de la temporada de lluvias, si no cuando la demanda evaporativa es menor que la precipitación, lo que ocurre generalmente al entrar el otoño. Este índice define la sequía durante la primavera y el verano, cuando las temperaturas son más altas.

En el análisis temporal de los índices de sequía se encontró que las sequías en las últimas dos décadas han aumentado su intensidad y severidad, siendo así que a partir del año 1998 se presentan sequías de categorías severas y extremas, cuando en los primeros años de las series sólo se presentaban sequías moderadas de intensidad media. Los resultados a escalas de 12 y 24 meses, sugieren que las sequías que afectan a los grandes cuerpos de agua como presas, ríos y acuíferos no se presentaron hasta el año 1980, de ahí en adelante su ocurrencia es más frecuente, más intensa y duradera. De igual manera Edossa *et al.* (2014), en su análisis de sequía en Sudáfrica con

el SPEI y su asociación con el ENSO, cuyos resultados refieren que el número de sequías moderadas, severas, y extremas identificados por el índice siguen una tendencia de aumento en cada década del periodo de análisis. Y Manatsa *et al.* (2010) en su análisis de los aspectos multidimensionales de las sequías agrícolas en Zimbabwe usando el SPI, obtuvo que sus resultados indican que las sequías severas y extremas tienden a concentrarse cerca del final de las series de tiempo.

Históricamente la cuenca del río Fuerte ha presentado periodos de sequía de diversas categorías, de acuerdo Torrecillas *et al.* (2013) en su análisis sobre las sequías en el Organismo de Cuenca Pacífico Norte (OCPN) mediante el Índice de Severidad de Sequía de Palmer (PDSI), obtuvo que en el periodo de 1999 a 2008 se presentó sequía severa en Chihuahua, extrema en Sinaloa y moderada en Durango. Mientras que la situación más crítica de la sequía se presentó en 2011, 2012 y 2013, causando el mayor impacto económico, social y ambiental en el Consejo de Cuenca de los Ríos Fuerte y Sinaloa, nuestra área de estudio.

Esto va de acuerdo a los resultados obtenidos en el análisis de sequías mediante los índices SPI y SPEI, los cuales presentaron para las escalas de 3, 12 y 24 meses el estado de sequía más intenso en el periodo 1999 a 2004, mientras que para la escala de 6 meses se presentó en el año 2011 con el valor medio más intenso presentado en la cuenca en las cuatro escalas temporales, -2.05 con el SPI 6 y -1.74 con el SPEI 6.

Debido a la falta de información climatológica de buena calidad y la gran cantidad de estaciones suspendidas en las partes altas de la cuenca, no fue posible extender el periodo de análisis de esta investigación, de lo contrario se cree que hubiera sido posible detectar los estados de sequía extrema de los años 2012 y 2013 a los que refieren los autores y medios de comunicación, ya que los valores de los índices SPI y SPEI para todas las escalas temporales indican sequía de moderada a severa en el año 2011 y se mantiene en ese estado hasta el final de la serie, por lo que se supone que continúa con condiciones similares en los meses posteriores.

Ravelo *et al.* (2014) en su estudio sobre sequías en el OCPN, mediante el SPI de escala 12 y el PDSI, también encontró que en 2011-2012 se presentó la sequía más extrema en la zona de estudio, al igual que en otras regiones del país, las condiciones de sequía en la cuenca del Río Fuerte indican sequía extrema en la parte alta y moderada en la parte baja de la cuenca.

La distribución espacial de los índices SPI y SPEI en los meses de mayor intensidad de la sequía indican que la parte alta y media de la cuenca es la más afectada por las sequías, al igual que lo señalado por Ravelo *et al.* Esto indica que en épocas de sequía a una escala de 3 meses se vuelven susceptibles a incendios las áreas de bosque y selva por la falta de humedad; y para las escalas de 6, 12 y 24 meses además de lo anterior, las corrientes (arroyos y ríos) sólo hacen pequeños aportes hídricos o nulos a las presas y obras de almacenamiento, reduciendo así los niveles de almacenamiento.

4. CONCLUSIONES

Se obtuvieron las series de los índices de sequía SPI y SPEI a cuatro escalas temporales para 14 estaciones de la cuenca del río Fuerte durante el periodo de 1961 a 2011. El índice SPEI aportó un nuevo enfoque de la ocurrencia de las sequías en el área de estudio, debido a que su comportamiento reflejó los efectos del cambio climático en las últimas décadas y demostró una clara tendencia del incremento en el número, intensidad, severidad y duración de las sequías.

El SPEI define mejor los periodos de sequía, los cuáles están plenamente vinculados a los cambios estacionales de la temperatura, la cual además controla su comportamiento permitiendo establecer el inicio, término, duración y magnitud de los periodos secos más fácilmente que el SPI. Es por ello que en casi todas las escalas temporales el SPEI presentó menos periodos con sequía, así como una menor intensidad de éstos.

El número de sequías que se presentaron en las series de los índices SPI y SPEI se fueron reduciendo a medida que se aumentaba la escala temporal del índice. 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 62 meses de acuerdo al SPEI 24.

En la cuenca del río Fuerte, las series del SPI y SPEI a escalas de 3 y 6 mostraron la ocurrencia de sequías cada cuatro o cinco años al inicio de las series, pero este ciclo de ocurrencia de la sequía fue modificado a partir de 1980, por lo que la ocurrencia y duración de las sequías se volvió muy variable. Los índices a escalas de 12 y 24 meses mostraron que la sequía a mayor escala temporal empezó a afectar a la cuenca a partir de 1980.

La distribución de la sequía en la cuenca del río Fuerte ubica en la parte alta y media de la cuenca las áreas más afectadas por este fenómeno, por lo que durante el periodo de sequías la escasa captación de agua para las presas ubicadas en la parte media y baja de la cuenca pone en riesgo las actividades productivas y energéticas que dependen ellas. La parte alta y media de la cuenca es la zona más vulnerable a la sequía, por lo que los esfuerzos en materia de conservación y apoyos a la población en estas zonas debe ser prioritario en los planes de prevención y mitigación de las sequías.

El uso de dos índices de sequía permitió un enfoque multifacético de la diversidad climática y su visualización temporal y espacial de este fenómeno en la cuenca.

La gravedad de los efectos de la sequía y su intensificación en el futuro requiere de acciones y el esfuerzo conjunto de todos los sectores de la población, de los diferentes niveles de gobierno y de las instituciones de educación e investigación.

5. LITERATURA CITADA

- Abramowitz, M., and Stegun I.A. (Eds). (1965). Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables. Dover Publications, Inc., New York, New York, 1046 pp.
- Al-Qinna, M., Hammouri, N.A., Obeidat, M.M., Ahmad, F.Y. (2010). Drought analysis in Jordan current and future climates. Climate Change, DOI: 10.1007/s10584-010-9954-y
- Aparicio, F.J. (2001). Fundamentos de hidrología de superficie. Limusa. 10. DF, México. 304 p.
- ASCE. (1996). Hydrology Handbook. American Society of Civil Engineers. 2ª. New York, EE.UU. 769p.
- Beguiría, S., and Vicente, S. (2014). Calculation of the Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index. Package SPEI.R for R or RStudio Program.
- Beguiría, S., and Vicente, S. (2014). Calculation of the Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index. Package SPEI.R for R or RStudio Program. Recuperado de <https://cran.r-project.org/web/packages/SPEI/index.html>.
- Bonaccorso, B., Bordi I., Cancelliere, A., Rossi G. (2003). Spatial variability of Drought: An analysis of the SPI in Sicily. Water Resources Management 17: 273-296.

- Campos, D.F. (1998). Procesos del ciclo hidrológico. Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. 3ª. S.L.P., México. pp. 500.
- Centro Nacional de Prevención de Desastres, CENAPRED. (2013). Atlas Nacional de Riesgos [En Línea]. Disponible en: <http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx> (Revisado el 18 de diciembre de 2013).
- Clarke, C., Charvériat, C., Mora-Castro, S., Collins, M., Keipi, K. (2000). Facing the challenge of natural disasters in Latin America and the Caribbean: an IDB action plan. Sustainable Development Dept. Special Report.
- Coelho, C., and Goddard, L. (2009). El Niño – Induced tropical droughts in climate change projections. *Journal of Climate*, 22: (6456-6476).
- Comisión Nacional del Agua, CONAGUA. (2010). Estadísticas del Agua en México. Comisión Nacional del Agua.- México, edición 2010. Ed: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Comisión Nacional del Agua, CONAGUA. (2014). Programa de medidas preventivas y de mitigación de la sequía. Consejo de Cuenca Ríos Fuerte y Sinaloa. CONAGUA – SEMARNAT, México. pp. 262.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2015). Sistema de Información Geográfica del Agua (SIGA). Recuperado de: <http://sigaconagua.gob.mx/REPDA/Menu/FrameKMZ.htm>

- De Jesús, A., Breña, J.A., Pedrozo, A. (2014). Predicción de sequías mediante el uso de satélites y asimilación de datos. XXIII Congreso Nacional de Hidráulica. México.
- Dilley, M., Chen, R., Deichmann, U., Lerner-Lam, A., and Arnold, M. (2005). Natural Disaster Hotspots: A Global Risk Analysis. World Bank, 145 pp.
- DOF. (2010). Acuerdo por el que se actualiza la disponibilidad media anual de las aguas superficiales en las cuencas hidrológicas Río Sinaloa 1, Arroyo Ocoroni, Arroyo Cabrera y Río Sinaloa 2, mismas que forman parte de la porción de la región hidrológica denominada Río Sinaloa.
- Edossa, D., Woyessa, Y., Welderufael, W. (2014). Analysis of droughts in the Central Region of South Africa and their association with SST anomalies. International Journal of Atmospheric Sciences. pp. 9.
- Edwards, D.C., McKee, T.B., (1997). Characteristics of 20th Century Drought in the United States at Multiple Scales. Atmospheric Science Paper No.634, May 130.
- Escalante, C., Reyes, L. (1998). Identificación y análisis de sequías en la Región Hidrológica Número 10, Sinaloa. Ingeniería Hidráulica en México 12:23-43.
- Escalante, C., Reyes, L. (2005). Análisis de sequías. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería. 1110 pp.
- ESRI. 2013. ArcGIS ® Desktop. Release 10.1.

- Food and Agriculture Organization, FAO. (1983). Guidelines: Land evaluation for Rained Agriculture. FAO Soils Bulletin 52, Rome.
- Gelb A. (1974). Applied Optimal Estimation. Massachusetts, MIT Press. 374 pp.
- Glantz, M., Katz, R., and Nicholls, N. (1991). Teleconnections Linking Worldwide Climate Anomalies. Cambridge University Press, Cambridge.
- Gumbel E.J. (1963). Statistical forecast of droughts. Bull. Int. Assoc. Sci. Hydrol. 8 (1) 5:23.
- Hayes, M., Svoboda, M., Wall, N., Widhalm, M. (2010). The Lincoln Declaration on Drought Indices. Universal Meteorological Drought Index Recommended. American Meteorological Society. pp. 485-488.
- Hargreaves, G.H. (1994). Defining and using reference evapotranspiration. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 120: 1132–1139.
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, IMTA. (2009). Extractor Rápido de Información Climática, ERIC III Versión 2.0.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía, INEGI. (2014). Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0, CEM 3.0. Recuperado de: http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/continuo_elevaciones.aspx
- Jauregui, E. (1995). Rainfall fluctuations and tropical storm activity in Mexico. Erdkunde, 49: (39–48).

- Kalman, R.E. (1960). A new approach to linear filtering and prediction problems. *Journal of Fluids Engineering* 82(1): 35-45.
- Kim, T., Valdés, J.B., Aparicio, J. (2002). Frequency and spatial characteristics of droughts in the Conchos River Basin, Mexico. *Water International*. 27:420-430.
- Linsely, Jr., R.K., Kohler, M.A., Paulhus, J.L.H. (1959). *Applied Hydrology*. McGraw Hill, New York.
- Manatsa, D., Mukwada, G., Siziba, E., Chinyanganya, T. (2010). Analysis of multidimensional aspects in Zimbabwe using the Standardized Precipitation Index (SPI). *Theoretical and Applied Climatology* 102:287-305.
- Matlab® R2015a. MathWorks, Inc.
- McKee, T.B., Doesken, N.J., and Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Eight Conference on Applied Climatology*. Anaheim, CA, American Meteorological Society, 179–184
- Méndez, M., and Magaña, V. (2010). Regional aspects of prolonged meteorological droughts over México and Central America. *Journal of Climate*, DOI: 10.1175/2009JCLI3080.1
- Mendoza, B., Velasco, V., and Jáuregui, E. (2005). A study of historical droughts in southeastern Mexico. *Journal of Climate*, 19: (2916 – 2934).

Mishra, A.K., and Singh, V. P. (2010). A review of drought concepts. Elsevier, Journal of Hydrology. 391:202-216.

National Aeronautic Spatial Administration, NASA. (2015). Global Climate Change. Recuperado de: <http://climate.nasa.gov>

National Drought Mitigation Center, NDMC. (2014). SPI SL 6.exe: Program to calculate Standardized Precipitation Index. Recuperado de: <http://drought.unl.edu/MonitoringTools/DownloadableSPIProgram.aspx>.

National Drought Mitigation Center, NDMC. (2015c). Climate Change. Recuperado de: <http://drought.unl.edu/DroughtBasics/ClimateChange.aspx>

National Drought Mitigation Center, NDMC. (2015b). Comparison of major drought indices: Introduction. Recuperado de: <http://drought.unl.edu/Planning/Monitoring/ComparisonofIndicesIntro.aspx>

National Drought Mitigation Center, NDMC. (2015d). ENSO and Drought Forecasting. Recuperado de: <http://drought.unl.edu/DroughtBasics/ENSOandForecasting.aspx>

National Drought Mitigation Center, NDMC. (2015a). Types of drought. Recuperado de: <http://drought.unl.edu/DroughtBasics/TypesofDrought.aspx>

National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA. (2015). El Niño Theme Page. Recuperado de: <http://www.pmel.noaa.gov/tao/el-nino/el-nino-story.html>

Organización Meteorológica Mundial, OMM. (2013). El estado del clima mundial 2000 – 2010. OMM, Geneva, Suiza. pp. 18.

Office of Technology Assessment, OTA. (1993). Preparing for an Uncertain Climate, Vol. I. OTA–O–567. U.S. Government Printing Office, Washington, D.C. pp. 359.

Palmer, W.C. (1965). Meteorological Drought. US Department of Commerce, Weather Bureau, Research Paper No. 45, p. 58.

Potop, V., and Mozny, M. (2011). The application a new drought index – Standardized Precipitation Evapotranspiration Index in the Czech Republic. Středová, H., Rožnovský, J., Litschmann, T. (Eds): Mikroklima a mezoklima krajinných struktur a antropogenních prostředí. Skalní mlýn, 2. – 4.2.

Programa Nacional Contra la Sequía, PRONACOSE. (2014). Programa de medidas preventivas y de mitigación de la sequía. Consejos de Cuenca Río Fuerte y Sinaloa. SEMARNAT-CONAGUA. México D.F. pp. 262.

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 Córdoba, 31(1): 11-24. Recuperado de: http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1668-298X2014000100002.

RStudio, Inc. 2014. RStudio® Version 0.98.1102.

Servicio Meteorológico Nacional, SMN. (2015). Monitor de Sequía de México. Recuperado de: http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=257&Itemid=74

Servicio Meteorológico Nacional, SMN. (2014). Red de estaciones climatológicas. Recuperado de: http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=42&Itemid=75

Servicio Meteorológico Nacional, SMN. (2015). Índice Estandarizado de Precipitación. Recuperado de: http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=257&Itemid=74

Servicio Meteorológico Nacional, SMN. (2014). Sistema de información climática computarizada CLICOM.

Simon, D. (2001). Kalman filtering. *Embedded Systems Programming* 14(6): 72-79.

Schneider, S.H. (Ed.). (1996). *Encyclopedia of Climate and Weather*. Oxford University Press, New York.

Thom, H. (1966). *Some Methods of Climatological Analysis*. WMO Technical Note Number 81, Secretariat of the World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 53 pp.

Thorntwaite, C.W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, 38, 55–94.

Torrecillas, C. E., Miguel, A. J., y Ravelo, A., (2013). Proyecto de Coordinación, Seguimiento, Supervisión, Integración y Análisis del Programa de Medidas para Prevenir y Enfrentar la Sequía. Etapa 1 de 6: Programas de Medidas Preventivas y de Mitigación de la Sequía (PMPMS) en el Consejo de Cuenca Presidio al San Pedro. Región Hidrológica Administrativa III Pacifico Norte. Comisión Nacional del Agua Sinaloa. Preparado por la Universidad Autónoma de Sinaloa, Abril-Diciembre, 2013.

United Nations Environment Programme, UNEP. (2015). *Climate Change*. Recuperado de: <http://www.unep.org/climatechange>

- Velasco, I., Aparicio, J., Valdés, J.B., Velázquez, J., Kim, T. (2004). Evaluación de índices de sequía en las cuencas de afluentes del río Bravo/Grande. *Ingeniería Hidráulica en México*. 19:37-53.
- Vicente, S.S, Beguería, S., López, M.J. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Journal of Climate*. 23: 1696-1718.
- Vicente, S., Beguería, S., Lorenzo, J., Camareno, C., López, J., Azorin, C., Revuelto, J., Morán, E., Sánchez, A. (2012). Performance of drought indices for ecological, agricultural, and hydrological applications. *Earth Interactions* 16(10). pp. 27.
- UN Secretariat General. (1994). United Nations Convention to Combat Drought and Desertification in Countries Experiencing Serious Droughts and/or Desertification, Particularly in Africa. Paris.
- Wagan, B., Zhang, Z., Baoping, F., Han, S., and Kabo-bah, A. (2015). Drought trends and temperature influence in Zhanghe river Basin, China. *Advances in Meteorology*, 2015:9, DOI: 10.1155/2015/160953.
- Welch, G. and Bishop, G. (2006). An introduction to the Kalman filter. University of North Carolina, Chapel Hill.
- Wilhite, D.A., Glantz, M.H. (1985). Understanding the drought phenomenon: the role of definitions. *Water Int.* 10, 111–120.

World Meteorological Organization, WMO. (1986). Report on Drought and Countries Affected by Drought During 1974–1985, WMO, Geneva, p. 118.

World Meteorological Organization, WMO. (2012). Standardized Precipitation Index User Guide. WMO, Geneva. pp. 24.

Wu, H., and Wilhite, D. (2004). An operational Drought Risk Assessment Model for Nebraska, USA. *Natural Hazards* 33: 1-24.

Ye, X., Li, Y., Li, X., Xu, C., and Zhang Q. (2015). Investigation of the variability and implications of meteorological dry/wet conditions in the Poyang Lake Catchment, China, during the period 1960-2010. *Advances in Meteorology*, 2015:11, DOI: 10.1155/2015/928534.

CAPÍTULO 3. PRONÓSTICO DE SEQUÍAS EN LA CUENCA DEL RÍO FUERTE

Mónica Castillo Castillo¹ Laura Alicia Ibáñez Castillo²

RESUMEN

Dada la tendencia del incremento en la ocurrencia, intensidad y duración de los periodos secos a nivel mundial es importante generar herramientas de pronóstico para estimar con anticipación el estado futuro de las condiciones hídricas. En la cuenca del río Fuerte se presentan sequías recurrentemente, en los años recientes sus efectos negativos han sido más severos impactando principalmente en el sector productivo primario y energético. Este trabajo consistió en la implementación de cuatro metodologías utilizando el filtro de Kalman Discreto (DKF) y el Ensemble (EnKF) con dos modelos autorregresivos para el pronóstico de los índices SPI y SPEI en el periodo 1961 a 2011. El pronóstico se realizó para las series del SPI y SPEI de 14 estaciones meteorológicas, con 1, 2, 3 y 4 meses de anticipación. Se obtuvo que la metodología DKF-AR (2) presentó el mejor ajuste en el pronóstico de ambos índices. El pronóstico de SPI y SPEI a 3 y 6 meses no es satisfactorio en términos de RMSE, pero según Nash-Sutcliffe el modelo sí se considera adecuado. El pronóstico a una escala de 12 meses se consideró la adecuada en términos de operatividad. El pronóstico del SPEI presentó mejor ajuste que el del SPI en todas las escalas temporales.

Palabras clave: filtros de Kalman, modelos autorregresivos, índices de sequía

ABSTRACT

Given the tendency of increase in the occurrence, severity and duration of dry periods worldwide it is important to generate forecasting tools to estimate in advance the future state of water conditions. In the Fuerte river basin droughts occur frequently, in recent years the negative effects have been more severe impact mainly in the primary and energy sector. This work consisted of the implementation of four methodologies using the Discrete Kalman filter (DKF) and the Ensemble (EnKF) with two autoregressive models for prediction of SPI and SPEI indices in the period 1961 to 2011. The forecast was made for SPI and SPEI series of 14 weather stations, with 1, 2, 3 and 4 months ahead. It was found that the DKF-AR (2) presented the best adjustment methodology in forecasting both indices. The SPI and SPEI forecasted to 3 and 6 months of time scale is not satisfactory in terms of RMSE, but according to Nash-Sutcliffe model itself is considered adequate. The forecast on a scale of 12 months is considered adequate in terms of operability. The forecast presented SPEI better fit than the SPI on monthly scale.

Keywords: Kalman filters, autoregressive models, drought indices

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Pronóstico de sequías

La sequía es un evento hidrometeorológico directamente relacionado a la precipitación que consiste en su escasez o nula presencia en un sitio durante un periodo de tiempo. En los años recientes el impacto de las sequías ha sido agravado por el aumento en la demanda de agua y la variabilidad en las variables climatológicas debido al cambio climático, por lo que la hidrología de la sequía ha tomado mucha importancia (Mishra and Singh, 2011).

Generalmente, las sequías pueden ser clasificadas dentro de agrícola, hidrológica o meteorológica dentro de las cuáles evitar las sequías meteorológicas es imposible; sin embargo, pueden ser pronosticadas y monitoreadas para mitigar sus impactos adversos. Las investigaciones cualitativas espaciales y temporales del comportamiento de las sequías pueden ayudar en los planes de alerta a través de herramientas indirectas de pronóstico mediante los llamados “índices de sequía” (Al-Qinna *et al.* 2010).

Una de las deficiencias básicas en la mitigación de los efectos de las sequías es la incapacidad para pronosticar condiciones de sequía razonablemente bien con anticipación ya sea por unos meses o temporadas (Mishra and Singh, 2005). Yevjevich (1967) fue casi el primero en intentar una predicción de las propiedades de la sequía usando la distribución de probabilidad geométrica, definiendo una sequía de k años como k años consecutivos cuando no hay recursos hídricos adecuados. Saldariaga y Yevjevich (1970)

continuaron el desarrollo de la teoría de ejecución, incorporando conceptos de análisis de series de tiempo en formulaciones para predecir la ocurrencia de sequías.

Se ha realizado considerable trabajo sobre modelación de varios aspectos de la sequía, tales como la identificación y predicción de su duración y severidad, sin embargo, un mayor reto en la investigación es desarrollar adecuadas técnicas para el pronóstico de los puntos de inicio y término de las sequías (Mishra and Singh, 2011).

Comprender las sequías y modelar sus componentes es importante en la planeación de los recursos naturales, dentro de la modelación de sequías el pronóstico es un componente importante (figura _).

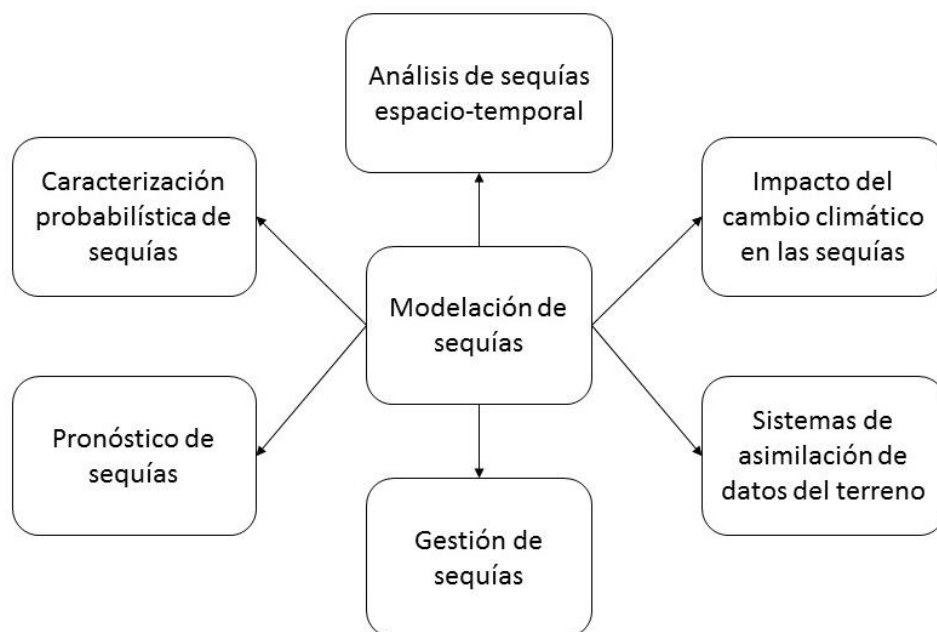


Figura. 39. Diferentes componentes de la modelación de sequías (Mishra and Singh, 2011).

El pronóstico de sequías es un componente crítico de la hidrología de sequías que juega un rol principal en la gestión de riesgos, preparación y mitigación de este fenómeno, por lo que es una necesidad el desarrollo de métodos y técnicas para pronosticar las sequías (Mishra and Singh, 2011). El modelo ARMA (Autoregressive Moving Average, Autorregresivo de Media Móvil), técnicas de reconocimiento de patrones, modelos físicamente basados usando el Índice de Severidad de Sequías de Palmer (PDSI), el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI), un índice de adecuación de humedad involucrando Cadenas de Markov, o la noción de probabilidad condicional, parece que ofrecen un potencial para desarrollar pronósticos confiables y robustos para alcanzar este objetivo (Mishra and Singh, 2005)

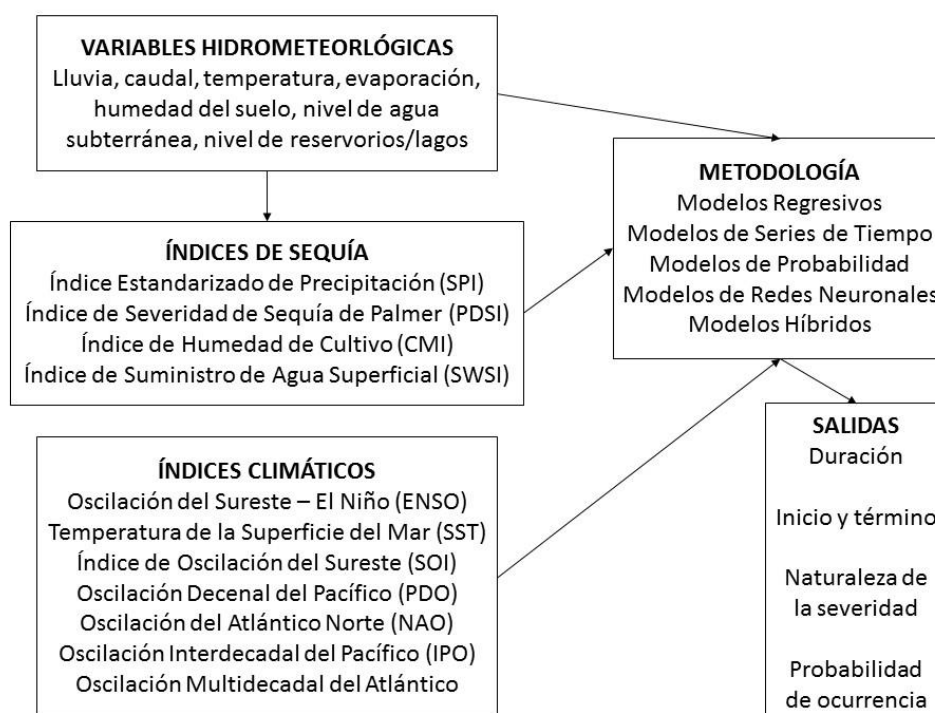


Figura. 40. Componentes del pronóstico de sequías (Mishra and Singh, 2011).

1.2. Filtro de Kalman

El filtro de Kalman es un conjunto de ecuaciones matemáticas para estimar el estado de un proceso minimizando la media del error cuadrático (Welch y Bishop, 2006). En 1960 R.E. Kalman propuso una solución recursiva al problema del filtrado lineal de datos discretos y desde entonces ha tenido múltiples aplicaciones en diversos campos de la ciencia.

El filtro de Kalman opera por medio de un mecanismo de predicción y corrección, el algoritmo pronostica el nuevo estado a partir de una estimación previa, añadiendo un término de corrección proporcional al error de predicción, de tal forma que este último es minimizado estadísticamente (Welch and Bishop, 2006). Si se tiene conocimiento del sistema dinámico, las estadísticas del sistema ruidoso, los errores de medición y las condiciones iniciales, se puede estimar el estado para un sistema dinámico (Gelb, 1974).

El filtro de Kalman no se considera un modelo, pero es usado en conjunto con modelos matemáticos. Mediante la formulación de modelos en espacio de estados es posible incluir un sistema de ecuaciones y mediciones dentro del algoritmo del filtro de Kalman. El sistema de ecuaciones consiste de un componente determinístico y un componente estocástico que reflejan incertidumbre en el modelo (Lee y Singh, 1998).

1.2.1. Filtro de Kalman Discreto (DKF)

El filtro de Kalman Discreto se desempeña suponiendo que el sistema puede ser descrito a través de un modelo estocástico lineal, en donde el error asociado tanto al sistema como a la información adicional que se incorpora en el mismo, tiene una distribución normal con media cero y varianza determinada (Ramírez, 2003).

Según Kalman (1960), Simon (2001) Welch y Bishop (2006), el filtro trata de estimar el estado $X \in R^n$ de un proceso controlado en tiempo discreto, el cual está descrito por la ecuación en diferencias lineales de tipo estocástica:

$$x_{t+1} = A_t x_t + B_t u_t + w_t \quad (18)$$

Dónde:

x_{t+1} = vector de estado del sistema en el tiempo (t+1), dimensiones (nx1),

x_t = vector de estado del sistema en el tiempo (t), dimensiones (nx1),

u_t = vector de las entradas del control del sistema, dimensiones (kx1),

A_t = matriz de transición entre los estados, dimensiones (nxn),

B_t = matriz de control, dimensiones (nxk),

w_t = vector con dimensiones que contiene los términos de ruido del proceso para cada parámetro en el vector de estado, el ruido del proceso se extrae de una distribución normal de media cero y varianza Q (nx1).

La segunda ecuación es la medición que representa las observaciones que miden el estado del sistema.

$$Z_t = H_t x_t + v_t \quad (19)$$

Dónde:

Z_t = vector de mediciones actuales del sistema, dimensiones (mx1),

H_t = matriz de coeficientes de medición, dimensiones (mxn),

v_t = vector de las entradas de control del sistema, dimensiones (mx1),

Las variables aleatorias w_t y v_t (ecuación 18 y 19) son independientes, sin correlación una de la otra en cualquier tiempo y tienen una función de distribución de probabilidad normal, tal que:

$$w_t \sim N(0, Q_t) \quad ; \quad v_t \sim N(0, R_t) \quad (20)$$

La matriz A ($n \times n$) en la ecuación (18), relaciona el estado en el periodo de tiempo previo t al estado que ocurre en el momento $t+1$. Aunque esta matriz puede cambiar en el tiempo habitualmente se considera constante. La matriz B ($n \times k$) relaciona el control opcional de entrada exógena u con el estado x y la matriz H ($m \times n$) en la ecuación (19) relaciona el estado con la medición Z_t y también es considerada constante (Welch y Bishop, 2006).

El proceso computacional completo para el filtro de Kalman Discreto es descrito en el diagrama esquemático que se muestra en la figura 41.

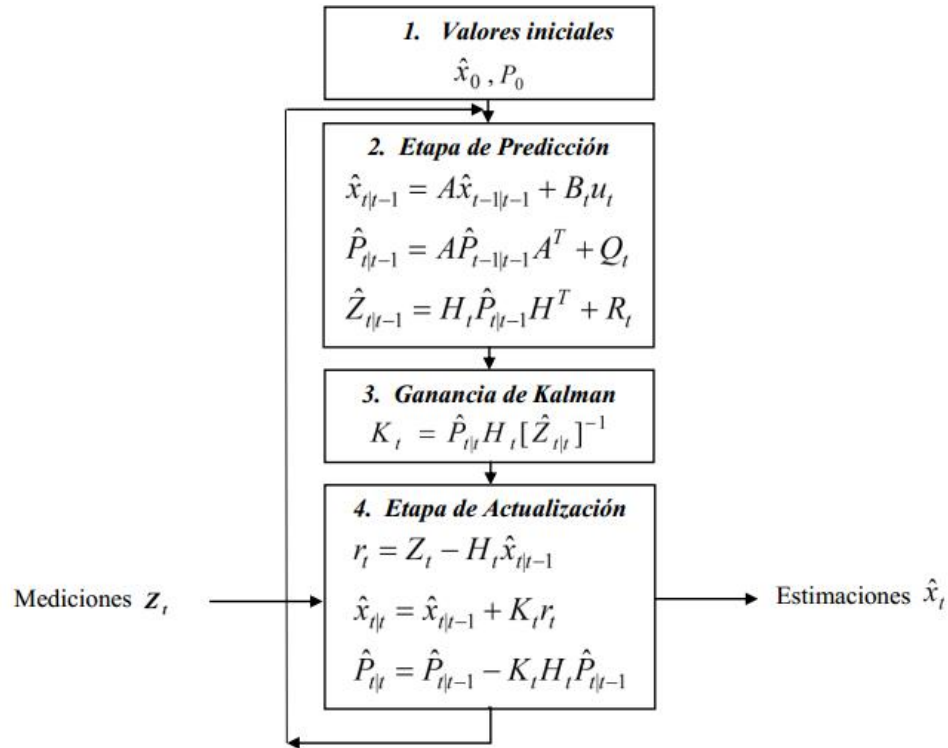


Figura. 41. Algoritmo para el filtro de Kalman Discreto.

Dónde:

$\hat{X}_0$ = Representa estado inicial del sistema,

P_0 = Representa el error de covarianza inicial,

$\hat{X}_{t|t-1}$ = Predicción de la variable de estado en el tiempo (t) dado el tiempo (t-1),

$\hat{P}_{t|t-1}$ = Predicción de la covarianza de error en el tiempo (t) dado el tiempo (t-1),

$\hat{Z}_{t|t-1}$ = Medición estimada en el tiempo (t) dado el tiempo (t-1),

K_t = Ganancia de Kalman,

r_t = Residual de cómputo.

1.2.2. Filtro de Kalman Ensemble o de Conjuntos (EnKF)

El filtro de Kalman Ensemble (EnKF) fue originalmente propuesto como una alternativa estocástica o Monte Carlo al determinista filtro de Kalman Extendido (EKF), fue diseñado para resolver los dos principales problemas relacionados al uso del EKF con un sistema no lineal en grandes espacios de estados: el uso de una esquema cerrado de aproximación y el enorme requerimiento computacional (Evensen, 2009). A diferencia del EKF, la evaluación de la ganancia del filtro $\hat{K}_k$ en el EnKF no involucra una aproximación de la no linealidad $f(x, u)$ and $h(x)$ (Gillijns *et al.* 2006).

El filtro de Kalman Ensemble ha sido examinado y aplicado en un número de estudios desde que fue introducido por primero vez por Evensen en 1994. El EnKF ha ganado popularidad por su formulación conceptual simple y relativamente fácil implementación. Además los requerimientos computacionales son accesibles y comparable con otros populares métodos sofisticados de asimilación (Evensen, 2003).

El filtro de Kalman Ensemble es un estimador subóptimo, donde los errores estadísticos son predichos usando una integración de conjuntos para resolver la ecuación Fokker-Plank en tres etapas (Gillijns *et al.* 2006).

El filtro de Kalman Ensemble considera un sistema no lineal de tiempo discreto, con una ecuación del sistema:

$$x_{k+1} = f(x_k, u_k) + w_k \quad (21)$$

Y una ecuación de las mediciones:

$$y_k = h(x_k) + v_k \quad (22)$$

Se asume que w_k y v_k son un proceso no estacionario de ruido blanco con media cero y matrices de covarianza Q_k y R_k , respectivamente. Además asumimos que x_0 , w_k and v_k no están correlacionadas (Gillijns *et al.*, 2006).

El proceso de análisis y pronóstico del Filtro de Kalman Ensemble se resume en los siguientes pasos:

Análisis:

- I. Ganancia de Kalman $\hat{K}_k = \hat{P}_{xy_k}^f (\hat{P}_{yy_k}^f)^{-1}$
- II. Obtención de los estados actualizados $x_k^{a_i} = x_k^{f_i} + \hat{K}_k (y_k^i - h(x_k^{f_i}))$
- III. Media del conjunto actualizado $\bar{x}_k^a \triangleq \frac{1}{q} \sum_{i=1}^q x_k^{a_i}$

Pronóstico:

- I. Obtención de los estados pronosticados $x_{k+1}^{f_i} = f(x_k^{a_i}, u_k) + w_k^i$
- II. Media de los estados pronosticados $\bar{x}_{k+1}^f \triangleq \frac{1}{q} \sum_{i=1}^q x_{k+1}^{f_i}$
- III. Error medio conjunto pronosticado $E_k^f \triangleq [x_{k+1}^{f_1} - \bar{x}_{k+1}^f \dots x_{k+1}^{f_q} - \bar{x}_{k+1}^f]$
- IV. Error medio del conjunto de salida $E_{y_k}^a \triangleq [y_k^{f_1} - \bar{y}_k^f \dots y_k^{f_q} - \bar{y}_k^f]$
- V. Error de covarianza pronosticado $\hat{P}_{xy_k}^f \triangleq \frac{1}{q-1} E_k^f (E_{y_k}^f)^T$
- VI. Error de covarianza actualizado $\hat{P}_{yy_k}^f \triangleq \frac{1}{q-1} E_{y_k}^f (E_{y_k}^f)^T$

1.3. Modelos autorregresivos

Existen diversas técnicas para el análisis de series de tiempo de datos climatológicos, como las técnicas clásicas de análisis espectral, los análisis de Gabor y de ondas pequeñas, estos análisis son particularmente idóneos para representar series temporales con subintervalos que tienen diferentes características.

Sin embargo, estos métodos tienen ciertas limitaciones, lo cual dificulta la interpretación de los resultados, lo cual puede llevar a conclusiones erróneas. Otras técnicas que se utilizan comúnmente para analizar las series temporales son los análisis de autorregresión. La autorregresión es una regresión lineal de un valor de una serie temporal respecto de uno o más valores precedentes de la serie (autocorrelación) (WMO, 2011).

Los modelos autorregresivos han sido utilizados ampliamente en la hidrología y la meteorología, su gran aplicación se debe a que la forma autorregresiva tiene dependencia del tiempo y es fácil de usar. En 2014, De Jesús *et al.* realizaron un estudio sobre la predicción de la sequía agrícola en la cuenca del río Bravo mediante el uso de satélites y asimilación de datos, encontrando que los resultados del modelo autorregresivo utilizado para estimar la humedad del suelo permitieron pronosticar condiciones de sequía similares a las reportadas por el Monitor de Sequía de Norteamérica (NADM).

1.3.1. Modelos autorregresivos de orden p AR (p)

Un proceso autorregresivo, es aquel que hace regresiones sobre sí mismo, un proceso autorregresivo $\{Y_t\}$ de orden (p) satisface la ecuación:

$$Y_t = \alpha_1 Y_{t-1} + \alpha_2 Y_{t-2} + \alpha_3 Y_{t-3} + \dots + \alpha_p Y_{t-p} + e(t) \quad (23)$$

El valor actual de la serie Y_t es una combinación lineal de sus mismos valores pasados del p más reciente más una innovación, el término $e(t)$, que incorpora todo lo nuevo en la serie al tiempo t que no es explicado por los valores pasados (Cryer-Chan, 2008).

1.3.2. Modelos autorregresivos con entrada exógena ARX

Este tipo de modelos permite la entrada de una variable externa que puede mejorar la predicción del modelo autorregresivo. La estructura que define este tipo de modelos es la siguiente, expresada en diferencias lineales:

$$Y_t + \alpha_1 Y_{t-1} + \alpha_2 Y_{t-2} + \dots + \alpha_{na} Y_{t-na} = \beta_1 U_{t-nk} + \beta_2 U_{t-nk-1} + \beta_{nb} U_{t-nk-nb+1} + e(t) \quad (24)$$

En hidrología este modelo es conocido a través de la siguiente notación:

$$Y_t = \sum_{i=1}^{na} \alpha_i Y_{t-i} + \sum_{j=1}^{nb} \beta_j U_{t-j} + e(t) \quad (25)$$

Dónde:

Y_t = salida del modelo ARX para $t = t - 1, t = t - na$,

U_{t-j} = entrada exógena para el modelo para $t=t-nk, t= t-nk-1, t=t-nk-nb+1$,

$e(t)$ = es el ruido blanco o gaussiano asociado con la salida,

De la ecuación (25), el índice na hacen referencia al número de parámetros autorregresivos para la salida y nb hace referencia al número de parámetros para el vector de entradas exógeno y nk expresa el número de retrasos de la entrada exógena con respecto a la salida.

1.3.3. Formulación en espacio de estados del modelo ARX

La formulación en espacio de estados es un método que convierte los problemas originales de ecuaciones de variables dinámicas, generalmente expresadas en ecuaciones diferenciales (de primer orden o mayor), dentro de grupos de primero orden, y entonces las agrupa en una sola ecuación para finalmente manejarla usando el método de la teoría del control mediante las técnicas de álgebra lineal, este método es muy útil en el análisis de múltiples entradas y múltiples salidas del sistema (Shun, 2012).

De acuerdo a la formulación en espacio de estados, la dinámica de un sistema es representada por ecuaciones diferenciales de primer orden, permitiendo una representación más sencilla y proporcionando descripciones estadísticas del comportamiento de los sistemas (Gelb, 1974).

La formulación del sistema es

$$\begin{aligned}x_{t+1} &= f(x_t, p_t, t) \\ z_t &= g(x_t, p_t, t)\end{aligned}\tag{26}$$

Los modelos en espacio de estados son esencialmente una notación conveniente para abordar el manejo de un amplio rango de modelos de series de tiempo. En la estimación y control de sistemas, esta metodología se basa en modelos estocásticos, dado el supuesto de la naturaleza errónea de las mediciones (Ramírez, 2003).

De acuerdo a la notación en espacio de estados, la estructura del modelo ARX puede representarse de la siguiente manera (ecuación 27) de tal manera que los tamaños de las matrices A, B y H tengan las dimensiones adecuadas para poder operar bajo esta formulación.

$$x_{t+1} = A_t x_t + B_t u_t + w(t)\tag{27}$$

$$z_{t+1} = H_t x_t + v(t)$$

Dónde:

A= matriz (n x n) de parámetros α_i para las series de datos del SPI y SPEI de cada una de las 14 estaciones meteorológicas seleccionadas,

B= matriz (n x k) de parámetros exógenos β_j para las series de precipitación, evapotranspiración, temperatura mínima y máxima mensuales de cada estación,

u= vector (k x 1) que contiene las series de las variables exógenas probadas,

Con esta configuración el modelo ARX puede ser operado dentro del algoritmo del filtro de Kalman Discreto y Ensemble para pronosticar los estados futuros ($t+1$, $t+2$, $t+3$ y $t+4$) del SPI y SPEI con la inclusión las variables exógenas mencionadas anteriormente.

1.4. Filtros de Kalman en el pronóstico de sequías

Desde que fue propuesto por Kalman, en 1960, el filtro de Kalman como técnica recursiva para la estimación de estados ha tenido múltiples aplicaciones en diversas áreas de la ciencia. En el caso de la hidrología, fue Hino (1973) quien publicó una de las primeras aplicaciones del filtro de Kalman en los recursos hídricos, cuyo estudio se basó en la aplicación de filtro para la estimación del hidrograma unitario (HUI) (Valdés *et al.* 1980). Después en 1976, Szollosi-Nagy, propuso un algoritmo adaptado de identificación y predicción para el pronóstico en tiempo real de series de tiempo hidrológicas.

Valdés *et al.* en 1980, mediante un reporte detallado de la aplicación de filtros de Kalman en Hidrología, donde señalan que la aplicación de modelos de caja negra basados en la teoría de análisis de sistemas para la simulación de series de caudales, les permitió identificar la función de respuesta a partir del hidrograma unitario instantáneo de dos cuencas en Venezuela.

El pronóstico de variables hidroclimáticas y la incorporación de sus límites de error son invaluable en la planeación de los recursos hídricos y su operación

bajo condiciones de incertidumbre, debido a la necesidad de prevenir y controlar los devastadores efectos de la sequía. Diversos trabajos se han desarrollado en el mundo en un esfuerzo por probar herramientas de pronóstico para su aplicación en el fenómeno de las sequías, el filtro de Kalman es considerada una de las técnicas más prometedoras para ello (Hosung, 1995). En 1997, Liu *et al.*, utilizó el Filtro de Kalman para el pronóstico de sequías en la región del Golfo de Texas, relacionando la variabilidad temporal y espacial de las anomalías hidrometeorológicas con el fenómeno climático interanual e intraestacional El Niño-Southern Oscillation.

Hosung (1995) del Departamento de Evaluación de Recursos Hídricos de Palm Beach, Florida, realizó un estudio titulado Pronóstico y Manejo de las condiciones de Sequía Subterránea en Collier County, consistió en pronosticar mediante el filtro de Kalman los niveles de agua subterránea con un mes de adelanto. Liu *et al.* (1998) formalizaron el marco de un modelo de pronóstico hidrológico operacional basado en el filtro de Kalman y lo aplicaron en el pronóstico de variables hidrológicas de una región tropical, como parte de un estudio sobre el análisis de fusión y error del pronóstico de anomalía hidrometeorológica regional condicionada sobre precursores climáticos, donde el pronóstico estuvo basado en la variabilidad temporal y espacial de las anomalías hidrometeorológicas y su relación con el fenómeno climático interanual e intraestacional El Niño – Southern Oscillation.

Muchos métodos de pronóstico actualmente en uso son subóptimos y todavía dependen de una elección juiciosa que es ejercida por el

pronosticador, el filtro de Kalman Ensemble es ampliamente utilizado para propagar y describir la incertidumbre del pronóstico. El Centro Europeo para el Pronóstico del Clima de Mediano Rango y otras agencias internacionales han estado investigando el uso de conjuntos basados en sistemas convectivos de mesoescala (WMO, 2011).

Hosung (1994) desarrolló un esquema de control para el manejo de regional de la sequía en aguas subterráneas de un acuífero multicapa en Collier County, Florida. Este esquema consistió en una ecuación de pronóstico basada en el algoritmo del filtro de Kalman asociado con la autorregresión espacio-tiempo con un modelo de variables exógenas. Los resultados de la simulación generaron varios eventos de sequía con diferentes frecuencias, mostrando que la reducción estimada de la recarga es linealmente proporcional al logaritmo del periodo de retorno de la sequía antecedente.

En México son escasos los estudios realizados sobre pronóstico de sequías, no se encontró ninguno de aplicación de filtros de Kalman para realizarlo. Sin embargo, en la revisión se encontró un estudio realizado por Ravelo *et al.* (2014) sobre detección, evaluación y pronóstico de las sequías en la región del Organismo de Cuenca Pacífico Norte. Este estudio se realizó para el periodo 1978 – 2012, con el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI), el índice de severidad de sequía de Palmer (PDSI) y el Índice de Diferencia Normalizada de la Vegetación (NDVI), y el pronóstico fue realizado mediante redes neuronales. Los resultados arrojaron dos periodos de condiciones extremas: 2004-2005 con exceso hídrico, y 2011-2012 con sequías severas.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología que se describe a continuación se desarrolló para el realizar el pronóstico de los índices de sequía SPI y SPEI de cuatro escalas temporales (3, 6, 12 y 24 meses) para 14 estaciones meteorológicas distribuidas en la cuenca del río Fuerte, localizada al noroeste de México. Se implementaron 4 metodologías con el objetivo de comparar sus resultados y encontrar la que genere los mejores resultados en el pronóstico a 1, 2, 3 y 4 meses de anticipación.

Las primeras dos metodologías fueron realizadas con el algoritmo del filtro de Kalman Discreto (DKF) y dos modelos autorregresivos, uno de segundo orden AR (2) y uno con entrada exógena ARX. Las dos restantes se implementaron con el filtro de Kalman Ensemble o de Conjuntos (EnKF) de la misma manera que el DKF, con los modelos AR (2) y ARX. Los enfoques utilizados para el pronóstico del SPI y SPEI fueron: DKF-AR (2), DKF-ARX, EnKF-AR (2) y EnKF-ARX.

Los datos necesarios para realizar el pronóstico fueron las series el SPI y SPEI, además de las series de datos de las variables exógenas empleadas con el modelo ARX, que fueron: precipitación (Pt), evapotranspiración (PET, estimada con el método de Hargreaves), temperatura mínima (Tmin) y máxima (Tmax). Las series de datos empleadas abarcan el periodo de 1961 a 2011, fueron obtenidos del CLICOM (SMN) y del ERIC III 2.0 (IMTA, 2009).

2.1. DKF

La metodología desarrollada para el pronóstico con el DKF tiene como referencia el trabajo realizado por González *et al.* (2015) sobre pronóstico de caudales a corto plazo en dos cuencas del centro y del golfo de México; y en el realizado por Valdés *et al.* (1980) sobre la predicción de variables hidrológicas. Se llevó a cabo adaptando y modificando la metodología del pronóstico a las características de la sequía y de las variables a pronosticar.

2.1.1. DKF – AR (2)

El DKF fue utilizado para predecir los valores de los índices en tiempo real para una estación dada, entendiendo que los valores del SPI y SPEI en un tiempo determinado (mes) están en función de:

- I. De la escala temporal del índice (3, 6, 12 o 24 meses)
- II. La precipitación de los meses anteriores para el SPI
- III. El mes, la precipitación, las temperaturas mínimas y máximas de los meses anteriores para el SPEI

El modelo para representar los estados de los índices al final de un mes determinado se puede describir como:

$$SPI(t) = \sum_{i=1}^{n_0} a_i SPI(t-1) + \sum_{j=1}^{n_k} b_{kj} u_k SPI(t-j) + \delta(t) \quad (28)$$

$$SPEI(t) = \sum_{i=1}^{n_0} a_i SPEI(t-1) + \sum_{j=1}^{n_k} b_{kj} u_k SPEI(t-j) + \delta(t)$$

Dónde:

$SPI(t)$ = al valor del SPI para un mes determinado a una escala determinada,

$SPEI(t)$ = al valor del SPEI para un mes determinado a una escala determinada,

n_0 = es el número de términos autorregresivos,

n_k = es el número de términos de la estación,

$\delta(t)$ = es el ruido de la medición,

El algoritmo del filtro de Kalman Discreto está compuesto por las etapas de predicción y corrección, las cuales fueron configuradas de la siguiente manera:

- a. Para el estado inicial el valor esperado fue definido tal que $E[\hat{x}] = 0$. La matriz de covarianza del estado inicial se definió como $P_0 = K \cdot I$, donde K es un escalar lo suficientemente grande para reflejar la incertidumbre de los supuestos iniciales, y donde I es la matriz identidad de tamaño $(n \times n)$.

- b. La matriz A en la ecuación de predicción se consideró invariante en el tiempo para cada relación del estado $(t+1)$ con el estado en el tiempo (t) .
- c. No fue considerada la matriz de control $B*u$ debido a que se emplean los estimadores de estado.
- d. El vector H en la ecuación de medición se conformó con los datos del índice registrados en la estación.
- e. La matriz que contiene el ruido en la medición para el tiempo t se representó como una proporción del estado en el tiempo $(t - 1)$, de tal modo que $\alpha * SPI/SPEI(t - 1)$, donde α es una constante de proporcionalidad que representa un error constante.

En el caso de las series del SPI y SPEI, donde su cálculo se realiza mediante programas computacionales y está poco susceptible a ser alterado por el humano, el valor de α que se empleó fue igual a 0.0001. Si α es mayor a este valor, se supone que los errores en las mediciones son más altos de lo que en realidad son; esto ocurrió generalmente en las estaciones con mayor estabilidad en sus datos donde para valores más altos de α (0.05, 0.01, 0.005) se generaron valores en el pronóstico que exceden el rango de valores de los índices.

Los valores de los índices SPI y SPEI utilizados en la matriz de convolución para el pronóstico en el tiempo $(t+1)$ se encuentran a nivel mensual para cada una de las 14 estaciones de la cuenca del río Fuerte.

2.1.2. DKF – ARX

Se implementó un modelo autorregresivo con entrada exógena ARX para el pronóstico de los índices de sequías SPI y SPEI a nivel mensual, las variables exógenas que se probaron fueron: precipitación, evaporación, temperatura mínima y máxima mensuales, para cada escala temporal de los índices y para cada estación meteorológica.

El uso de estas variables exógenas dentro del pronóstico de los índices de sequías se realizó para conocer si su inclusión dentro del algoritmo del filtro de Kalman Discreto puede mejorar el pronóstico de los índices para cualquier escala, cada una de las variables probadas se consideró como un pulso sometido a convolución dentro del modelo de caja negra establecido.

Para crear el modelo ARX se empleó el programa Matlab® mediante una herramienta llamada “Identification System”, con la cual se obtuvieron los parámetros A y B, además se obtuvo el orden p del proceso autorregresivo, tomando en cuenta el principio de simplicidad. De esta manera, la representación del modelo en notación de espacio de estados fue necesaria para operar el DKF mediante una rutina de programación y realizar el pronóstico en el tiempo $(t+1)$ dado el tiempo (t) como se describe en la siguiente ecuación:

$$x_{t+1} = A_t x_t + B_t u_t + w(t) \quad (29)$$

$$z_{t+1} = H_t x_t + v(t)$$

Dónde:

A= es la matriz (n x n) de parámetros α_i para las series de datos del SPI y SPEI de cada una de las 14 estaciones meteorológicas seleccionadas,

B= es la matriz (n x k) de parámetros exógenos β_j para las series de precipitación, evapotranspiración, temperatura mínima y máxima mensuales de cada estación,

u= es el vector (k x 1) que contiene las series de las variables exógenas probadas,

w(t), v(t)= representan los ruidos gaussianos del proceso y de las mediciones con propiedades tal que $w(t) \sim N(0, Q)$ y $v(t) \sim N(0, R)$,

Con esta configuración el modelo ARX puede ser operado dentro del algoritmo del DKF para pronosticar el estado (t+1) del SPI y SPEI con la inclusión las variables exógenas.

Con el objetivo de encontrar diferencia entre los pronósticos para determinados L pasos (meses) a futuro, es decir, $x_{t+1|t}, x_{t+2|t}, \dots, x_{t+L|t}$ se ejecutó una rutina de programación en Matlab®. El procedimiento se realizó de la siguiente manera: se estimó el valor del índice para el estado (t+1) con información del estado (t), entonces, sin actualizar, se estimaron los estados (t+2), (t+3), ..., (t+L) con base en el estado (t) también. Una vez en la posición deseada, se realizó la actualización del primer estado pronosticado (con la

medición del índice al tiempo $(t+1)$), y el ciclo se repitió n veces hasta finalizar la serie de datos.

En la figura 42 se puede apreciar el proceso realizado para el pronóstico a L pasos en el tiempo.

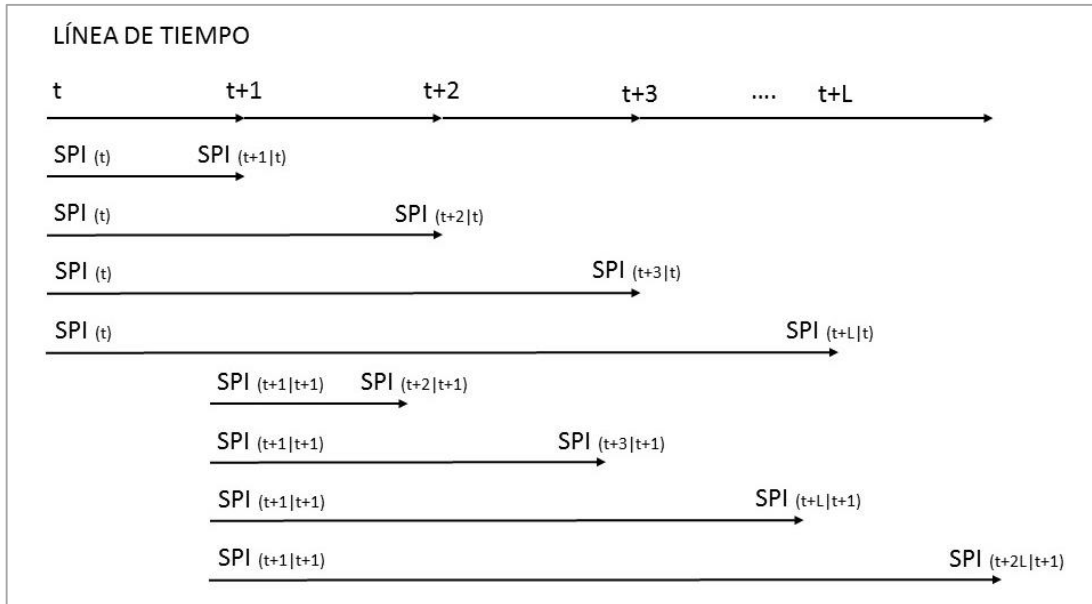


Figura. 42. Descripción del pronóstico del SPI para L pasos adelante.

Definidos los parámetros hacia adelante y teniendo en cuenta que los parámetros del modelo pueden variar en función de la estacionalidad de las variables, ya que en algunas estaciones se pueden presentar dos periodos de lluvia al año o debido a fenómenos extremos como los ciclones que generan excesos de humedad importantes o a la variación estacional de la temperatura, se propuso incluir dentro de la rutina de programación un periodo previo para la estimación de los parámetros del modelo ARX antes de iniciar el pronóstico, con el objetivo de estimar los parámetros del modelo

en función del tiempo, ajustándose a las condiciones de las variables que intervienen en el pronóstico.

Mediante este ajuste, la implementación del DKF se hace dinámica y con matrices de estado que varían en cada periodo definido, realizando una calibración que disminuye el ruido generado en el proceso representado como $w(t)$ y se adapta a los cambios que se producen en la serie de los índices y las variables exógenas, las cuales van cambiando durante su periodo de análisis. En la figura 43 se describe el proceso del pronóstico por periodos.

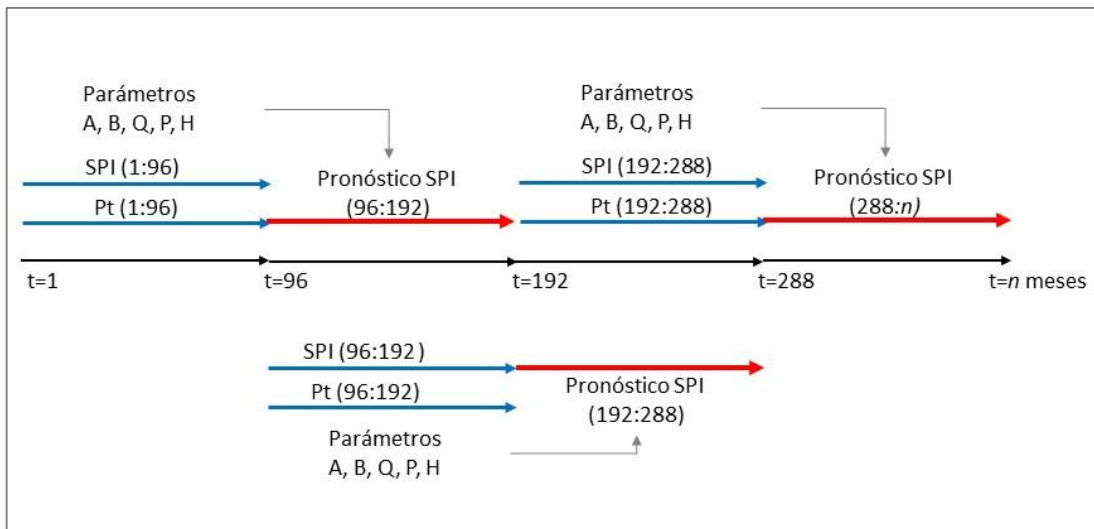


Figura. 43. Proceso de la estimación de parámetros del modelo por periodos del modelo ARX.

2.2. EnKF

En esta variante metodológica se utilizó el esquema propuesto para los modelos AR (2) y ARX con las cuatro variables exógenas, para determinados L pasos en el tiempo e incluyendo su periodo de reestimación de parámetros.

Esta técnica de asimilación de datos fue propuesta para sistemas dinámicos no lineales y como alternativa al filtro de Kalman Extendido (EKF) debido a su formulación conceptual simple y de fácil aplicación. A pesar de las consideraciones planteadas anteriormente y de la linealidad existente dada en el modelo ARX, se implementó en Matlab® el algoritmo del EnKF con un modelo AR (2) y otro ARX, al igual que el DKF para evaluar sus resultados y compararlos por los generados por el DKF.

2.2.1. EnKF – AR (2)

El algoritmo del EnKF se implementó con base en la metodología propuesta por Gillijns *et al.* (2006) y que se describió en el apartado de revisión. Para su realización fue necesario generar un número aleatorio de miembros o posibles trayectorias de los estados pronosticados, donde la media del conjunto generado se considera como la estimación del estado y el error del modelo se aproxima por la varianza del conjunto generado. De esta manera, se realizaron pronósticos con un total de 100 miembros, como conjunto

suficientemente grande para generar una media que se aproxime a los valores reales.

Para este enfoque se obtuvieron los parámetros A, Q, P y H con base en las series del índice SPI o SPEI y el orden del modelo autorregresivo $n_a = 2$, el procedimiento se realizó también para L pasos en el tiempo (hasta 4 meses de adelanto), y definiendo un periodo de reestimación de datos de 96 meses.

2.2.2. EnKF – ARX

Al igual que con el modelo AR (2), se implementó una variante de la rutina de programación para el EnKF para el modelo ARX, de tal modo que pudieran ser estimados los parámetros A, B, Q, P y H, y consideradas las series de datos de las variables exógenas.

Se realizó el pronóstico de los índices SPI y SPEI para hasta 4 meses de adelanto, y el periodo de reestimación que mejores datos arrojó fue de 96 meses, al igual que en los demás enfoques.

2.3. Presentación de resultados

Para la presentación de resultados se calcularon las principales estadísticas según Gupta *et al.* (2009) para cada una de las cuatro metodologías desarrolladas. Los resultados del pronóstico de los índices de sequía se presentaron con base en los estadísticos MSE (Mean Square Error, Media del Error Cuadrático), RMSE (Root Mean Square Error, Raíz de la Media del Error Cuadrático), y la eficiencia de Nash-Sutcliffe (E). Estos criterios son los más utilizados para la calibración y evaluación de modelos en cuencas hidrológicas con los datos observados.

A partir de los errores de predicción obtenidos en cada intervalo de tiempo para cada uno de los enfoques implementados, se calculó un intervalo de predicción al 95 % de probabilidad para las series pronosticadas de los índices, como lo indica Chatfield (2004) con el propósito de conocer el rango de probabilidad de que los valores reales oscilen dentro del mismo.

Para comparar los supuestos de la teoría general del filtro de Kalman, se realizaron ajustes a funciones de distribución de probabilidad para los errores provenientes de la diferencia entre los datos observados y pronosticados para las series evaluadas empleando las cuatro metodologías.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Pronóstico de sequías en la cuenca del río Fuerte

El pronóstico de los índices de sequía SPI y SPEI en 14 estaciones meteorológicas distribuidas en toda el área de la cuenca se realizó probando varios enfoques del filtro de Kalman. Las series de datos empleados fueron obtenidos de las bases de datos del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), las cuales comprendieron desde enero de 1961 hasta diciembre de 2011.

Se realizaron los pronósticos a diferentes niveles, de tal manera que se evaluaron dos variantes del filtro de Kalman (Discreto y Ensemble) con dos modelos autorregresivos (AR (2) y ARX, este último evaluando cuatro variables hidrometeorológicas como variables exógenas para el pronóstico de los índices SPI y SPEI bajo cuatro escalas temporales (3, 6 12 y 24 meses) (Figura 44).

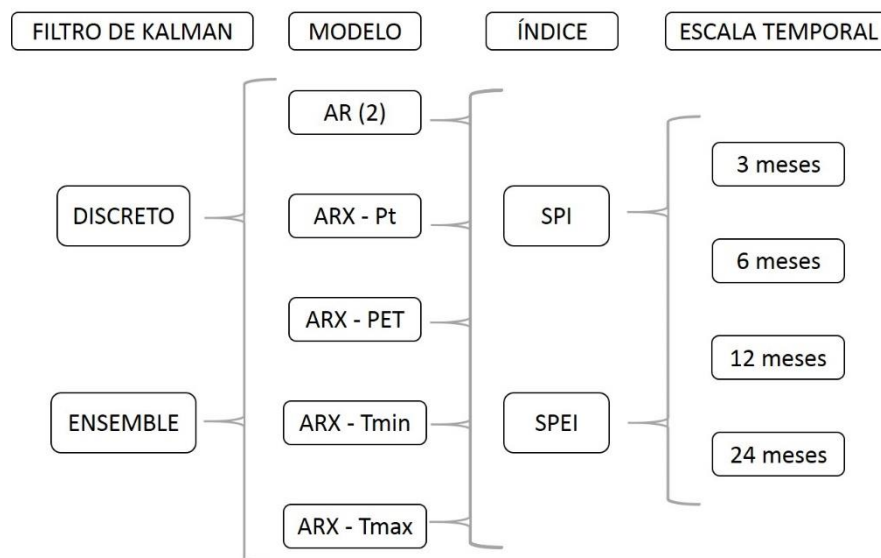


Figura. 44. Variantes evaluadas en el pronóstico de los índices de sequía.

En su proceso el filtro de Kalman genera dos tipos de resultados: los estados pronosticados y los actualizados, los resultados mostrados comprenderán sólo la parte de pronóstico ya que en base a ellos se evaluará el desempeño de los modelos para predecir los estados futuros de los índices de sequía.

Así mismo, los resultados serán evaluados en términos del Error Cuadrático Medio (MSE), el índice de Eficiencia de Nash-Sutcliffe (E) y el coeficiente de correlación (R), por ser los parámetros más empleados en la evaluación de modelos hidrológicos y meteorológicos en cuencas hidrográficas.

Para mostrar los resultados obtenidos se seleccionaron seis estaciones meteorológicas distribuidas por toda la cuenca (Cuadro 11), con el propósito de reducir la cantidad de información y simplificar los cuadros de resultados, mostrando resultados representativos de la parte alta, media y baja de la cuenca, ubicadas a diferentes altitudes y con diferentes rangos de temperaturas.

Cuadro 11. Estaciones seleccionadas para la presentación de resultados.

Clave	Estación	Altitud (msnm)	Precipitación (mm)	T. Mínima (°C)	T. Máxima (°C)
8038	Creel, Chih	2,348.0	648.7	1.7	20.2
8161	Batopilas, Chih	678.0	603.4	16.7	31.3
8267	El Vergel, Chih	2,740.0	629.7	0.6	17.6
25009	Bocatoma, Sin	31.0	456.6	17.0	33.0
25025	P. Miguel Hidalgo	144	619.8	16.6	33.8
26053	Minas Nuevas, Son	480.0	672.4	15.0	31.2
	Promedio	1,588.5	690.7	10.9	28.0

3.2. DKF

Los resultados del filtro de Kalman Discreto para el pronóstico del SPI y del SPEI se muestran en los Cuadros 12 y 13. Para el enfoque bajo un modelo ARX se evaluó la precipitación (Pt), la evapotranspiración potencial (PET), la temperatura mínima (Tmin) y máxima (Tmax), en este pronóstico se consideraron dos meses del índice y un mes para las variables exógenas, un valor de alpha de 0.0001 y la matriz de covarianza inicial $P_0=1000 \cdot I$, la reestimación de los parámetros del modelo se realizó cada 96 meses, periodo que generó mejores resultados.

Se evaluaron los resultados del pronóstico del SPI y SPEI de 3, 6, 12 y 24 meses con los modelos de predicción (DKF-AR2 y DKF-ARX) en base a los estadísticos MSE, E y R. En los cuadros 12 y 13 se observa que las escalas de 3 y 6 meses presentan valores de MSE más altos, entre 0.2 y 0.5, por tanto la Raíz de la Media del Cuadrado del Error (RMSE) presenta un mínimo de 0.46, lo que indica que la diferencia promedio entre el valor observado y el pronosticado es muy grande, y dado que las categorías del índice varían cada 0.5 el pronóstico no será confiable. En cambio el MSE de las escalas 12 y 24, varía de 0.16 a 0.03, y en términos de RMSE el error máximo en la predicción es de 0.32, por lo que el pronóstico será más acertado. E y R presentan valores más bajos para las escalas de 3 y 6 meses, indicando que el modelo no es buen predictor para esas escalas, por el contrario para 12 y 24 meses, ambos mayores a 0.8, son satisfactorios.

Cuadro 12. Resumen estadístico del pronóstico del SPI a cuatro escalas temporales con el DKF - AR2 y DKF - ARX.

Filtro de Kalman Discreto					SPI								
Estación	Modelo	Escala temporal											
		3			6			12			24		
		MSE	E	R	MSE	E	R	MSE	E	R	MSE	E	R
8038 Creel, Chih.	AR (2)	0.48	0.49	0.70	0.22	0.78	0.88	0.10	0.89	0.94	0.05	0.95	0.98
	ARX-Pt	0.46	0.51	0.72	0.22	0.78	0.88	0.10	0.89	0.94	0.05	0.95	0.98
	ARX-PET	0.49	0.48	0.69	0.22	0.78	0.88	0.10	0.89	0.94	0.05	0.95	0.98
	ARX-Tmin	0.49	0.49	0.70	0.22	0.77	0.88	0.10	0.89	0.94	0.05	0.95	0.98
	ARX-Tmax	0.50	0.48	0.69	0.22	0.77	0.88	0.10	0.89	0.94	0.05	0.95	0.98
8161 Batopilas, Chih	AR (2)	0.49	0.49	0.70	0.26	0.74	0.86	0.13	0.88	0.94	0.05	0.96	0.98
	ARX-Pt	0.48	0.49	0.70	0.26	0.74	0.86	0.12	0.88	0.94	0.05	0.96	0.98
	ARX-PET	0.51	0.47	0.68	0.27	0.73	0.85	0.12	0.88	0.94	0.05	0.95	0.98
	ARX-Tmin	0.50	0.48	0.69	0.27	0.73	0.85	0.12	0.88	0.94	0.05	0.95	0.98
	ARX-Tmax	0.50	0.47	0.69	0.27	0.73	0.85	0.12	0.88	0.94	0.05	0.95	00.98
8267 El Vergel, Chih	AR (2)	0.42	0.50	0.71	0.24	0.69	0.83	0.10	0.91	0.95	0.04	0.96	0.98
	ARX-Pt	0.42	0.50	0.70	0.24	0.69	0.83	0.10	0.91	0.95	0.04	0.96	0.98
	ARX-PET	0.42	0.50	0.71	0.24	0.69	0.83	0.10	0.91	0.95	0.04	0.96	0.98
	ARX-Tmin	0.43	0.49	0.70	0.24	0.69	0.83	0.10	0.91	0.95	0.04	0.96	0.98
	ARX-Tmax	0.42	0.49	0.70	0.25	0.69	0.83	0.10	0.91	0.95	0.04	0.96	0.98
25009 Bocatoma, Sin	AR (2)	0.48	0.47	0.68	0.35	0.65	0.81	0.13	0.87	0.93	0.06	0.93	0.97
	ARX-Pt	0.48	0.46	0.68	0.36	0.64	0.80	0.13	0.87	0.93	0.07	0.93	0.97
	ARX-PET	0.49	0.45	0.67	0.36	0.64	0.80	0.13	0.87	0.93	0.07	0.93	0.97
	ARX-Tmin	0.49	0.46	0.68	0.36	0.64	0.80	0.13	0.87	0.93	0.07	0.93	0.97
	ARX-Tmax	0.49	0.45	0.67	0.36	0.65	0.80	0.13	0.87	0.93	0.07	0.93	0.97
25025 P. Miguel H., Sin	AR (2)	0.56	0.41	0.64	0.39	0.64	0.80	0.16	0.85	0.92	0.09	0.90	0.95
	ARX-Pt	0.56	0.43	0.65	0.39	0.62	0.79	0.16	0.85	0.92	0.09	0.91	0.95
	ARX-PET	0.56	0.39	0.62	0.39	0.63	0.79	0.16	0.85	0.92	0.09	0.89	0.94
	ARX-Tmin	0.57	0.41	0.64	0.39	0.63	0.79	0.16	0.85	0.92	0.09	0.89	0.95
	ARX-Tmax	0.57	0.40	0.63	0.39	0.63	0.79	0.16	0.85	0.92	0.09	0.89	0.94
26053 Minas Nuevas, Son	AR (2)	0.48	0.49	0.70	0.37	0.63	0.79	0.15	0.85	0.92	0.07	0.92	0.96
	ARX-Pt	0.48	0.50	0.71	0.38	0.62	0.79	0.15	0.85	0.92	0.07	0.92	0.96
	ARX-PET	0.48	0.49	0.70	0.38	0.62	0.79	0.15	0.84	0.92	0.07	0.92	0.96
	ARX-Tmin	0.50	0.49	0.70	0.39	0.62	0.78	0.15	0.84	0.92	0.07	0.92	0.96
	ARX-Tmax	0.49	0.49	0.70	0.38	0.62	0.79	0.15	0.84	0.92	0.07	0.92	0.96
Promedio		0.49	0.47	0.69	0.31	0.68	0.82	0.13	0.87	0.93	0.06	0.94	0.97

MSE, Media del Cuadrado del Error; E, Eficiencia de Nash – Sutcliffe; R, coeficiente de correlación de los datos. Estadísticas con respecto al SPI observado.

Cuadro 13. Resumen estadístico del pronóstico del SPEI a cuatro escalas temporales con el DKF - AR2 y DKF - ARX.

Filtro de Kalman Discreto		SPEI											
Estación	Modelo	Escala temporal											
		3			6			12			24		
		MSE	E	R	MSE	E	R	MSE	E	R	MSE	E	R
8038 Creel, Chih.	AR (2)	0.40	0.60	0.78	0.19	0.81	0.90	0.07	0.92	0.96	0.04	0.97	0.98
	ARX-Pt	0.40	0.60	0.79	0.19	0.81	0.90	0.07	0.92	0.96	0.04	0.96	0.98
	ARX-PET	0.41	0.59	0.77	0.19	0.81	0.90	0.08	0.92	0.96	0.04	0.96	0.98
	ARX-Tmin	0.41	0.60	0.77	0.19	0.81	0.90	0.07	0.92	0.96	0.04	0.96	0.98
	ARX-Tmax	0.42	0.58	0.77	0.19	0.81	0.90	0.08	0.92	0.96	0.04	0.96	0.98
8161 Batopilas, Chih	AR (2)	0.39	0.59	0.77	0.17	0.81	0.90	0.08	0.92	0.96	0.03	0.97	0.99
	ARX-Pt	0.40	0.58	0.76	0.18	0.81	0.90	0.08	0.92	0.96	0.03	0.97	0.99
	ARX-PET	0.41	0.57	0.76	0.18	0.81	0.90	0.08	0.91	0.96	0.03	0.97	0.99
	ARX-Tmin	0.40	0.58	0.76	0.18	0.81	0.90	0.08	0.91	0.96	0.03	0.97	0.99
	ARX-Tmax	0.41	0.57	0.76	0.18	0.81	0.90	0.08	0.91	0.96	0.03	0.97	0.99
8267 El Vergel, Chih	AR (2)	0.34	0.60	0.78	0.19	0.78	0.89	0.07	0.91	0.96	0.03	0.96	0.98
	ARX-Pt	0.34	0.60	0.78	0.19	0.78	0.88	0.07	0.91	0.95	0.03	0.96	0.98
	ARX-PET	0.35	0.60	0.77	0.19	0.78	0.88	0.07	0.91	0.96	0.03	0.96	0.98
	ARX-Tmin	0.36	0.59	0.77	0.19	0.78	0.88	0.07	0.91	0.96	0.03	0.96	0.98
	ARX-Tmax	0.35	0.59	0.77	0.19	0.78	0.88	0.07	0.91	0.96	0.03	0.96	0.98
25009 Bocatoma, Sin	AR (2)	0.45	0.57	0.76	0.29	0.72	0.85	0.11	0.89	0.95	0.05	0.95	0.98
	ARX-Pt	0.45	0.57	0.76	0.30	0.71	0.84	0.11	0.89	0.95	0.05	0.95	0.98
	ARX-PET	0.45	0.57	0.76	0.30	0.71	0.85	0.11	0.89	0.95	0.05	0.95	0.98
	ARX-Tmin	0.45	0.57	0.75	0.30	0.71	0.84	0.11	0.89	0.95	0.05	0.95	0.98
	ARX-Tmax	0.45	0.57	0.76	0.30	0.72	0.85	0.11	0.89	0.95	0.05	0.95	0.9
25025 P. Miguel H., Sin	AR (2)	0.50	0.50	0.71	0.31	0.70	0.83	0.13	0.87	0.93	0.07	0.92	0.96
	ARX-Pt	0.51	0.49	0.70	0.31	0.69	0.83	0.13	0.87	0.93	0.07	0.92	0.96
	ARX-PET	0.51	0.49	0.70	0.31	0.69	0.83	0.13	0.87	0.93	0.07	0.92	0.96
	ARX-Tmin	0.51	0.49	0.70	0.31	0.69	0.83	0.13	0.87	0.93	0.07	0.92	0.96
	ARX-Tmax	0.51	0.49	0.70	0.32	0.69	0.83	0.13	0.87	0.93	0.07	0.92	0.96
26053 Minas Nuevas, Son	AR (2)	0.43	0.53	0.73	0.27	0.70	0.84	0.11	0.88	0.94	0.05	0.94	0.97
	ARX-Pt	0.44	0.52	0.72	0.29	0.68	0.83	0.11	0.87	0.94	0.05	0.94	0.97
	ARX-PET	0.45	0.51	0.72	0.29	0.68	0.83	0.11	0.87	0.93	0.05	0.94	0.97
	ARX-Tmin	0.45	0.51	0.72	0.29	0.67	0.82	0.11	0.87	0.93	0.05	0.94	0.97
	ARX-Tmax	0.45	0.51	0.72	0.29	0.68	0.83	0.11	0.87	0.93	0.05	0.94	0.97
Promedio		0.43	0.56	0.75	0.24	0.75	0.86	0.10	0.90	0.95	0.05	0.95	0.97

MSE, Media del Cuadrado del Error; E, Eficiencia de Nash – Sutcliffe; R, coeficiente de correlación de los datos. Estadísticas con respecto al SPEI observado.

En las figura 45 a la 52 se muestra el pronóstico (asterisco rojo) del SPI y el SPEI en las escalas de 3, 6, 12 y 24 meses, respectivamente, en comparación a los valores observados (línea azul) en la estación 8038 Creel, Chih. La diferencia entre ambos valores se va reduciendo conforme aumenta la escala temporal de los índices, se puede observar en las figuras 45 y 46 que el pronóstico no alcanza los extremos húmedos y secos de la serie, pero conforme se avanza en la escala temporal el pronóstico se va ajustando más al observado, y en las figuras 51 y 52 el comportamiento del pronóstico es casi idéntico al observado.

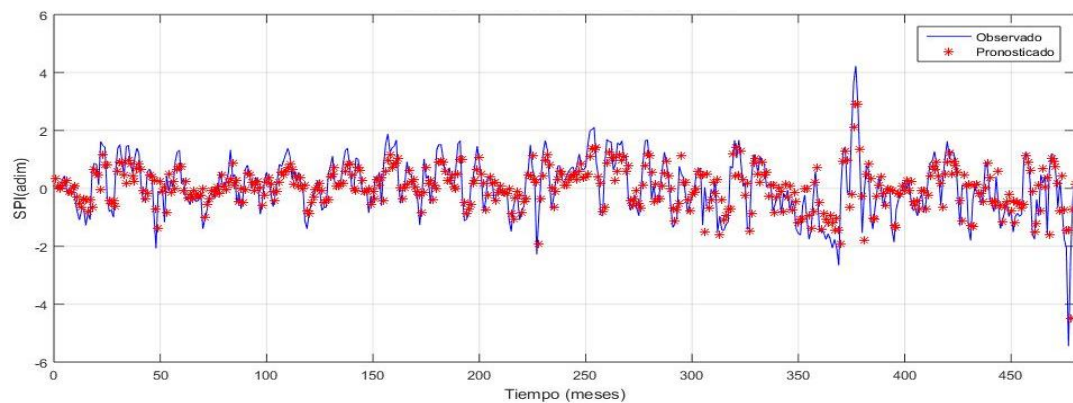


Figura. 45. SPI de 3 meses observado y el pronosticado por el DKF - AR (2).

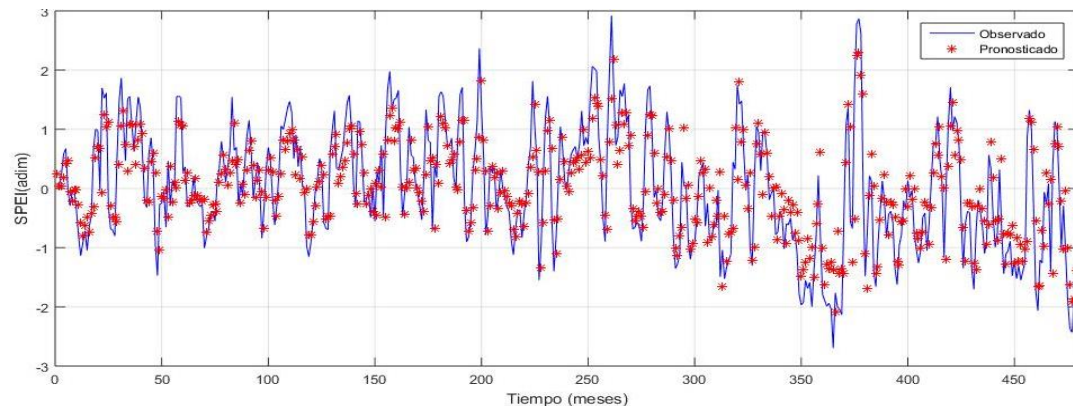


Figura. 46. SPEI de 3 meses observado y pronosticado por el DKF - AR (2).

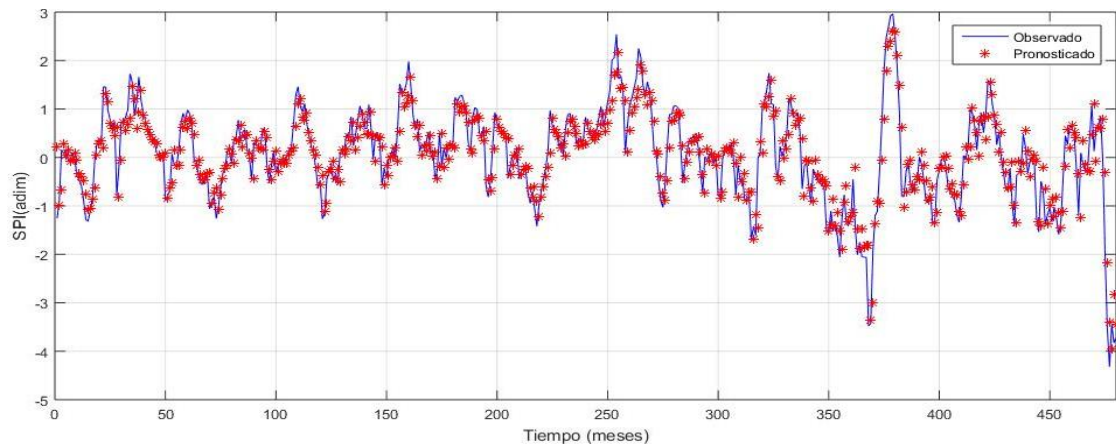


Figura. 47. SPI de 6 meses observado y el pronosticado por el DKF - AR (2).

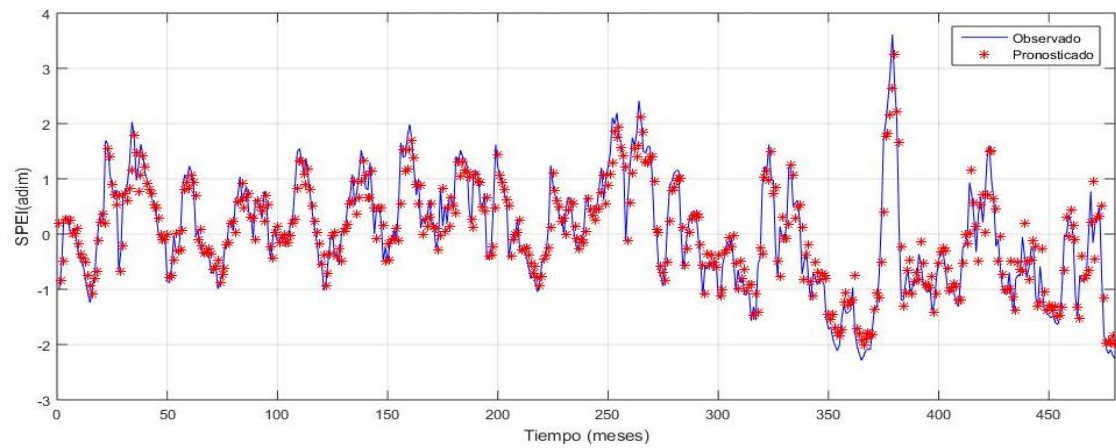


Figura. 48. SPEI de 6 meses observado y pronosticado por el DKF - AR (2).

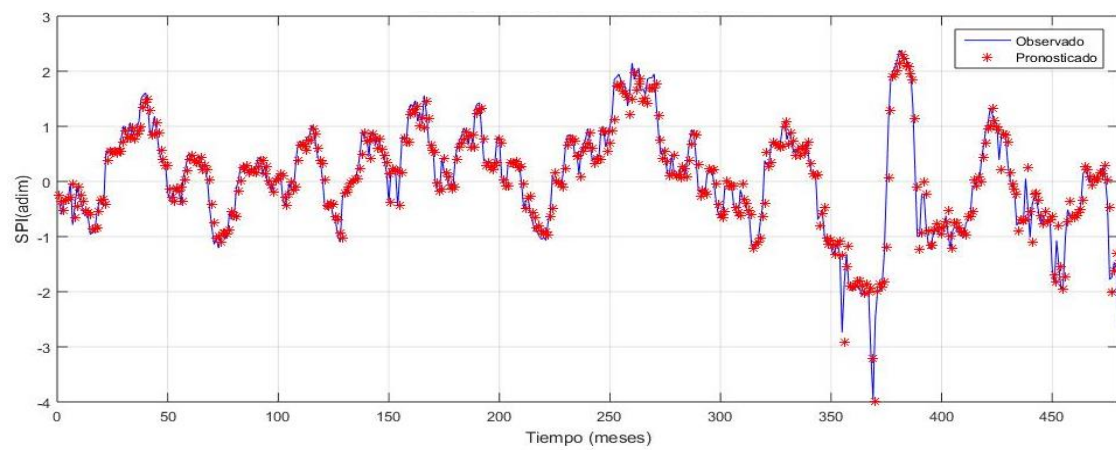


Figura. 49. SPI de 12 meses observado y pronosticado por el DKF - AR (2).

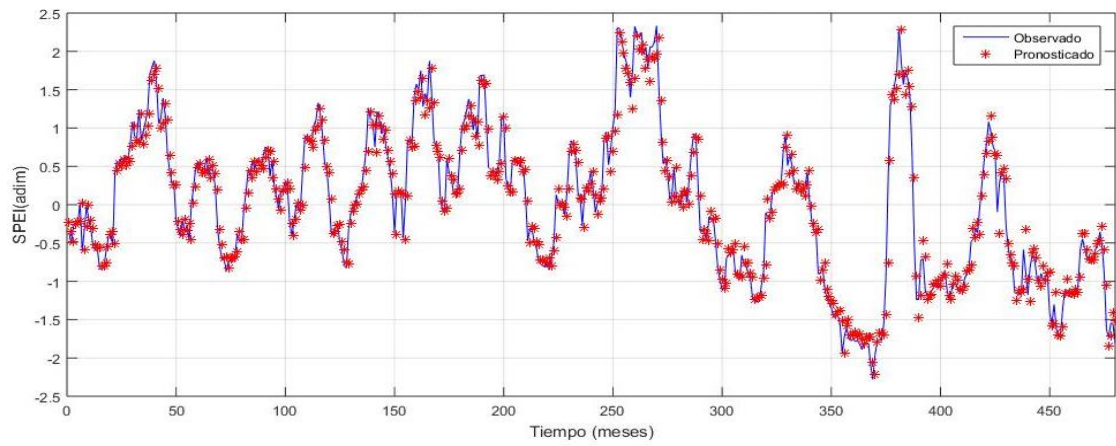


Figura. 50. SPEI de 12 meses observado y pronosticado por el DKF - AR (2).

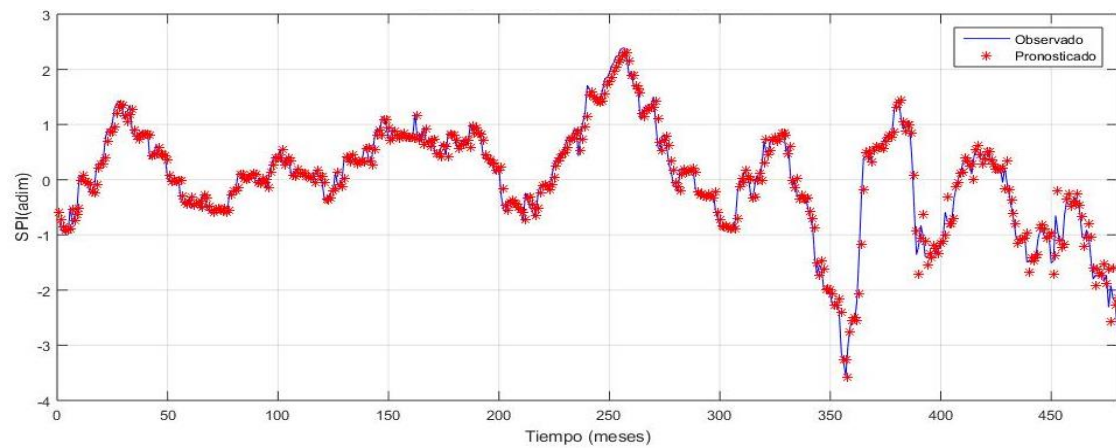


Figura. 51. SPI de 24 meses observado y pronosticado por el DKF - AR (2).

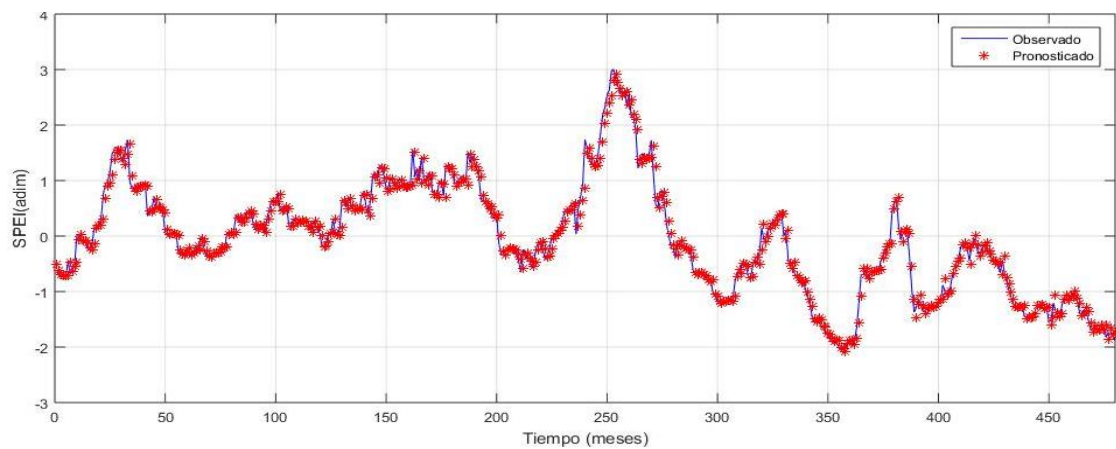


Figura. 52. SPEI de 24 meses observado y pronosticado por el DKF - AR (2).

Este comportamiento se manifiesta en todas las estaciones, para las escalas menores (3 y 6) es más variable y errático, por lo que se hace más difícil su pronóstico al depender este de sus valores anteriores. En cambio las escalas de 12 y 24 meses son más estables, su serie es representada por una línea más suavizada sin picos o caídas abruptas, por ello generan mejores resultados.

Observando los estadísticos para el pronóstico del SPI y del SPEI, no son aceptables valores de RMSE cercanos o mayores a 0.5 como sucede en las escalas de 3 y 6 meses, puesto que las categorías del índice cambian cada 0.5 y se puede cometer el error de subestimar el estado futuro de la sequía. En cambio, se observa que los estadísticos de las escalas 12 y 24 indican un MRSE de máximo 0.32, un valor que nos genera mayor certidumbre en la predicción del estado futuro del grado de humedad o sequedad.

En cuanto a los resultados por modelo AR (2) o ARX, las diferencias en la aplicación de cada uno de ellos son mínimas, el valor de los estadísticos varía por centésimas, pero presentando mejores resultados para el modelo AR (2), esto significa que el modelo ARX con variables exógenas como la precipitación (Pt), la evapotranspiración potencial (PET), la temperatura mínima (Tmin) y máxima (Tmax), no mejora significativamente la predicción de los índices, por el contrario, generalmente con la PET, Tmin y Tmax el MSE se incrementa ligeramente en las escalas de 3 y 6 meses, para las escalas de 12 y 24 meses los resultados de la aplicación de estos los modelos son prácticamente iguales en cuanto a los estadísticos MSE, E y R.

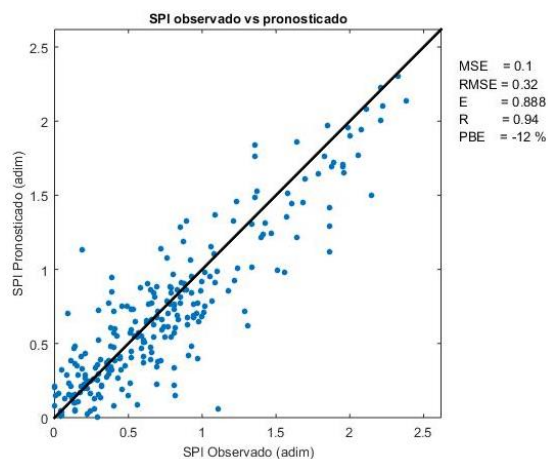


Figura. 53. SPI observado vs pronosticado de 12 meses para la estación 8038 Creel, Chih. Enfoque DKF - AR (2).

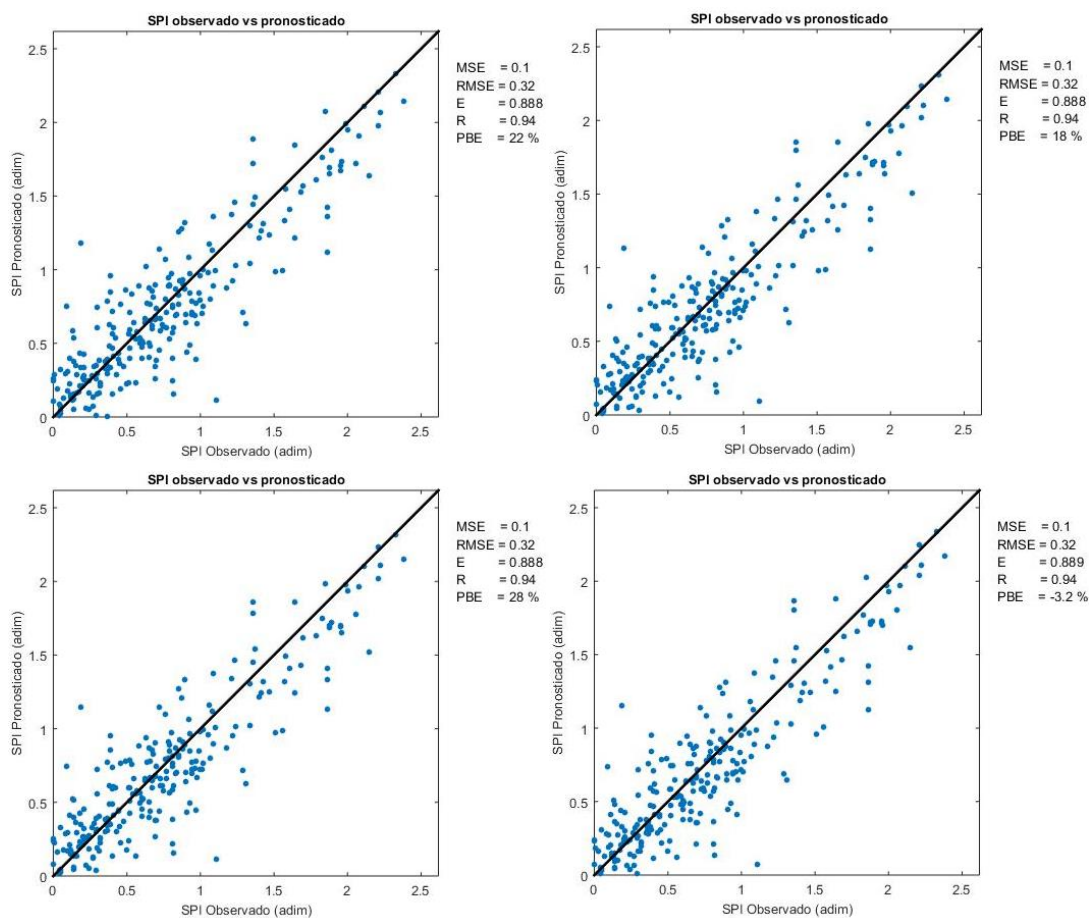


Figura. 54. SPI observado vs pronosticado de 12 meses para la estación Creel, Chih. DKF - ARX (Pt, PET, Tmin y Tmax). De izquierda a derecha y de arriba hacia abajo.

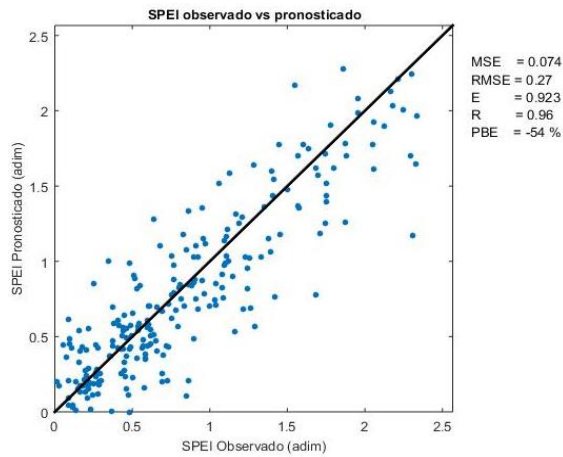


Figura. 55. SPEI observado vs pronosticado de 12 meses para la estación 8038 Creel, Chih. Enfoque DKF - AR (2).

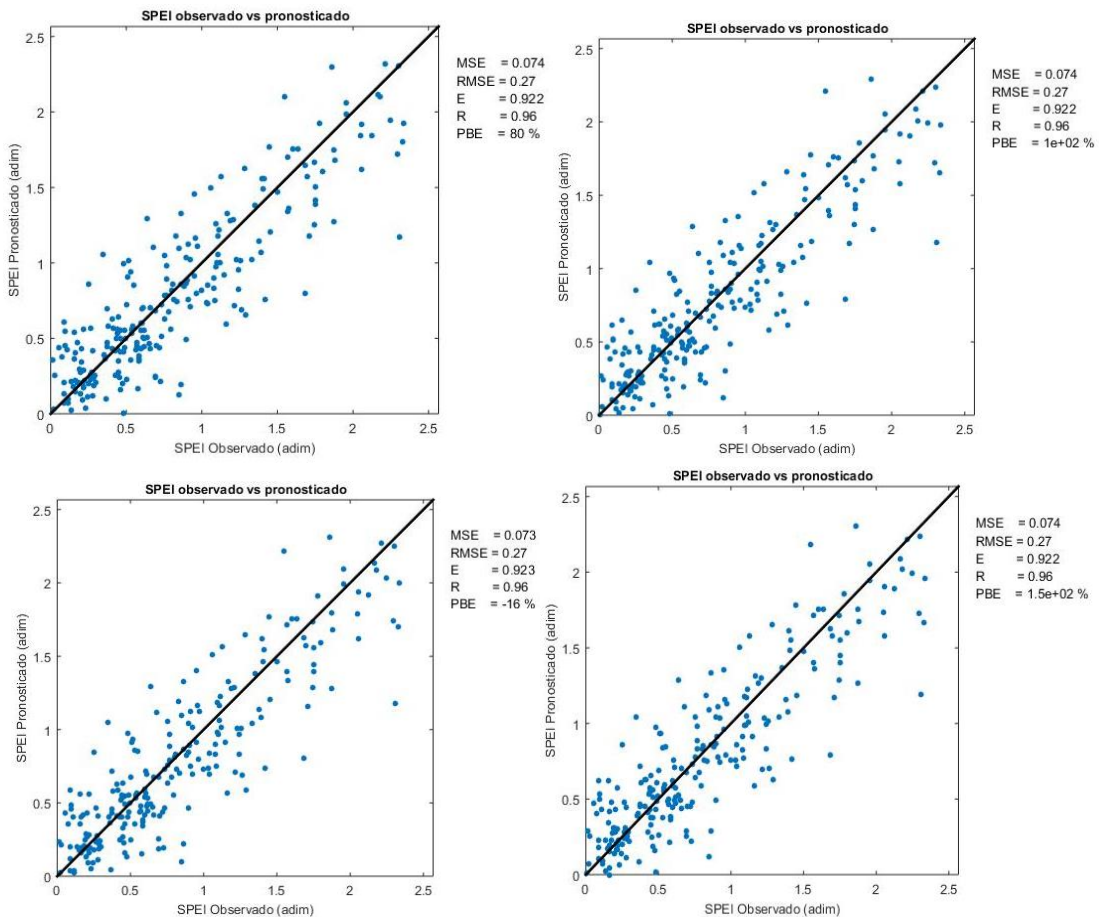


Figura. 56. SPI observado vs pronosticado de 12 meses para la estación Creel, Chih. DKF - ARX (Pt, PET, Tmin y Tmax). De izquierda a derecha y arriba hacia abajo.

Atendiendo el principio de simplicidad podemos decir que el mejor modelo a utilizar bajo el Filtro de Kalman Discreto es el modelo AR (2) ya que genera mejores o iguales resultados que los generados por el ARX y su implementación es más sencilla.

Moriasi *et al.* (2007) menciona que un valor de E por arriba de 0 indica que el modelo es un mejor predictor que a la media de los datos. El pronóstico con el DKF en términos de E tuvo mayores diferencias a nivel de escalas temporales que a nivel de modelo, presentando así valores promedio de 0.47 y 0.56 para el SPI y SPEI de 3 meses, respectivamente, y de 0.94 y 0.95 para el de 24 meses, mostrando que conforme aumenta la escala temporal se incrementa el valor de E y el modelo es mejor predictor que la media de los datos; en cambio los valores de E son muy similares para el modelo AR (2) y el ARX con todas sus variables exógenas.

En cuanto al coeficiente de correlación R, Moriasi *et al.* (2007) señala que un valor por arriba de 0.5 es considerado satisfactorio, en los resultados de ambos índices todas las variantes obtuvieron resultados por arriba de este valor, tanto por escala temporal como por modelo empleado. Para la escala de 3 meses se obtuvieron valores promedio de 0.69 y 0.75 para el SPI y SPEI, respectivamente, en cambio para la escala de 24 meses los valores promedio fueron de 0.97 para ambos índices. Estos resultados indican que conforme se incrementa la escala temporal de los índices el ajuste de los modelos a los datos observados es mejor.

3.3. EnKF

El pronóstico del SPI y SPEI con el filtro de Kalman Ensemble (EnKF) se probó de la misma manera que la variante discreta, usando dos modelos autorregresivos, AR (2) y ARX, este último empleando como variables exógenas la precipitación, la evapotranspiración potencial, la temperatura mínima y máxima. Se realizó el pronóstico de los índices de cuatro escalas temporales (3, 6, 12 y 24 meses). El procedimiento del EnKF se realizó con base en la metodología descrita por Gillijns *et al.* (2006), para ambos modelos autorregresivos se empleó un periodo de reestimación de datos de 96 meses para que fuera comparables los resultados con el DKF, para el ARX se utilizó la misma estructura operativa que en el enfoque DKF-ARX.

Los resultados se presentan para las 6 estaciones indicadas anteriormente, de tal manera que sean representativos de toda el área de la cuenca y comparables con los presentados por el DKF. Los cuadros 14 y 15 presentan las estadísticas del pronóstico del SPI y SPEI con respecto a su valor observado y el pronosticado con el EnKF.

Los resultados del SPI y SPEI presentan para las escalas de 3 y 6 meses valores de MSE de entre 0.17 y 0.55, y en términos de RMSE de 0.41 a 0.74. Un error mínimo de casi 0.5 nos indica que el pronóstico para estas escalas tiene poca confiabilidad, si las categorías de los índices varían cada 0.5 es muy probable subestimar o sobreestimar el grado de humedad o sequía en un sitio.

Cuadro 14. Resumen estadístico del pronóstico del SPI a cuatro escalas temporales con el EnKF - AR2 y EnKF - ARX.

Filtro de Kalman Ensemble		SPI											
Estación	Modelo	Escala temporal											
		3			6			12			24		
		MSE	E	R	MSE	E	R	MSE	E	R	MSE	E	R
8038 Creel, Chih.	AR (2)	0.50	0.47	0.69	0.22	0.77	0.88	0.11	0.88	0.94	0.05	0.95	0.98
	ARX-Pt	0.49	0.49	0.71	0.22	0.77	0.88	0.11	0.88	0.94	0.05	0.95	0.98
	ARX-PET	0.52	0.45	0.67	0.22	0.77	0.88	0.11	0.88	0.94	0.05	0.95	0.98
	ARX-Tmin	0.51	0.46	0.68	0.22	0.77	0.88	0.11	0.88	0.94	0.05	0.95	0.98
	ARX-Tmax	0.52	0.45	0.67	0.22	0.77	0.88	0.11	0.88	0.94	0.05	0.95	0.98
8161 Batopilas, Chih	AR (2)	0.50	0.47	0.69	0.26	0.74	0.86	0.12	0.88	0.94	0.05	0.95	0.98
	ARX-Pt	0.50	0.47	0.69	0.26	0.73	0.86	0.12	0.88	0.94	0.05	0.95	0.98
	ARX-PET	0.53	0.45	0.67	0.27	0.72	0.86	0.12	0.88	0.94	0.05	0.95	0.98
	ARX-Tmin	0.52	0.45	0.68	0.27	0.73	0.86	0.12	0.88	0.94	0.05	0.95	0.98
	ARX-Tmax	0.52	0.45	0.67	0.27	0.73	0.86	0.12	0.88	0.94	0.05	0.95	0.98
8267 El Vergel, Chih	AR (2)	0.43	0.49	0.70	0.25	0.68	0.83	0.10	0.90	0.95	0.04	0.95	0.98
	ARX-Pt	0.43	0.49	0.70	0.25	0.68	0.83	0.10	0.90	0.95	0.04	0.95	0.98
	ARX-PET	0.43	0.49	0.70	0.25	0.68	0.83	0.10	0.90	0.95	0.04	0.95	0.98
	ARX-Tmin	0.44	0.47	0.69	0.26	0.68	0.82	0.10	0.90	0.95	0.04	0.95	0.98
	ARX-Tmax	0.43	0.48	0.70	0.25	0.68	0.83	0.10	0.90	0.95	0.04	0.95	0.98
25009 Bocatoma, Sin	AR (2)	0.47	0.47	0.69	0.35	0.65	0.81	0.13	0.87	0.93	0.06	0.93	0.97
	ARX-Pt	0.47	0.48	0.69	0.36	0.64	0.80	0.13	0.87	0.93	0.07	0.93	0.97
	ARX-PET	0.48	0.46	0.68	0.36	0.64	0.80	0.13	0.87	0.93	0.07	0.93	0.97
	ARX-Tmin	0.48	0.47	0.68	0.36	0.64	0.80	0.13	0.87	0.93	0.07	0.93	0.97
	ARX-Tmax	0.48	0.46	0.68	0.36	0.64	0.80	0.13	0.87	0.93	0.07	0.93	0.97
25025 P. Miguel H., Sin	AR (2)	0.53	0.46	0.68	0.37	0.65	0.81	0.16	0.85	0.92	0.09	0.91	0.96
	ARX-Pt	0.53	0.46	0.68	0.38	0.65	0.81	0.16	0.85	0.92	0.09	0.91	0.96
	ARX-PET	0.54	0.45	0.67	0.38	0.65	0.80	0.16	0.85	0.92	0.09	0.91	0.95
	ARX-Tmin	0.55	0.44	0.67	0.38	0.65	0.81	0.16	0.85	0.92	0.09	0.91	0.96
	ARX-Tmax	0.54	0.45	0.67	0.38	0.65	0.80	0.16	0.85	0.92	0.09	0.91	0.95
26053 Minas Nuevas, Son	AR (2)	0.49	0.48	0.70	0.36	0.64	0.80	0.15	0.85	0.92	0.07	0.92	0.96
	ARX-Pt	0.50	0.48	0.69	0.37	0.63	0.80	0.15	0.85	0.92	0.07	0.92	0.96
	ARX-PET	0.50	0.48	0.69	0.37	0.63	0.79	0.15	0.85	0.92	0.08	0.92	0.96
	ARX-Tmin	0.50	0.47	0.69	0.37	0.63	0.79	0.15	0.85	0.92	0.07	0.92	0.96
	ARX-Tmax	0.50	0.48	0.69	0.37	0.63	0.79	0.15	0.85	0.92	0.08	0.92	0.96
Promedio		0.49	0.47	0.69	0.31	0.68	0.83	0.13	0.87	0.93	0.06	0.94	0.97

MSE, Media del Cuadrado del Error; E, Eficiencia de Nash – Sutcliffe; R, coeficiente

de correlación de los datos. Estadísticas con respecto al SPI observado.

Cuadro 15. Resumen estadístico del pronóstico del SPEI a cuatro escalas temporales con el EnKF - AR2 y EnKF - ARX.

Filtro de Kalman Ensemble		SPEI											
Estación	Modelo	Escala temporal											
		3			6			12			24		
		MSE	E	R	MSE	E	R	MSE	E	R	MSE	E	R
8038 Creel, Chih.	AR (2)	0.43	0.57	0.76	0.20	0.80	0.90	0.08	0.92	0.96	0.03	0.97	0.98
	ARX-Pt	0.43	0.58	0.79	0.20	0.80	0.90	0.08	0.92	0.96	0.03	0.97	0.98
	ARX-PET	0.45	0.55	0.75	0.20	0.80	0.90	0.08	0.91	0.96	0.04	0.96	0.98
	ARX-Tmin	0.44	0.56	0.75	0.20	0.80	0.89	0.08	0.92	0.96	0.04	0.97	0.98
	ARX-Tmax	0.46	0.55	0.75	0.20	0.80	0.90	0.08	0.91	0.96	0.04	0.96	0.98
8161 Batopilas, Chih	AR (2)	0.41	0.57	0.76	0.17	0.81	0.90	0.08	0.92	0.96	0.03	0.97	0.99
	ARX-Pt	0.42	0.56	0.75	0.18	0.81	0.90	0.08	0.91	0.96	0.03	0.97	0.99
	ARX-PET	0.44	0.54	0.74	0.18	0.81	0.90	0.08	0.91	0.96	0.03	0.97	0.99
	ARX-Tmin	0.43	0.56	0.75	0.18	0.81	0.90	0.08	0.91	0.96	0.03	0.97	0.99
	ARX-Tmax	0.43	0.55	0.74	0.18	0.81	0.90	0.08	0.91	0.96	0.03	0.97	0.99
8267 El Vergel, Chih	AR (2)	0.36	0.57	0.77	0.19	0.77	0.88	0.07	0.91	0.96	0.03	0.96	0.98
	ARX-Pt	0.36	0.58	0.76	0.20	0.77	0.88	0.08	0.91	0.95	0.03	0.96	0.98
	ARX-PET	0.37	0.57	0.76	0.20	0.76	0.87	0.08	0.91	0.95	0.03	0.96	0.98
	ARX-Tmin	0.37	0.57	0.76	0.20	0.77	0.88	0.08	0.91	0.95	0.03	0.96	0.98
	ARX-Tmax	0.37	0.57	0.76	0.20	0.76	0.88	0.08	0.91	0.95	0.03	0.96	0.98
25009 Bocatoma, Sin	AR (2)	0.46	0.55	0.75	0.30	0.71	0.85	0.11	0.89	0.94	0.05	0.95	0.98
	ARX-Pt	0.47	0.55	0.75	0.31	0.71	0.84	0.11	0.89	0.94	0.05	0.95	0.97
	ARX-PET	0.46	0.56	0.75	0.30	0.71	0.84	0.11	0.89	0.94	0.05	0.95	0.97
	ARX-Tmin	0.47	0.55	0.75	0.31	0.71	0.85	0.11	0.89	0.94	0.05	0.95	0.97
	ARX-Tmax	0.46	0.56	0.75	0.30	0.71	0.84	0.11	0.89	0.94	0.05	0.95	0.97
25025 P. Miguel H., Sin	AR (2)	0.48	0.52	0.72	0.30	0.71	0.84	0.13	0.87	0.93	0.07	0.92	0.96
	ARX-Pt	0.49	0.51	0.72	0.31	0.70	0.84	0.13	0.87	0.93	0.07	0.92	0.96
	ARX-PET	0.50	0.50	0.71	0.31	0.70	0.84	0.13	0.87	0.93	0.08	0.92	0.96
	ARX-Tmin	0.49	0.51	0.71	0.31	0.70	0.84	0.13	0.87	0.93	0.07	0.92	0.96
	ARX-Tmax	0.49	0.50	0.71	0.31	0.70	0.83	0.13	0.87	0.93	0.07	0.92	0.96
26053 Minas Nuevas, Son	AR (2)	0.44	0.53	0.72	0.27	0.70	0.84	0.10	0.88	0.94	0.05	0.94	0.97
	ARX-Pt	0.46	0.50	0.71	0.28	0.69	0.83	0.11	0.88	0.94	0.05	0.94	0.97
	ARX-PET	0.47	0.49	0.70	0.28	0.69	0.83	0.11	0.87	0.93	0.05	0.94	0.97
	ARX-Tmin	0.46	0.50	0.71	0.29	0.68	0.82	0.11	0.87	0.93	0.05	0.94	0.97
	ARX-Tmax	0.46	0.50	0.71	0.28	0.69	0.83	0.11	0.87	0.93	0.05	0.94	0.97
Promedio		0.44	0.54	0.74	0.24	0.75	0.86	0.10	0.90	0.95	0.04	0.95	0.98

MSE, Media del Cuadrado del Error; E, Eficiencia de Nash – Sutcliffe; R, coeficiente

de correlación de los datos. Estadísticas con respecto al SPEI observado.

Para las escalas de 12 y 24 meses de ambos índices el valor del MSE oscila entre 0.03 y 0.16, lo que nos indica que se generan errores promedio de máximo 0.4 al predecir los estados del índice, generando más confiabilidad en el pronóstico aunque para algunas estaciones se tiene el riesgo de subestimar o sobreestimar la humedad o sequedad futura de un sitio esto es en menor medida que con las escalas temporales más cortas.

Las figuras 57 a 64 muestran las series de datos observados del SPI y SPEI (línea azul) de la estación 25025 Presa Miguel Hidalgo, Sin., así como sus series pronosticadas con el enfoque AR (2) – EnKF (asterisco rojo). Se observa un comportamiento similar al presentado en el DKF que es respaldado por las estadísticas, los valores pronosticados para 3 y 6 meses no alcanzan los extremos presentados en la serie, si no que se mantienen entre 2 y -2, subestimando la intensidad de los periodos húmedos y secos. Por el contrario, el pronóstico de los índices para las escalas de 12 y 24 meses presenta muy buen ajuste con respecto al valor observado, la diferencia entre los valores observados y pronosticados se va reduciendo conforme aumenta la escala temporal, y para la escala de 24 meses el pronóstico alcanza todos los valores extremos.

El pronóstico de los índices de sequía SPI y SPEI a escalas temporales de 12 y 24 meses nos genera mayor certidumbre en los resultados, por lo que resulta mejor pronosticar el estado futuro de los índices a esas escalas, ya que el pronóstico es muy sensible a errores porque sus categorías varían en un rango muy corto y se requiere tener la mayor certidumbre posible.

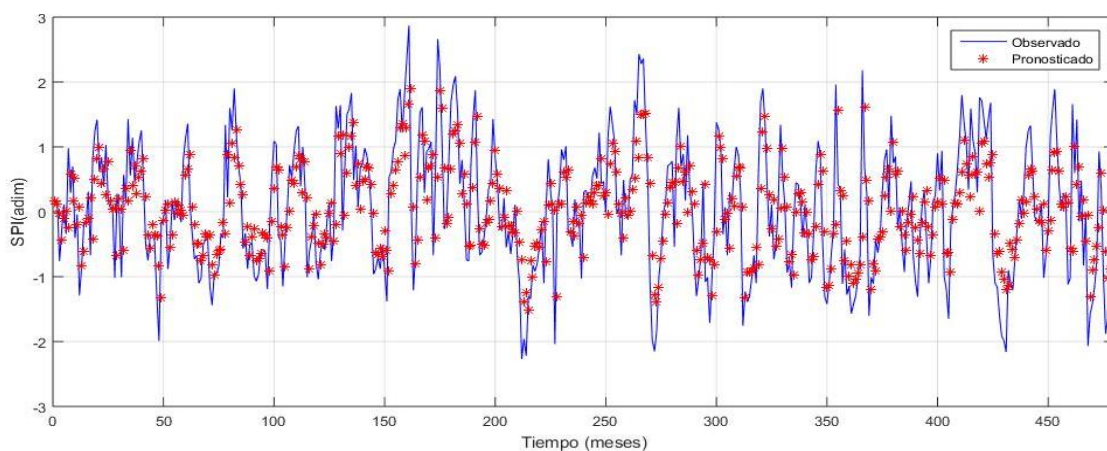


Figura. 57. SPI de 3 meses observado y pronosticado por el EnKF - AR (2).

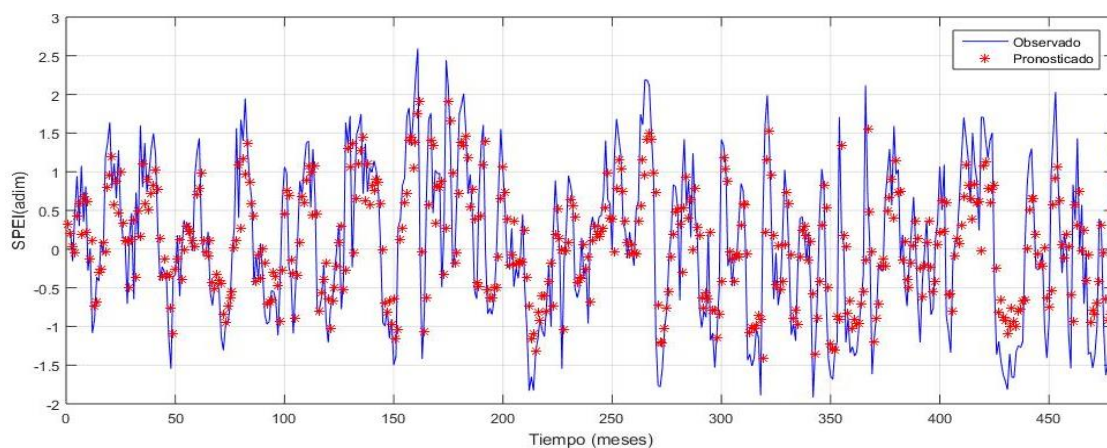


Figura. 58. SPEI de 3 meses observado y pronosticado por el EnKF - AR (2).

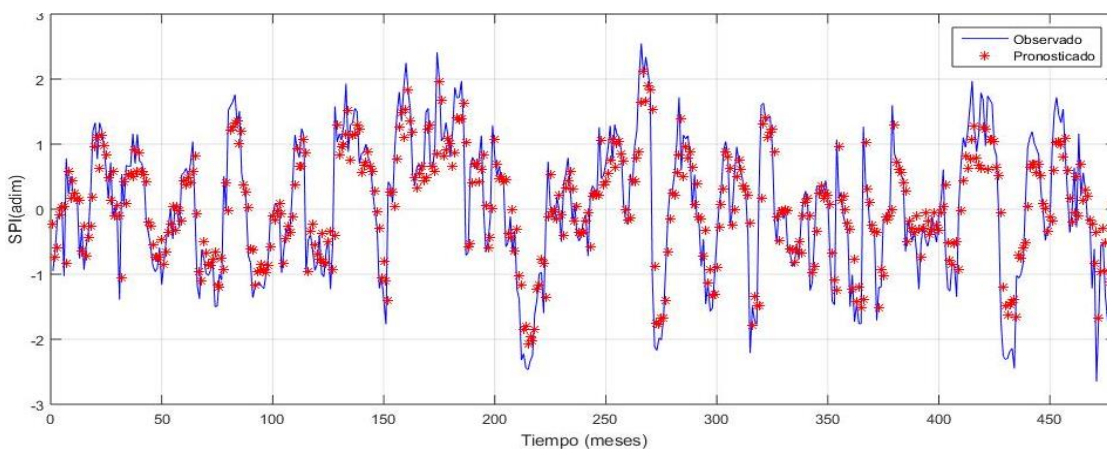


Figura. 59. SPI de 6 meses observado y pronosticado por el EnKF - AR (2).

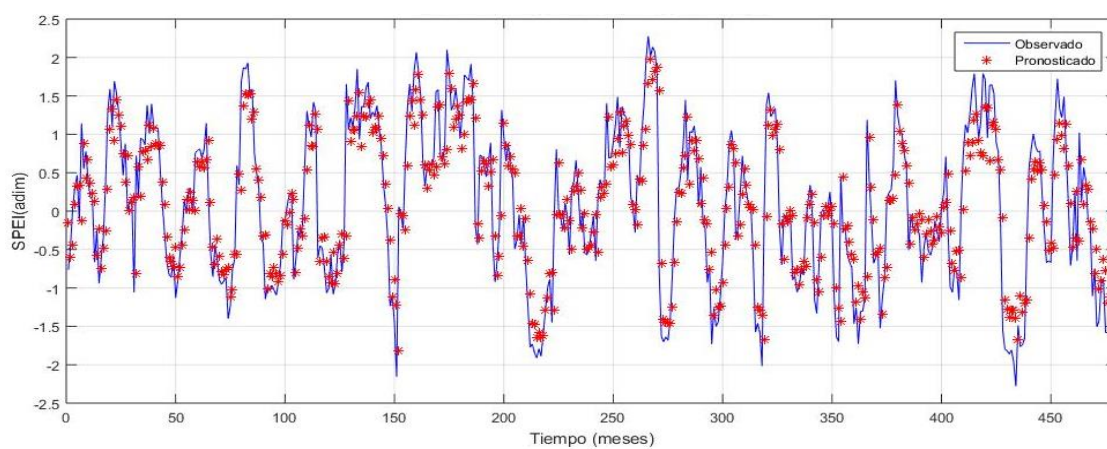


Figura. 60. SPEI de 6 meses observado y pronosticado por el EnKF - AR (2).

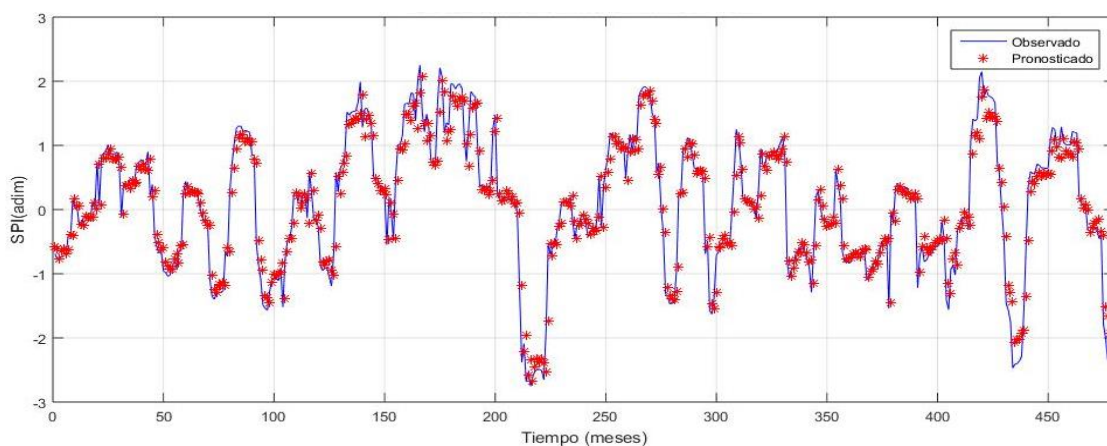


Figura. 61. SPI de 12 meses observado y pronosticado por el EnKF-AR (2).

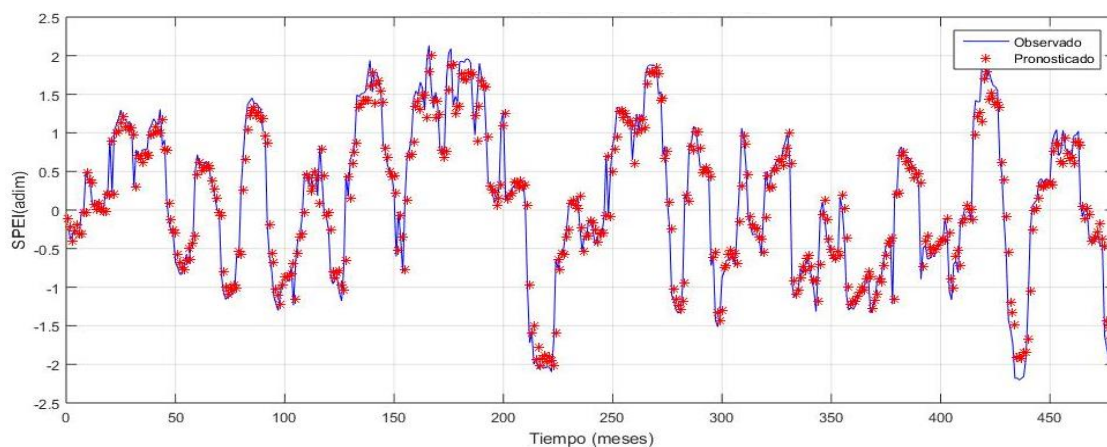


Figura. 62. SPEI de 12 meses observado y pronosticado por el EnKF-AR (2).

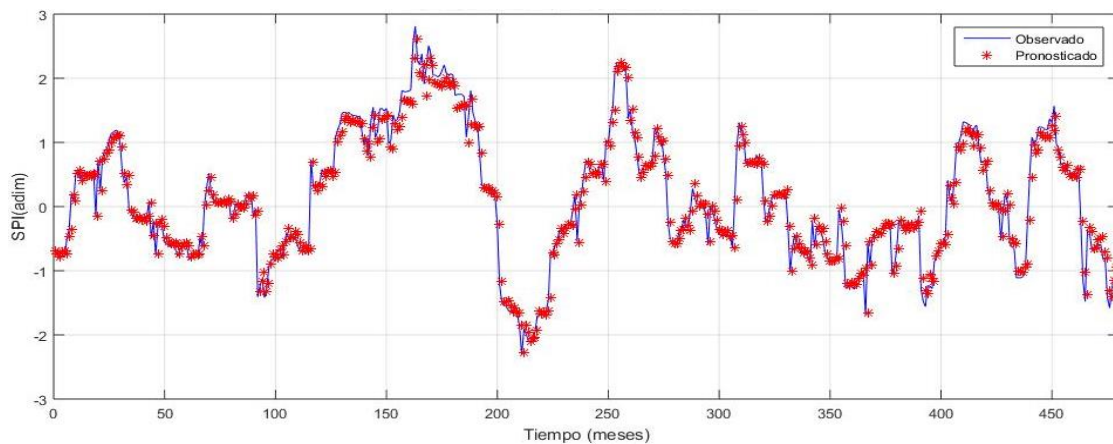


Figura. 63. SPI de 24 meses observado y pronosticado por el EnKF-AR (2).

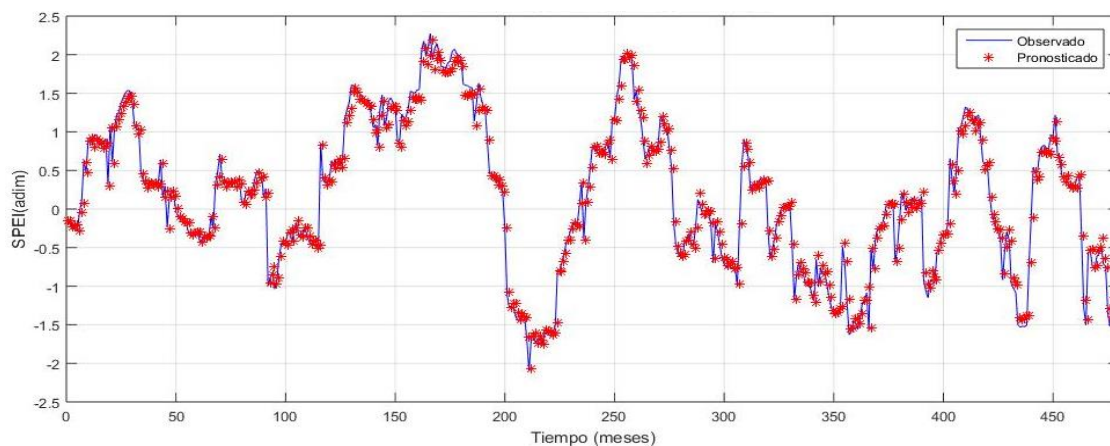


Figura. 64. SPEI de 24 meses observado y pronosticado por el EnKF-AR (2).

El comportamiento de las escalas temporales se presentó en todos los modelos, AR (2) y ARX con sus variantes, y para todas las estaciones.

De igual manera se compararon los resultados por modelo, los estadísticos MSE, E y R para las escalas de 3 y 6 meses presentaron resultados muy similares con diferencia de centésimas de un modelo a otro. En cambio para las escalas de 12 y 24 meses los resultados por modelo empleado son prácticamente iguales en la mayoría de los casos (figuras 65 y 68).

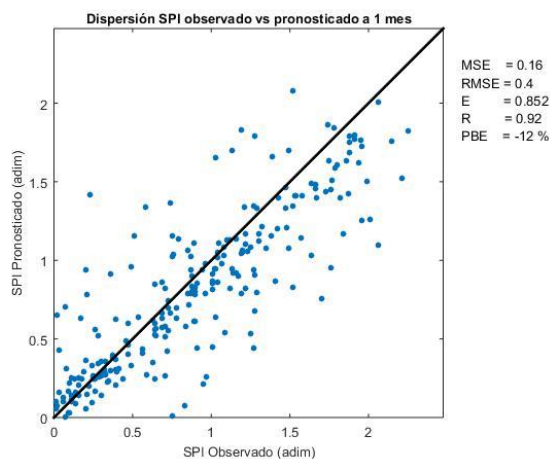


Figura. 65. SPI observado y pronosticado de 12 meses para la estación 25025 Presa Miguel Hidalgo. Enfoque EnKF - AR (2).

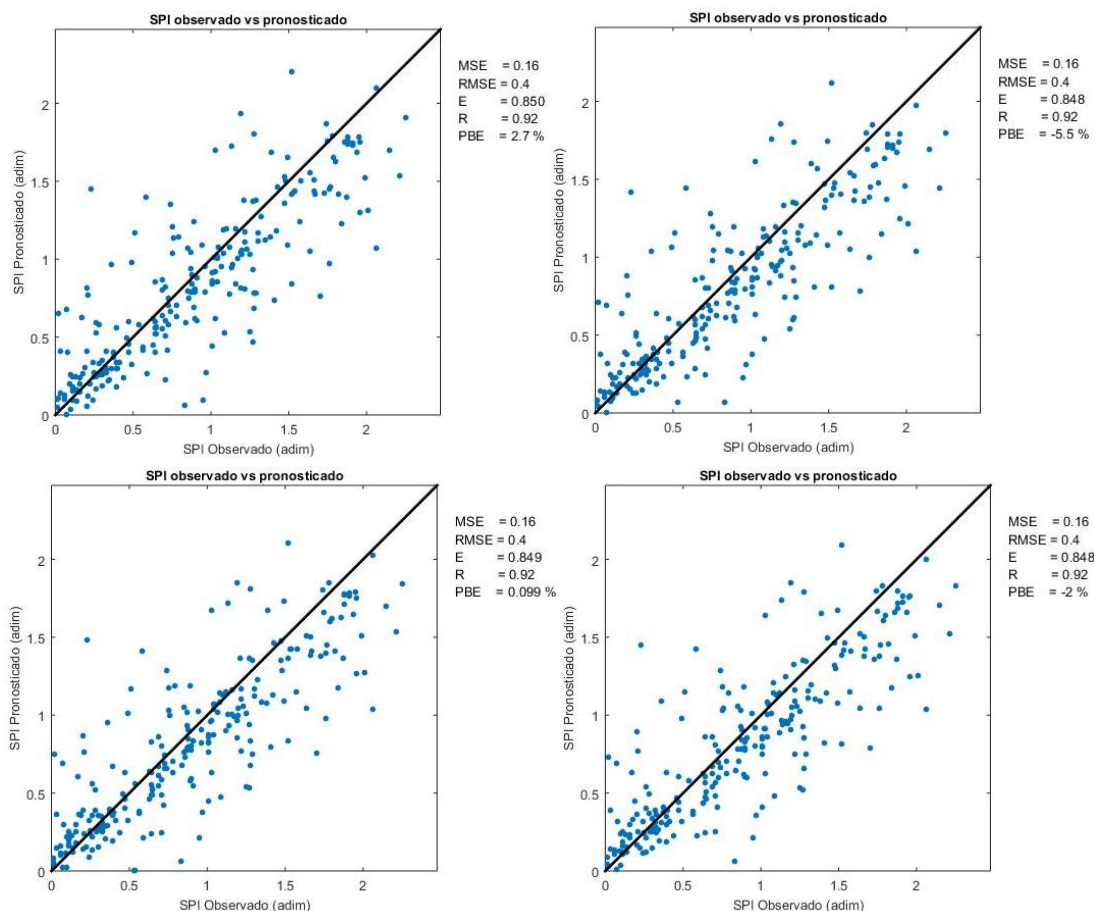


Figura. 66. SPI observado vs pronosticado de 12 meses para la estación 25025 Presa Miguel H., Sin. EnKF - ARX (Pt, PET, Tmin y Tmax). De izquierda a derecha y de arriba hacia abajo.

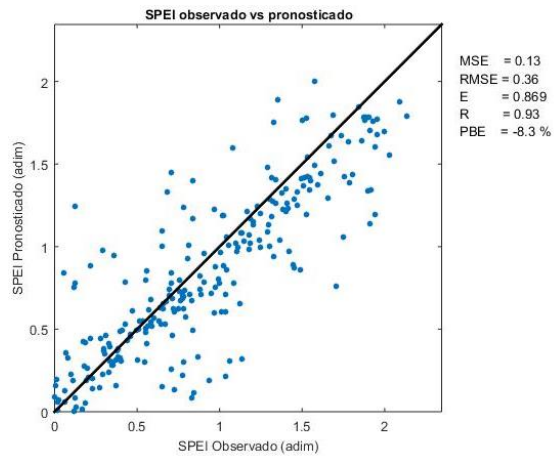


Figura. 67. SPEI observado vs el pronosticado de 12 meses para la estación 25025 Presa Miguel Hidalgo, Sinaloa. Enfoque EnKF – AR (2).

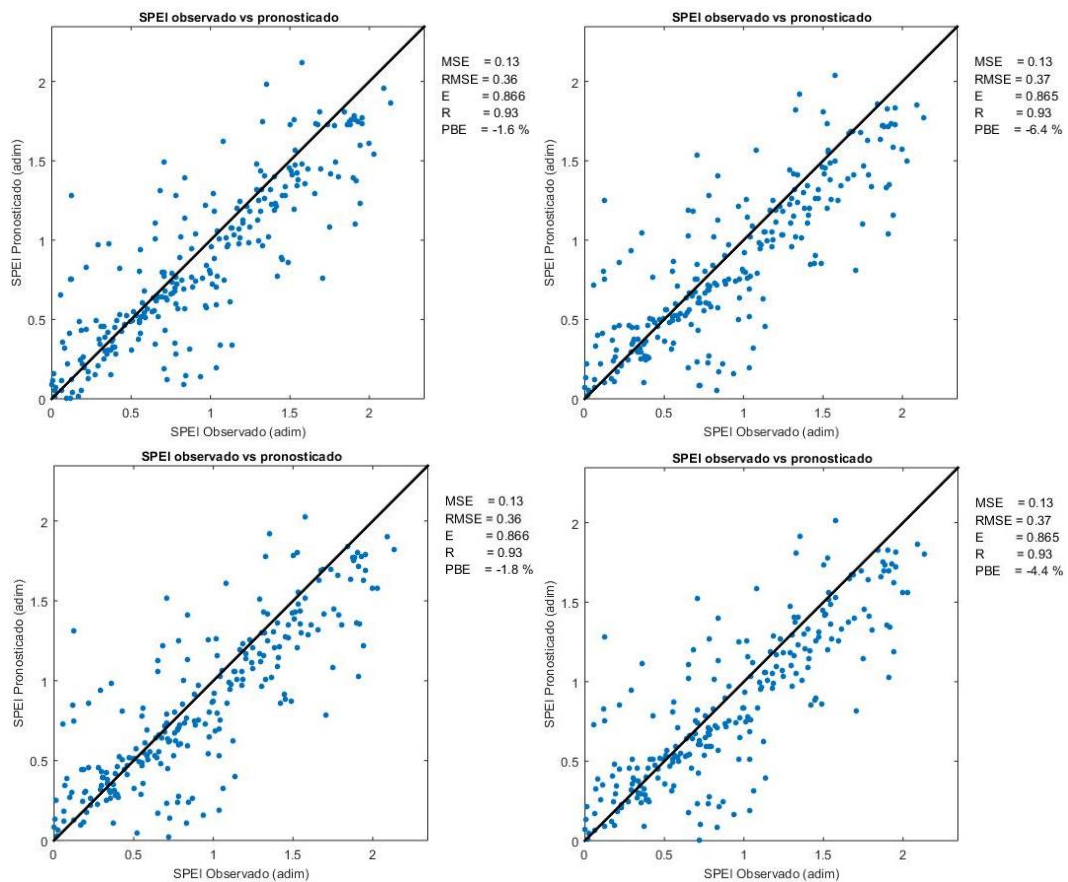


Figura. 68. SPEI observado vs pronosticado de 12 meses para la estación 25025 Presa Miguel H., Sin. EnKF - ARX (Pt, PET, Tmin y Tmax). De izquierda a derecha y de arriba hacia abajo.

3.4. Comparación DKF – EnKF

Los resultados nos indican que el empleo de un modelo ARX involucrando como variables exógenas Pt, PET, Tmin y Tmax no mejora significativamente el pronóstico de ambos índices. Con base en el principio de simplicidad el mejor modelo a utilizar es el AR (2), porque genera iguales o mejores resultados que el ARX y su implementación es más sencilla.

En términos de E el pronóstico para ambos índices es satisfactorio, para todas las escalas y modelos pronosticados su valor se encontró por arriba de 0, esto nos muestra que los modelos son mejores predictores que la media de la serie (Moriassi *et al.* 2007). Sin embargo, aunque para las series de 3 y 6 meses se alcanzaron valores de E mayores a 0.45, el valor de MSE y RMSE es alto para estas escalas temporales por lo que se considera que los diversos modelos realizan un pronóstico poco satisfactorio. En cambio para 12 y 24 meses los valores de E están por arriba de 0.85 y los valores de MSE y RMSE generan mayor certidumbre en la predicción.

En cuanto al estadístico R, su valor promedio es de 0.69 y 0.74 para el SPI y SPEI de 3 meses, respectivamente, valores cercanos a 1.0 indican un mejor ajuste de los datos pronosticados a los observados y un valor de $R > 0.75$ es satisfactorio (Moriassi *et al.* 2007), con base en esto se considera que el ajuste de los modelos a esta escala de tiempo no es adecuado. Para las escalas de 6, 12 y 24 meses los valores de R para el SPI y SPEI están por arriba de 0.79 y 0.82, respectivamente.

El SPEI presenta valores ligeramente mejores en la predicción, menor MSE y mejor ajuste del modelo. Este comportamiento puede deberse a que el SPEI se involucra la temperatura, la cual tiene un comportamiento más estable y “controla” el comportamiento del índice reduciendo los cambios abruptos, es decir, la diferencia en el valor del índice de un mes con respecto al anterior es menor para el SPEI que para el SPI, que sólo involucra la precipitación cuyo comportamiento es más errático y variable a lo largo del año.

Como resultado común para los enfoques utilizados para el pronóstico del SPI y SPEI, DKF – AR (2), DKF – ARX, EnKF – AR (2) y EnKF – ARX, se encontró que el pronóstico de las escalas de 3 y 6 meses genera errores (RMSE) de mínimo 0.46 lo que no es satisfactorio debido a la alta sensibilidad de los índices para cambiar de categoría, ya que al variar cada 0.5 se hace muy probable ubicar el estado futuro de la sequía en una categoría equivocada. Además, en la representación gráfica de estas escalas, se aprecia que los valores pronosticados no alcanzan los valores extremos de la serie observada de ambos índices, subestimando la intensidad de los periodos secos y húmedos.

Otro resultado común fue que el modelo ARX, con las sus variables exógenas, no mejoró el pronóstico de los índices a ninguna escala temporal, por lo que el modelo AR (2) se considera mejor para realizar el pronóstico ya que su implementación es más sencilla y arroja resultados iguales o mejores que el ARX.

A continuación se evalúa el pronóstico del SPI y SPEI para las escalas de 12 y 24 meses con el modelo AR (2) comparando su desempeño con los enfoques DKF y EnKF. Los resultados se muestran para las 14 estaciones analizadas dentro de la cuenca del río Fuerte con base en los estadísticos MSE, RMSE, E y R y su promedio en la cuenca (Cuadro 16 y 17).

Para el SPI los resultados por versión del filtro de Kalman empleado son muy similares, para la escala de 12 meses varían por una o dos centésimas, donde el DKF fue mejor en términos de RMSE y E para las estaciones Yecorato, Huites y Creel; el EnKF para las estaciones Moris, Batopilas e Higuera; y para las 8 estaciones restantes los resultados fueron iguales con ambos filtros. Para la escala de 24 meses los valores de los estadísticos son prácticamente iguales para el DKF y el EnKF, sólo en la estación Guadalupe el EnKF fue mejor.

Los estadísticos muestran que la escala de 24 meses se presentan valores promedio de RMSE menores (0.24 DKF y EnKF) y valores de E mayores (0.94 DKF y EnKF) con respecto a la escala de 12 meses (RMSE=0.34 DKF y EnKF; E=0.88 DKF y EnKF), lo que indica que el pronóstico es mejor a mayor escala temporal.

Los valores medios de los estadísticos para ambos filtros de Kalman muestran un igual desempeño del DKF y el EnKF con el modelo AR (2) para el pronóstico del SPI, esto muestra que el EnKF no mejora el pronóstico de este índice de sequía, sino que en promedio es igual al DKF en la cuenca.

Cuadro 16. Resumen de estadísticas del SPI de 12 y 24 meses. Enfoques DKF - AR (2) y EnKF - AR (2).

Clave	Nombre	Filtro de Kalman Modelo AR (2)	SPI							
			12				24			
			MSE	RMSE	E	R	MSE	RMSE	E	R
8038	Creel, Chih	DKF	0.10	0.32	0.89	0.94	0.05	0.22	0.95	0.98
		EnKF	0.11	0.33	0.88	0.94	0.05	0.22	0.95	0.98
8106	Norogachic, Chih	DKF	0.06	0.24	0.94	0.97	0.03	0.17	0.96	0.98
		EnKF	0.06	0.24	0.93	0.97	0.03	0.17	0.96	0.98
8161	Batopilas, Chih	DKF	0.13	0.36	0.88	0.94	0.05	0.22	0.96	0.98
		EnKF	0.12	0.35	0.88	0.94	0.05	0.22	0.95	0.98
8167	Chinipas, Chih	DKF	0.11	0.33	0.87	0.93	0.06	0.24	0.93	0.97
		EnKF	0.11	0.33	0.87	0.94	0.06	0.24	0.93	0.97
8172	Guadalupe, Chih	DKF	0.05	0.23	0.93	0.96	0.09	0.30	0.92	0.96
		EnKF	0.05	0.23	0.92	0.96	0.07	0.27	0.93	0.97
8182	Moris, Chih	DKF	0.06	0.24	0.94	0.97	0.01	0.11	0.99	0.99
		EnKF	0.05	0.22	0.95	0.97	0.01	0.11	0.99	0.99
8267	El Vergel, Chih	DKF	0.10	0.32	0.91	0.95	0.04	0.20	0.96	0.98
		EnKF	0.10	0.32	0.90	0.95	0.04	0.20	0.95	0.98
25009	Bocatoma, Sin	DKF	0.13	0.36	0.87	0.93	0.06	0.24	0.93	0.97
		EnKF	0.13	0.36	0.87	0.93	0.06	0.24	0.93	0.97
25019	Choix II, Sin	DKF	0.10	0.32	0.92	0.96	0.05	0.22	0.96	0.98
		EnKF	0.11	0.32	0.91	0.96	0.05	0.22	0.96	0.98
25025	P. Miguel Hidalgo, Sin	DKF	0.16	0.40	0.85	0.92	0.09	0.30	0.90	0.95
		EnKF	0.16	0.40	0.85	0.92	0.09	0.30	0.91	0.96
25042	Higuera, Sin	DKF	0.17	0.42	0.85	0.92	0.09	0.30	0.92	0.96
		EnKF	0.16	0.40	0.86	0.93	0.08	0.29	0.93	0.96
25044	Huites, Sin	DKF	0.11	0.33	0.89	0.94	0.06	0.24	0.94	0.97
		EnKF	0.11	0.34	0.89	0.94	0.06	0.24	0.94	0.97
25100	Yecorato, Sin	DKF	0.21	0.46	0.79	0.89	0.11	0.34	0.89	0.95
		EnKF	0.22	0.47	0.78	0.89	0.11	0.34	0.89	0.95
26053	Minas Nuevas, Son	DKF	0.15	0.39	0.85	0.92	0.07	0.26	0.92	0.96
		EnKF	0.15	0.39	0.85	0.92	0.07	0.26	0.92	0.96
	Media	DKF	0.12	0.34	0.88	0.94	0.06	0.24	0.94	0.97
		EnKF	0.12	0.34	0.88	0.94	0.06	0.24	0.94	0.97

MSE, Media del Cuadrado del Error; RMSE, Raíz Cuadrada de la Media del Cuadrado del Error; E, Eficiencia de Nash – Sutcliffe; R, Coeficiente de Correlación de los Datos. Estadísticas con respecto al SPI observado.

En el pronóstico del SPEI con los enfoques DKF – AR (2) y EnKF – AR (2), los estadísticos muestran un comportamiento similar al del pronóstico del SPI, pero con valores de RMSE son menores y los valores de E más altos.

Para la escala de 12 meses los resultados fueron ligeramente mejores para el DKF en las estaciones Creel, Norogachic, Choix y Yecorato; para el EnKF en las estaciones Moris, Higuera y Minas Nuevas; y en las 7 estaciones restantes los resultados fueron iguales para ambos enfoques. Para la escala de 24 meses los estadísticos presentaron mejores valores con el EnKF para las estaciones Creel, Guadalupe, Choix e Higuera, para las diez restantes los resultados fueron iguales entre el DKF y el EnKF, este comportamiento es diferente al ocurrido con el SPI donde todas las estaciones excepto una presentaron valores iguales a esa escala.

Al igual en los análisis por anteriores, la escala de 24 meses presenta los menores valores de MSE y RMSE, así como los valores más altos de E y R, llegando a alcanzar en la estación de Moris valores de E de 0.99 con ambos enfoques, los más altos presentados en todos los enfoques probados. Sin embargo, la escala de 12 meses presenta sus estadísticos en un rango muy aceptable, RMSE entre 0.18 y 0.40, E entre 0.84 y 0.97, R entre 0.92 y 0.98.

Los valores promedio de los estadísticos para el SPEI son iguales para la escala de 12 meses con el DKF y EnKF. Para la escala de 24 meses se muestra un valor menor de RMSE y mayor de E con el EnKF, mejora el pronóstico ligeramente.

Cuadro 17. Resumen de estadísticas del SPEI de 12 y 24 meses. Enfoques DKF - AR (2) y EnKF - AR (2).

Clave	Nombre	Filtro de Kalman Modelo AR (2)	SPEI							
			12				24			
			MSE	RMSE	E	R	MSE	RMSE	E	R
8038	Creel, Chih	DKF	0.07	0.26	0.92	0.96	0.04	0.20	0.97	0.98
		EnKF	0.08	0.28	0.92	0.96	0.03	0.17	0.97	0.98
8106	Norogachic, Chih	DKF	0.05	0.22	0.95	0.98	0.02	0.14	0.98	0.99
		EnKF	0.06	0.24	0.94	0.97	0.02	0.14	0.98	0.99
8161	Batopilas, Chih	DKF	0.08	0.28	0.92	0.96	0.03	0.17	0.97	0.99
		EnKF	0.08	0.28	0.92	0.96	0.03	0.17	0.97	0.99
8167	Chinipas, Chih	DKF	0.10	0.32	0.89	0.94	0.04	0.20	0.95	0.98
		EnKF	0.10	0.32	0.89	0.94	0.04	0.20	0.95	0.98
8172	Guadalupe, Chih	DKF	0.07	0.26	0.94	0.97	0.09	0.30	0.92	0.96
		EnKF	0.07	0.26	0.93	0.97	0.03	0.16	0.98	0.99
8182	Moris, Chih	DKF	0.03	0.19	0.97	0.98	0.01	0.10	0.99	1.00
		EnKF	0.03	0.18	0.97	0.98	0.01	0.10	0.99	1.00
8267	El Vergel, Chih	DKF	0.07	0.26	0.91	0.96	0.03	0.17	0.96	0.98
		EnKF	0.07	0.26	0.91	0.96	0.03	0.17	0.96	0.98
25009	Bocatoma, Sin	DKF	0.11	0.33	0.89	0.95	0.05	0.22	0.95	0.98
		EnKF	0.11	0.33	0.89	0.94	0.05	0.22	0.95	0.98
25019	Choix II, Sin	DKF	0.09	0.30	0.91	0.96	0.07	0.27	0.94	0.97
		EnKF	0.10	0.31	0.91	0.95	0.07	0.26	0.94	0.97
25025	P. Miguel Hidalgo, Sin	DKF	0.13	0.36	0.87	0.93	0.07	0.26	0.92	0.96
		EnKF	0.13	0.36	0.87	0.93	0.07	0.26	0.92	0.96
25042	Higuera, Sin	DKF	0.13	0.36	0.88	0.94	0.06	0.25	0.95	0.97
		EnKF	0.13	0.35	0.89	0.94	0.06	0.24	0.95	0.97
25044	Huites, Sin	DKF	0.08	0.29	0.92	0.96	0.04	0.21	0.95	0.98
		EnKF	0.09	0.29	0.91	0.96	0.04	0.21	0.95	0.98
25100	Yecorato, Sin	DKF	0.15	0.39	0.84	0.92	0.07	0.26	0.93	0.97
		EnKF	0.16	0.40	0.84	0.92	0.07	0.26	0.93	0.97
26053	Minas Nuevas, Son	DKF	0.11	0.33	0.88	0.94	0.05	0.22	0.94	0.97
		EnKF	0.10	0.32	0.88	0.94	0.05	0.22	0.94	0.97
	Media	DKF	0.09	0.30	0.91	0.95	0.05	0.21	0.95	0.98
		EnKF	0.09	0.30	0.91	0.95	0.04	0.20	0.96	0.98

MSE, Media del Cuadrado del Error; RMSE, Raíz Cuadrada de la Media del Cuadrado del Error; E, Eficiencia de Nash – Sutcliffe; R, Coeficiente de Correlación de los Datos. Estadísticas con respecto al SPEI observado.

De acuerdo a los resultados obtenidos y a los análisis realizados no existen diferencias significativas entre el enfoque DKF-AR (2) y el EnKF-AR (2) para el pronóstico de los índices SPI y SPEI, donde se encontraron valores muy similares en los estadísticos de interés para las escalas de 12 y 24 meses. Estos resultados indican que el uso del EnKF no mejora significativamente el pronóstico de los índices de sequía y con base en el Principio de Simplicidad es mejor utilizar el DKF pues su implementación es más sencilla.

Las escalas temporales de los índices indican el número de meses que las variables (Pt y Pt-ETP) fueron tomadas en cuenta para su cálculo, en este caso las escalas de 12 y 24 meses indican el grado en que la humedad acumulada de los 11 y 23 meses anteriores, respectivamente, y el mes actual están por arriba o por debajo de la media. La humedad acumulada de 12 y 24 meses está vinculada al estado de los cuerpos de agua superficiales y subterráneos en menor y mayor grado, los índices de sequía a estas escalas pueden sugerir las condiciones de presas, embalses, lagos, ríos y acuíferos.

Para los fines del presente trabajo, el cual está enfocado en la planeación y administración del recurso hídrico para uso agropecuario, energético y doméstico principalmente, se considera que la escala de 12 meses es la más adecuada para realizar el pronóstico de los índices, ya que no se extiende demasiado en el tiempo, sino que toma en cuenta sólo el año inmediato anterior, presenta mayor variación en los estados de la sequía para detectar periodos críticos y genera buenos resultados en el pronóstico.

3.5. Pronóstico de sequías con 1, 2, 3 y 4 meses de anticipación

Se definió el pronóstico de los índices de sequía SPI y SPEI para la escala de 12 meses, con el enfoque DKF-AR (2) que arrojó resultados satisfactorios en términos de RMSE, E y R, y por la sencillez de su implementación.

El pronóstico de los índices se estimó con 1 mes ($t+1|t$), 2 meses ($t+2|t$), 3 meses ($t+3|t$) y 4 meses ($t+4|t$) de anticipación, esto se realizó avanzando en la etapa de pronóstico del algoritmo del DKF hasta cuatro pasos en el tiempo (meses) sin actualizar los datos, es decir, las mediciones del índice de los cuatro meses siguientes no fueron asimiladas por el sistema y son estimadas a partir del estado inmediato anterior pronosticado no del observado.

De acuerdo al Cuadro 18 con las estadísticas del SPI, el pronóstico para el primer mes ($t+1|t$) es mejor que el de los siguientes tres meses puesto que su estimación ($t+1$) está basada en una medición observada del sistema ocurrida en el estado inmediato anterior (t), pero los pronósticos a 2, 3 y 4 meses ($t+2$, $t+3$, $t+4$) fueron estimados con el estado pronosticado anterior, no con una medición real y son un reflejo del tiempo t y no del estado anterior observado, por lo que el error entre el pronóstico y el observado se va incrementando conforme aumenta el intervalo de tiempo.

Para el pronóstico a 1 mes el valor de RMSE es menor y los de E y R son más altos que a 2, 3 y 4 meses, a pesar de que el valor de los estadísticos varía en cada estación este comportamiento se manifiesta en todas.

Considerando el valor promedio de los estadísticos vemos que el pronóstico a 2 meses de anticipación genera un RMSE de 0.49 y se va incrementando a 3 y 4 meses, con errores por arriba de este valor no se recomienda realizar el pronóstico porque es muy probable estimar el valor del índice erróneamente.

En términos de E el valor medio a 1 mes de adelanto es de 0.88 y disminuye conforme se avanza en el pronóstico, y es de 0.51 a 4 meses de adelanto, a pesar de que ello el modelo se mantiene como mejor pronosticador que la media. Los valores de R siguen el mismo patrón de E, con valores promedio de 0.94 y 0.71 para el primer y cuarto mes de adelanto, respectivamente.

Cuadro 18. Resumen estadístico del pronóstico del SPI de 12 meses con 1, 2 3 y 4 meses de anticipación.

Clave	Nombre	SPI 12 meses / DKF - AR (2)											
		1 mes			2 meses			3 meses			4 meses		
		RMSE	E	R	RMSE	E	R	RMSE	E	R	RMSE	E	R
8038	Creel, Chih	0.32	0.89	0.94	0.49	0.74	0.86	0.60	0.63	0.79	0.68	0.53	0.73
8106	Norogachic, Chih	0.24	0.94	0.97	0.36	0.85	0.92	0.46	0.76	0.88	0.54	0.67	0.82
8161	Batopilas, Chih	0.34	0.88	0.94	0.50	0.75	0.87	0.61	0.62	0.79	0.70	0.51	0.71
8167	Chinipas, Chih	0.34	0.87	0.93	0.48	0.74	0.86	0.59	0.61	0.78	0.67	0.48	0.70
8172	Guadalupe, Chih	0.23	0.93	0.96	0.36	0.82	0.90	0.44	0.73	0.86	0.51	0.64	0.80
8182	Moris, Chih	0.24	0.94	0.97	0.32	0.89	0.94	0.39	0.84	0.92	0.45	0.78	0.89
8267	El Vergel, Chih	0.31	0.91	0.95	0.50	0.76	0.87	0.64	0.60	0.78	0.75	0.46	0.68
25009	Bocatoma, Sin	0.36	0.87	0.93	0.51	0.74	0.86	0.62	0.61	0.78	0.71	0.49	0.70
25019	Choix II, Sin	0.32	0.92	0.96	0.51	0.78	0.89	0.65	0.64	0.80	0.77	0.50	0.71
25025	P. Miguel Hidalgo, Sin	0.40	0.85	0.92	0.56	0.70	0.84	0.70	0.54	0.74	0.80	0.41	0.64
25042	Higuera, Sin	0.42	0.85	0.92	0.58	0.70	0.84	0.71	0.56	0.75	0.80	0.45	0.67
25044	Huites, Sin	0.33	0.89	0.94	0.49	0.76	0.87	0.62	0.63	0.79	0.72	0.49	0.70
25100	Yecorato, Sin	0.46	0.79	0.89	0.68	0.54	0.74	0.81	0.35	0.60	0.88	0.24	0.49
26053	Minas Nuevas, Son	0.38	0.85	0.92	0.54	0.70	0.84	0.65	0.56	0.75	0.74	0.43	0.66
	Media	0.34	0.88	0.94	0.49	0.75	0.86	0.61	0.62	0.79	0.69	0.51	0.71

* Estadísticas con respecto al SPI observado.

Para el SPEI el comportamiento del pronóstico (Cuadro 19) es el mismo que para el SPI, para 1 mes de adelanto los valores de RMSE que se generan al predecir son menores que para el pronóstico de los meses siguientes y los valores de E y R se comportan a la inversa, siendo mayores para el primer mes de adelanto y disminuyendo conforme se avanza en el pronóstico.

Cuadro 19. Resumen estadístico del pronóstico del SPEI de 12 meses con 1, 2, 3 y 4 meses de anticipación.

Clave	Nombre	SPEI 12 meses / DKF - AR (2)											
		1 mes			2 meses			3 meses			4 meses		
		RMSE	E	R	RMSE	E	R	RMSE	E	R	RMSE	E	R
8038	Creel, Chih	0.27	0.92	0.96	0.43	0.81	0.90	0.54	0.70	0.84	0.62	0.61	0.78
8106	Norogachic, Chih	0.22	0.95	0.98	0.36	0.87	0.93	0.47	0.78	0.88	0.57	0.68	0.83
8161	Batopilas, Chih	0.28	0.92	0.96	0.42	0.81	0.90	0.52	0.71	0.85	0.60	0.62	0.79
8167	Chinipas, Chih	0.31	0.89	0.94	0.46	0.76	0.87	0.57	0.62	0.79	0.66	0.49	0.70
8172	Guadalupe, Chih	0.26	0.94	0.97	0.43	0.83	0.91	0.55	0.73	0.85	0.65	0.62	0.79
8182	Moris, Chih	0.17	0.97	0.99	0.29	0.93	0.96	0.39	0.86	0.93	0.48	0.79	0.89
8267	El Vergel, Chih	0.27	0.91	0.95	0.41	0.79	0.89	0.53	0.66	0.81	0.63	0.52	0.73
25009	Bocatoma, Sin	0.33	0.89	0.95	0.49	0.77	0.88	0.60	0.65	0.81	0.70	0.53	0.73
25019	Choix II, Sin	0.30	0.91	0.96	0.48	0.78	0.89	0.62	0.64	0.80	0.73	0.50	0.71
25025	P. Miguel Hidalgo, Sin	0.36	0.87	0.93	0.52	0.73	0.86	0.65	0.58	0.76	0.74	0.44	0.67
25042	Higuera, Sin	0.36	0.88	0.94	0.51	0.76	0.87	0.63	0.64	0.80	0.72	0.53	0.73
25044	Huites, Sin	0.29	0.92	0.96	0.44	0.80	0.90	0.56	0.68	0.82	0.66	0.55	0.74
25100	Yecorato, Sin	0.40	0.84	0.92	0.58	0.65	0.81	0.70	0.50	0.71	0.77	0.39	0.63
26053	Minas Nuevas, Son	0.33	0.88	0.94	0.47	0.75	0.86	0.58	0.61	0.78	0.67	0.48	0.69
Media		0.30	0.91	0.95	0.45	0.79	0.89	0.57	0.67	0.82	0.66	0.55	0.74

* Estadísticas con respecto al SPEI observado.

De acuerdo a las estadísticas el SPEI presenta mejores resultados que el SPI en el pronóstico, por ejemplo, para 1 mes de anticipación la media de los estadísticos para el SPI fue RMSE = 0.34, E = 0.88 y R = 0.94, mientras que el SPEI obtuvo RMSE = 0.30, E = 0.91, y R = 0.95.

En las figuras 69 y 70 se muestran los resultados del pronóstico del SPI y SPEI de 12 meses para la estación 25044 Huites, Sin., ubicada en la parte media de la cuenca. Se observa que la línea del pronóstico (color rojo) se ajusta muy bien a la observada (color azul) para 1 mes de adelanto en la predicción y este ajuste se reduce conforme se avanza en el tiempo sin actualización de los datos observados del índice, tal y como lo indicaron en los estadísticos anteriormente.

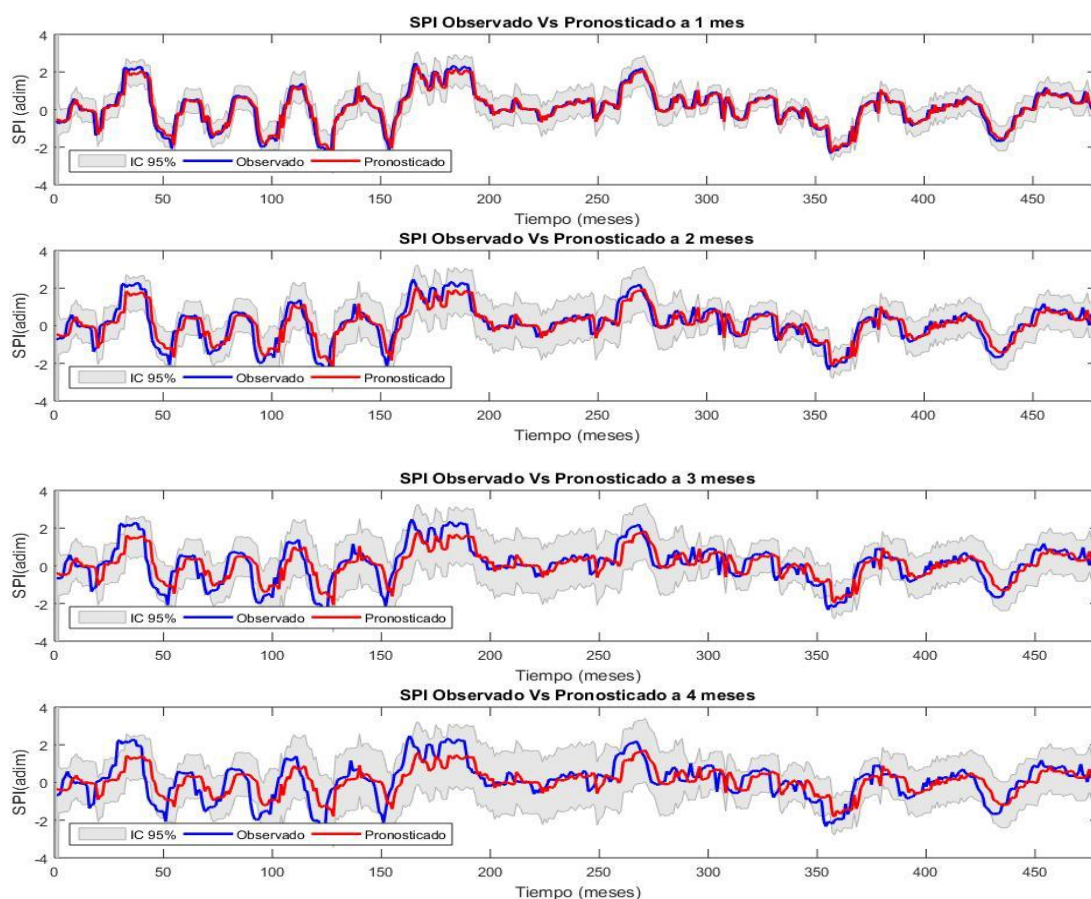


Figura. 69. SPI observado, pronosticado e intervalo de confianza al 95 % para 1, 2, 3 y 4 meses de anticipación de la estación Huites.

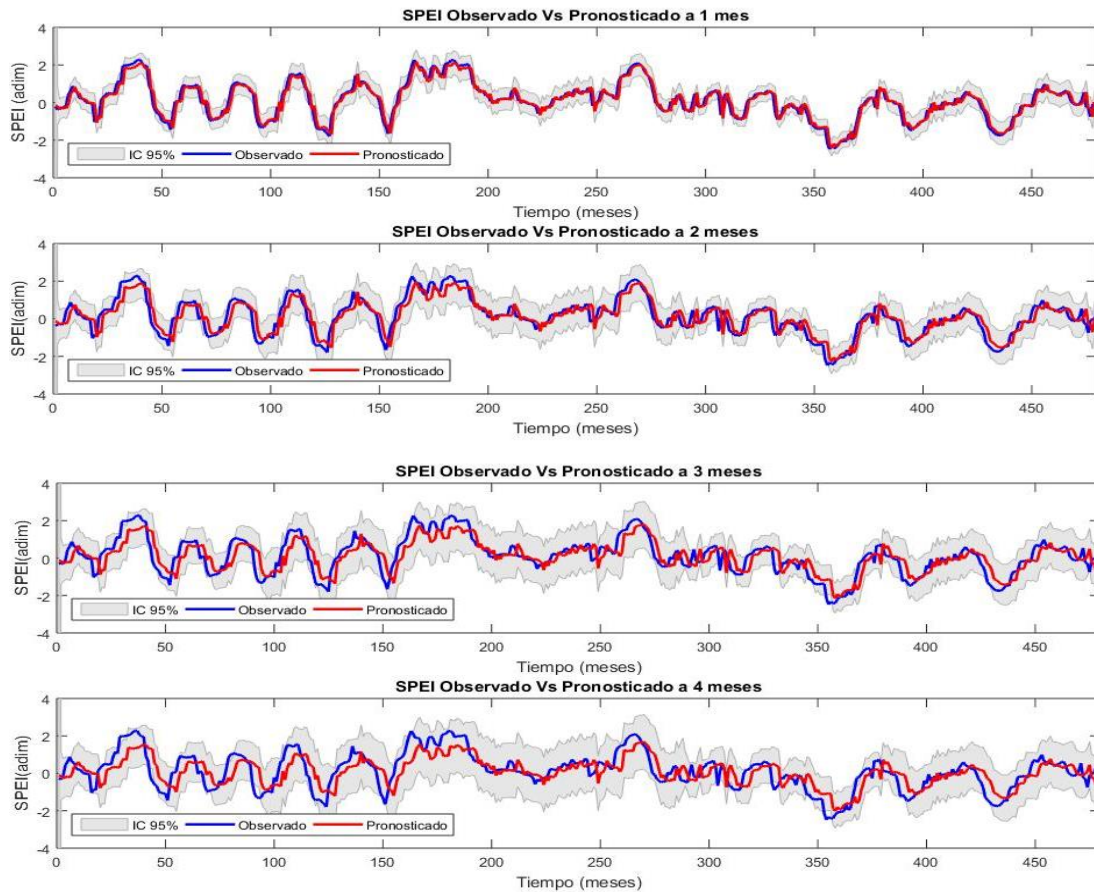


Figura. 70. SPEI observado, pronosticado e intervalo de confianza al 95 % para 1, 2, 3 y 4 meses de anticipación de la estación Huites.

Se incluyó un intervalo de confianza al 95 % que sigue el recorrido de cada uno de los estados de la serie con el objetivo de establecer el grado de incertidumbre asociado al pronóstico en cada paso del tiempo con respecto a los valores observados, este intervalo de predicción se obtuvo siguiendo los criterios establecidos por Chatfield (2004). Una característica común de este intervalo es que a mayor ajuste del modelo su amplitud es menor debido a que el error que se comete es menor y hay mayor certeza en los resultados.

El pronóstico para valores entre -1 y 1 presenta un error menor comparado con los valores fuera de este rango, en la predicción a 2, 3 y 4 meses de adelanto la serie pronosticada no toca los puntos observados más altos y bajos, es probable estos valores extremos se ubiquen fuera del intervalo de confianza conforme se avanza en el pronóstico.

La figura 67 muestra los diagramas de dispersión del SPI pronosticado a diferentes pasos en el tiempo del SPI (primeros cuatro) y SPEI (últimos cuatro), respectivamente, indicando el grado de ajuste entre los datos observados y los pronosticados con el enfoque DKF – AR (2), y los errores del pronóstico en función de la concentración de los datos alrededor de la línea 1:1. La dispersión de los puntos es menor para 1 mes de adelanto y cada vez mayor para los siguientes meses pronosticados.

Se observa un error menor para valores entre 0 y 1, mientras para los valores extremos que marcan los periodos húmedos y secos intensos se genera un mayor grado de error en su estimación pues conforme se avanza en el pronóstico se acentúa su ubicación por debajo de la línea, lo que indica que la predicción va subestimando la intensidad del valor observado del índice conforme avanza su pronóstico para 2, 3 y 4 meses de adelanto; sin embargo, retomando los estadísticos de los cuadros anteriores, valores de $E = 0.51$ y $R = 0.71$ para el SPI y de $E = 0.55$ y $R = 0.74$ para el SPEI al cuarto mes de adelanto indican que el modelo es mejor predictor que la media de los datos y que se tiene un ajuste satisfactorio del modelo a los datos observados.

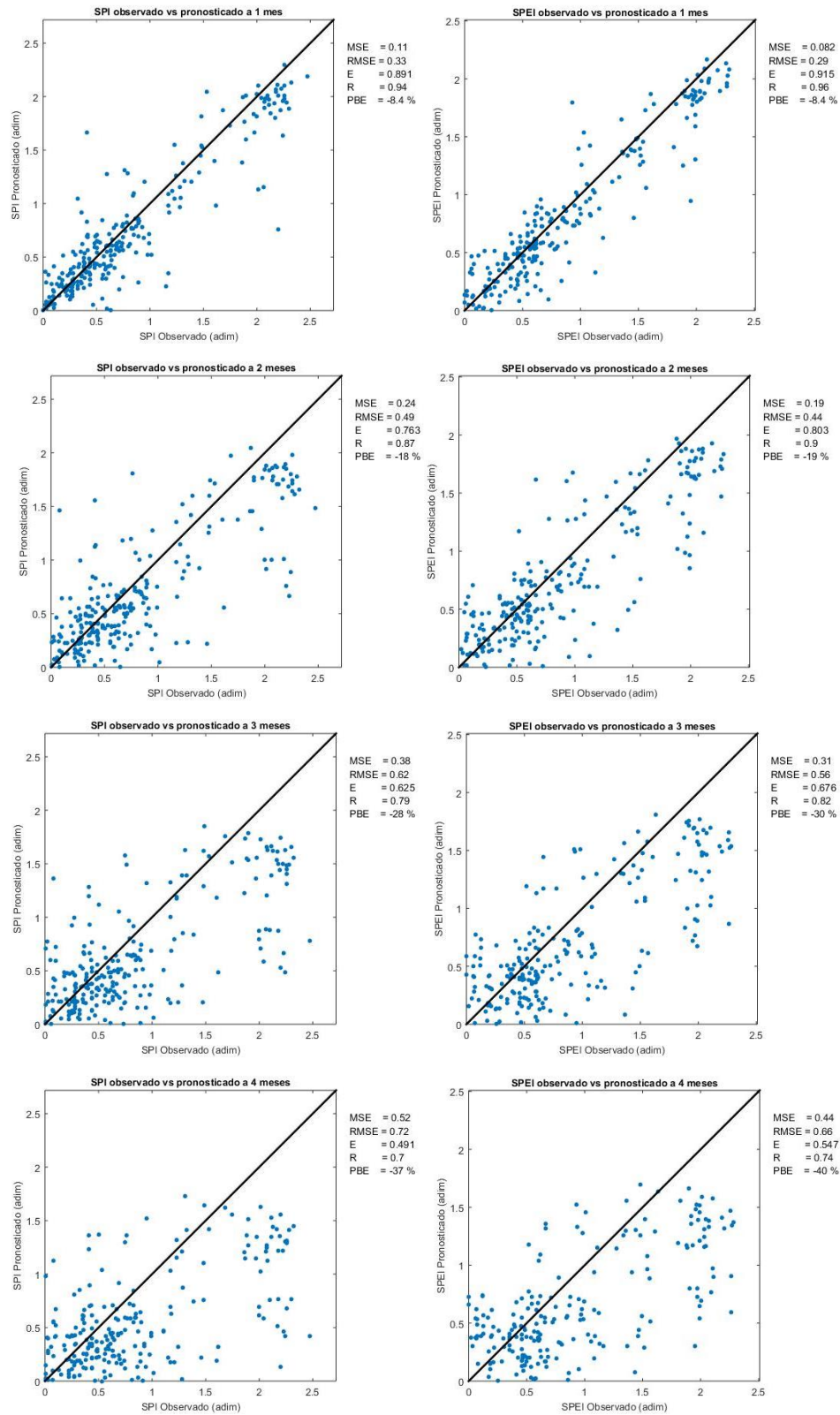


Figura. 71. Diagramas de dispersión para el SPI y SPEI para cuatro pasos de adelanto, estación 25044 Huites, Sin.

La figura 72 muestra el comportamiento de los errores generados en el pronóstico del SPI y SPEI. Teóricamente los errores de predicción ($e = x_o - x_f$) pueden ser representadas por una distribución normal, donde el centro de la campana es tanto la media de la distribución como la mediana. En este caso la distribución de los errores se comparó a diversas distribuciones como la normal, la generalizada de valor extremo, logística y t de Student escalada, siendo esta última distribución la que mayor ajuste a los datos tuvo al igual que lo obtuvo González *et al.* (2015) al analizar los errores del pronóstico de caudales con filtros de Kalman.

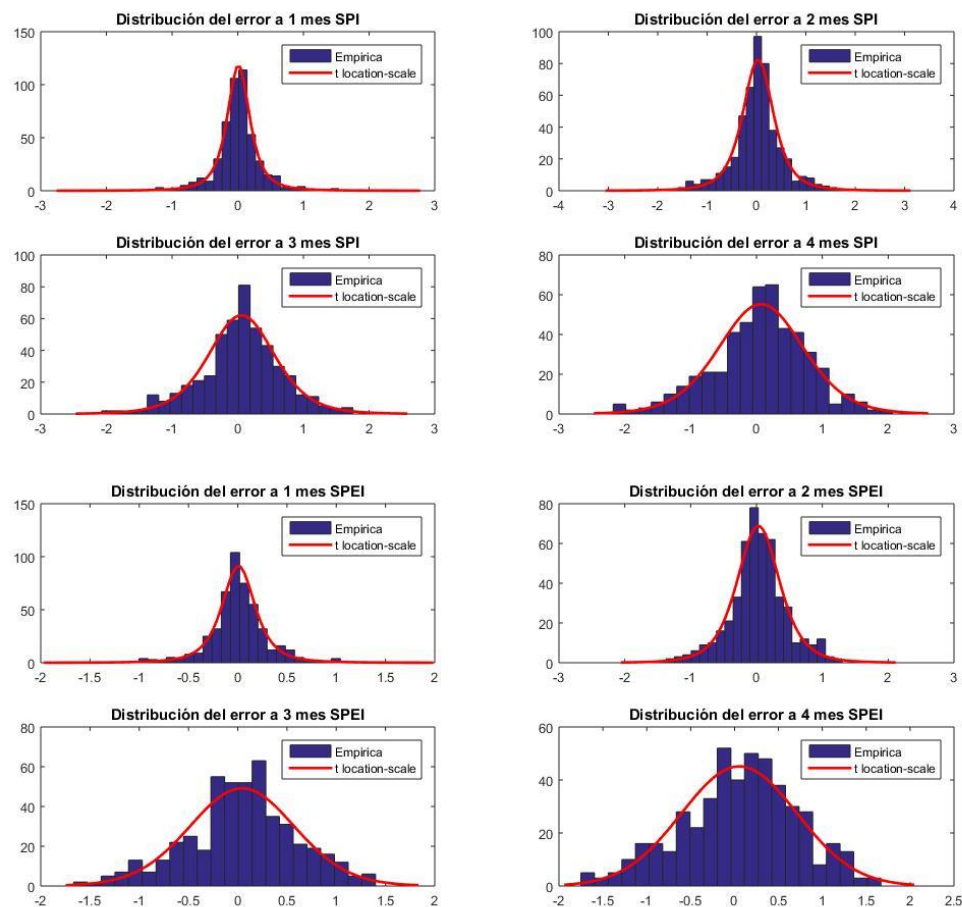


Figura. 72. Distribución de los errores del pronóstico del SPI SPEI a diferentes pasos de adelanto, estación 25044 Huites, Sin.

La distribución t de Student escalada pertenece a la familia de las t de Student y se caracteriza por presentar colas pesadas, con alta frecuencia de valores atípicos que no se presentan en una distribución normal, conforme se avanza en la predicción las colas son más pesadas, la altura de la campana se reduce y la varianza aumenta, indicando que se incrementa el error.

La distribución de los errores para el SPI en el primer mes de adelanto señala que se generan errores por arriba de 2 unidades (eje X de cada gráfica), en cambio para el primer mes de adelanto del SPEI los errores máximos están alrededor de 1.5 unidades, este comportamiento se manifiesta para los demás meses de adelanto, $t+2$, $t+3$ y $t+4$, donde se aprecia que las campanas de la distribución para el SPI son más amplias y se llegan a presentar errores por más de 2 unidades, y para el SPEI sólo en el segundo mes de adelanto se generaron pronósticos con este grado de error. En términos de frecuencia de los errores (eje Y de cada gráfica), a pesar de que se generan errores de mayor magnitud para el pronóstico del SPI que para pronóstico del SPEI, la frecuencia de errores cercanos a cero es mayor para el SPI en todos los pasos hacia adelante.

En la figura 73 se presentan los diagramas de cajas para el SPI y SPEI en los diferentes pasos de la predicción. En ellos se muestra como los errores se acumulan cerca de cero para el primer mes de adelanto y la media se sitúa sobre este mismo valor, el valor de los errores se incrementa al avanzar en el pronóstico y su media se va adentrando en espacio positivo, indicando que el pronóstico está subestimando el valor observado.

Las marcas rojas fuera del valor máximo y mínimo, indican los valores atípicos para el conjunto de errores, los cuales presentan un valor absoluto más alto al avanzar en el pronóstico. Este comportamiento confirma la tendencia de distribución del error a incrementar las colas a medida que avanza en el pronóstico y que el mejor pronóstico se realiza en el tiempo inmediato ($t+1$). Si observamos el eje Y que muestra el valor del error para el SPI este se mueve entre -2 y 2, y con el SPEI entre -1.5 y 1.5, comprobando que los errores para el pronóstico del SPEI son menores en todos los pronósticos a futuro.

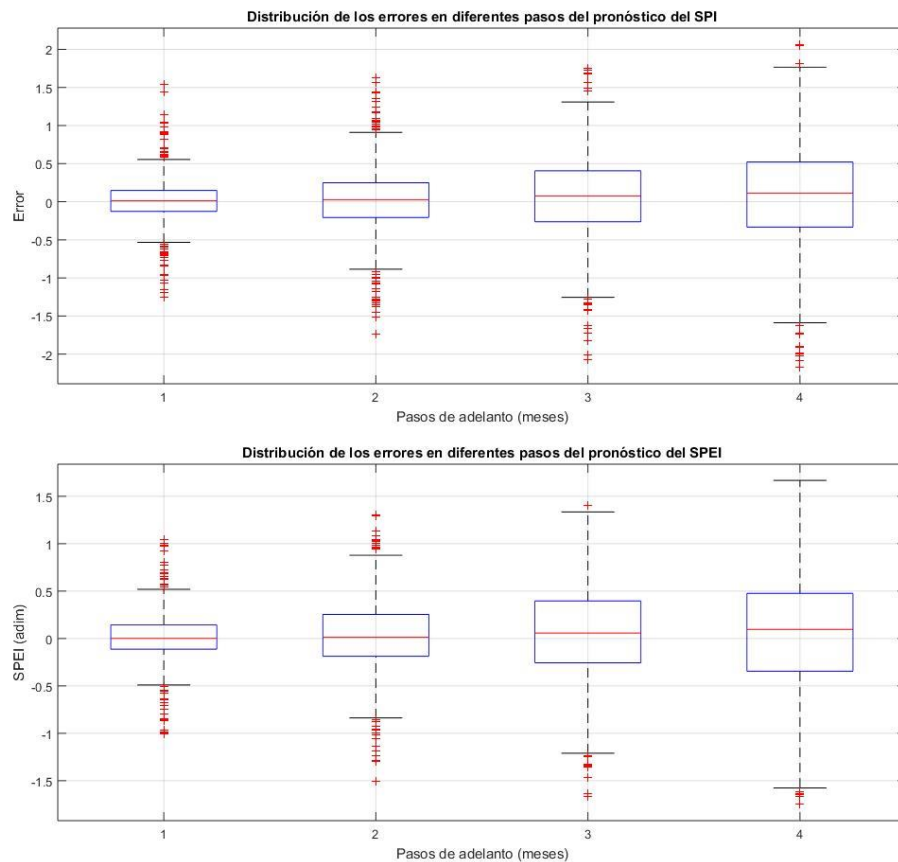


Figura. 73. Diagrama de cajas de la distribución de los errores en los diferentes pasos del pronóstico del SPI y SPEI para la estación Huites.

De los resultados obtenidos en el pronóstico de los índices de sequía SPI y SPEI se puede concluir que los resultados del modelo DKF – AR (2) son satisfactorios, presentando valores de RMSE por debajo de 0.4, y de E y R por arriba de 0.85, lo que da un alto grado de confianza en el pronóstico. Los demás enfoque probados con el EnKF y modelos ARX con las cuatro variables exógenas no mejoraron significativamente el pronóstico de los índices, por lo que el DKF con el AR (2) se consideró el mejor por sus resultados satisfactorios y fácil implementación.

La escala temporal de los índices que mejores resultados obtuvo fue para 12 y 24 meses, aunque para fines operativos la escala de 12 meses se considera más adecuada para servir de referencia en la toma de decisiones sobre aspectos de planeación y administración de los recursos hídricos de la cuenca del río Fuerte debido a su importancia agrícola y en materia de generación de energía.

En el pronóstico con 1, 2, 3 y 4 meses de anticipación los mejores resultados se encontraron para el tiempo inmediato ($t+1$) en ambos índices, los valores de E son los más altos con respecto a los tiempos siguientes ($t+2$), ($t+3$) y ($t+4$). Con respecto al RMSE sólo los pronósticos a 1 y 2 meses hacia adelante son aceptables con valores medios para el SPI y SPEI de 0.49 y 0.45 al tiempo ($t+2$), respectivamente, sin embargo, el valor de E indica que los pronósticos para todos los meses de adelanto son aceptables, SPI = 0.51 y SPEI = 0.55 , mostrando que el modelo es mejor predictor que la media de los datos observados; lo anterior ocurre también para R, donde los valores

promedio para el cuarto mes de adelanto son $SPI = 0.71$ y $SPEI = 0.74$, señalando un buen ajuste del modelo de predicción a los datos observados para todos los meses de anticipación.

En todos los pronósticos realizados el SPEI generó mejores resultados, con valores de RMSE siempre menores que el SPI, y valores más altos de E y R, esto debido a su comportamiento más estable producto de la inclusión de la temperatura en el cálculo del SPEI, en cambio el SPI al estar sujeto sólo a la variable precipitación su serie presenta mayor inestabilidad y cambios abruptos que en muchos casos no es posible predecir adecuadamente al pronosticar con el filtro de Kalman.

4. CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos del pronóstico de los índices SPI y SPEI en la cuenca del río Fuerte, el enfoque DKF-AR (2) generó los mejores resultados, en términos de RMSE y Nash-Sutcliffe. Los enfoques probados con el EnKF y el modelo ARX no mejoraron significativamente el pronóstico.

El pronóstico del SPI y SPEI de 3 y 6 meses no fue satisfactorio, el valor de RMSE no es adecuado. Sin embargo, E y R señalan que a estas escalas el modelo es mejor predictor que la media de los datos y tiene buen ajuste.

El pronóstico es mejor conforme se avanza en la escala temporal, por lo que las series pronosticadas para los índices a escalas de 12 y 24 meses generan los mejores resultados. En términos de operatividad la escala temporal de 12 meses se considera la adecuada para el pronóstico de las sequías en la cuenca del río Fuerte, por la vocación agrícola e energética de la cuenca es de gran importancia determinar el impacto futuro de la sequía en las presas Miguel Hidalgo, Huites y Josefa Ortiz, el cual puede ser reflejado por la escala temporal a 12 meses.

Los pronósticos realizados un paso hacia adelante en el tiempo, es decir, con un mes de anticipación ($L=1$) presentaron un mejor ajuste en términos de RMSE, Nash-Sutcliffe y R, que los pronósticos realizados a 2, 3 y 4 meses de adelanto, en los cuáles conforme se avanza en el pronóstico en el tiempo el modelo pierde precisión y tiende a presentar un menor grado de ajuste a los datos observados.

En los pronósticos del SPI y SPEI con 1 a 4 meses de anticipación el modelo tiende a subestimar el valor observado del índice, por lo que en el pronóstico al cuarto mes generalmente presenta valores dentro del rango de condiciones normales del índice (entre -1 y 1). En términos de RMSE el pronóstico puede ser adecuado hasta el segundo mes, pero el valor de Nash-Sutcliffe en el pronóstico con cuatro meses de anticipación indica que es mejor predictor que la media de los datos.

El periodo previo de calibración fue fundamental para mejorar el pronóstico, debido a la variabilidad estacional e interanual de la sequía y de las variables climáticas, es preciso incorporar dentro del modelo de pronóstico parámetros que reflejen las condiciones hídricas previas del sitio de estudio.

La aplicación del DKF y el EnKF, generó resultados similares en términos de los estadísticos RMSE y Nash-Sutcliffe, sin embargo, no fue significativamente mejor en ninguno de los pronósticos a corto plazo, dada la linealidad de los modelos autorregresivos, por lo que se decantó por el DKF.

El valor del parámetro alpha que describe el grado de error de las mediciones fue replanteado, dado que el sistema de mediciones del SPI y SPEI es un programa computacional y no está sujeto a valoración humana, por lo que para determinar un valor adecuado se realizaron varias pruebas y se consideró $\alpha=0.0001$. Se consideró muy pequeño, especialmente para estaciones con series estables donde el un valor por arriba del ideal puede generar valores en el pronóstico fuera del rango de los índices.

5. LITERATURA CITADA

- Al-Qinna M., Hammouri N.A., Obeidat M.M., Ahmad F.Y. 2010. Drought analysis in Jordan current and future climates. Climate Change, DOI: 10.1007/s10584-010-9954-y
- Beguiría, S., and Vicente, S. (2014). Calculation of the Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index. Package SPEI.R for R or RStudio Program.
- Chatfield C. 2004. The analysis of time series: An introduction. Six edition. Chapman & Hall/ CRC press. 313 pp.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2015). Sistema de Información Geográfica del Agua (SIGA). Recuperado de: <http://siga.conagua.gob.mx/REPDA/Menu/FrameKMZ.htm>
- Cryer D. J., Chan K.S. Time Series Analysis. With applications in R. Ed. Springer. U.S.A. 2008.
- De Jesús A., Breña J.A., Pedrozo A. 2014. Predicción de sequías mediante el uso de satélites y asimilación de datos. XXIII Congreso Nacional de Hidráulica. México.
- ESRI. ArcGIS ® Desktop. Release 10.1.

- Evensen, G. (1994). Sequential data assimilation with a nonlinear quasi-geostrophic model using Monte Carlo methods to forecast error statistics. *Journal of Geophysical Research*. vol. 99, no. C5, pp. 10143–10162.
- Evensen, G. (2003). The ensemble Kalman filter: Theoretical formulation and practical implementation. *Ocean Dynamics*, 53:8343-367.
- Evensen, G. (2009). Data assimilation. The Ensemble Kalman Filter. Second Edition. Ed. Springer. Berlin, Germany. 314 pp.
- Gelb A. 1974. Applied Optimal Estimation. Massachusetts, MIT Press. 374 pp.
- Gillijns S., Mendoza O. B., Chandrasekar J., De Moor B., Bernstein D. and Ridley A. 2006. What is the ensemble Kalman filter and how well does it work? American Control Conference, IEEE.
- González F., Ibáñez L., Valdés J.B., Vázquez M., Ruiz A. 2015. Pronóstico de caudales con el filtro de Kalman en el río Turbio. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 6(4): 5-24.
- Gupta H. V., Kling H., Yilmaz K., Martinez G.F. 2009. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling: *Journal of Hydrology*, v. 377, p. 80-91.
- Hino M. 1973. On-line prediction of hydrologic system. Proceedings of the 15th Congress of the International Association for Hydraulic Research, Istanbul.

Hosung A. 1994. Groundwater drought management by a feedforward control scheme. Water Resources Research. pp. 37.

Hosung A. 1995. Forecasting Management of Groundwater Drought Conditions in Collier County. Water Resources Evaluation Department. Palm Beach, Florida. U.S.A.

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, IMTA., Servicio Meteorológico Nacional, SMN. (2014). Extractor Rápido de Información Climática, ERIC III Versión 2.0. Kalman R. E. 1960. A new approach to linear filtering and prediction problems. Journal of Fluids Engineering 82(1): 35-45.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía, INEGI. (2014). Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0, CEM 3.0. Recuperado de: http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/continuo_elevaciones.aspx

Lee Y.H., and Singh V.P. 1998. Application of the Kalman Filter to the Nash Model. Hydrological Processes. 12(5): 755-767.

Liu Z., Valdés J.B., and Entekhabi D. 1997. Merged Forecasts of Drought Index Anomalies Along the Gulf Coast in the US Using Multiple Precursors. Experimental Long-Lead Forecast Bulletin, National Weather Service NCEP-CPC 6(2): 9–11.

Liu Z., Valdés J.B., and Entekhabi D. 1998. Merging and error analysis of regional hydrometeorological anomaly forecasts conditioned on climate precursors. *Water Resources Research*. 34(8): 1959-1969.

Matlab® R2015a. MathWorks, Inc.

Mishra A.K. and Desai V.R. 2005. Drought forecasting using stochastic models. *Stochastic Environmental Resources Risk Assessment*, 19:326-339.

Mishra A.K., Singh V.P. 2011. Drought modeling. A review. *Journal of Hydrology*. doi:10.1016/j.jhydrol.2011.03.049

Moriasi D.N., Arnold J.G., Van Liew M.W., Bingner R.L., Harmel R.D., Veith T.L. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Soil & Water Division of ASABE*, 50(3): 885-900.

Ramírez Á. S. 2003. El filtro de Kalman. Nota técnica. Banco Central de Costa Rica, División Económica, Departamento de Investigaciones Económicas. 33 pp.

Ravelo A., 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).

RStudio® Version 0.98.1102 – ©. RStudio, Inc.

- Saldarriaga J., and Yevjevich V. 1970. Application of run-lengths to hydrologic series. Hydrology Papers Colorado State University, Fort Collins, CO. 40. pp. 51.
- Servicio Meteorológico Nacional, SMN. (2014). Sistema de información climática computarizada CLICOM.
- Shun A.M. 2012. State Space Notation. A Review. Technical Note. pp. 4.
- Szollosi-Nagy A. 1976. An adaptive identification and prediction algorithm for the real-time forecasting of hydrological time series. Hydrological Sciences – Bulletin des Sciences Hydrologiques XXI, 1. pp. 14.
- Torrecillas, C. E., Miguel, A. J., y Ravelo, A., (2013). Proyecto de Coordinación, Seguimiento, Supervisión, Integración y Análisis del Programa de Medidas para Prevenir y Enfrentar la Sequía. Etapa 1 de 6: Programas de Medidas Preventivas y de Mitigación de la Sequía (PMPMS) en el Consejo de Cuenca Presidio al San Pedro. Región Hidrológica Administrativa III Pacífico Norte. Comisión Nacional del Agua Sinaloa. Preparado por la Universidad Autónoma de Sinaloa, Abril-Diciembre, 2013.
- Valdés J. B., Velázquez M. J. and Rodríguez-Iturbe I. 1980. Filtros de Kalman en la Hidrología: Predicción de descargas fluviales para la operación óptima de embalses. Informe Técnico No 80-2. Universidad Simón Bolívar, Decanato de estudios de Posgrado, Posgrado en Planificación e Ingeniería de Recursos Hídricos. Venezuela. 70 pp.

Welch, G. and Bishop, G. (2006) An Introduction to the Kalman Filter.
Department of Computer Science, University of North Carolina, Chapel
Hill, TR 95-041.

World Meteorological Organization (WMO). 2011. Guide to hydrological
practices. Sixth Edition. Geneva, Swiss. pp. 330.

Yevjevich V. 1967. An objective approach to definitions and investigations of
continental hydrologic droughts. Hydrology Papers Colorado State
University, Fort Collins, CO. 23. pp. 19.