

COORDINACIÓN DE HIDROLOGÍA

SUBCOORDINACIÓN DE HIDROLOGÍA Y MECÁNICA DE RÍOS

Informe final

ESTUDIO DE PERSISTENCIA DE LA SEQUÍA EN EL NORTE Y CENTRO DE MÉXICO

Proyecto TH1308.1

Responsable: Dr. Israel Velasco

Colaboradores: M. I. Alexis Cervantes Carretero

Dr. David Ortega Gaucin

Diciembre, 2013

SEMARNAT
SECRETARÍA DE
MEDIO AMBIENTE
Y RECURSOS NATURALES



IMTA
INSTITUTO MEXICANO
DE TECNOLOGÍA
DEL AGUA

CONTENIDO

Introducción	1
Antecedentes	5
Conceptos y enfoques de la proyección hidrológica a futuro	11
Modelo autorregresivo	14
Ejemplo: Un proceso AR(1)	14
Modelo de medias móviles	16
Modelo autorregresivo de media móvil	16
Índices de Estado (<i>I_e</i>)	16
Índice Hidrológico de Sequía (SDI)	22
Resultados	24
Conclusiones y recomendaciones	44
Referencias	46

CONTENIDO DE FIGURAS

Figura 1.- ONI (Oceanic Niño Index) histórico, calculado con periodos móviles de tres meses.	7
Figura 2.- Porcentaje del área del país afectada por sequía.....	7
Figura 3.- Monitor de Sequía para América del Norte, a diciembre de 2013	8
Figura 4.- Mapa de SPI a escala de tres meses, para octubre de 2012, y para el Consejo de Cuenca del Río Bravo.	9
Figura 5 .- Elementos para la definición del Índice de Estado, <i>I_e</i>	19
Figura 6 .- Clasificación convencional del Índice de Estado, en función de su valor adimensional.....	19
Figura 7.- Comportamiento histórico de las aportaciones anuales a la presa Lázaro Cárdenas.....	26
Figura 8.- Análisis de tendencia de las aportaciones anuales a la presa Lázaro Cárdenas, con un modelo lineal.....	27
Figura 9 .- Análisis de tendencia de las aportaciones anuales a la presa Lázaro Cárdenas, según el modelo de tendencia cuadrática.....	29

Figura 10 .- Régimen de aportaciones mensuales por escurrimiento a la presa Lázaro Cárdenas, periodo 1963-2011.....	30
Figura 11 .- Histograma de frecuencias de las aportaciones mensuales a la presa Lázaro Cárdenas.....	31
Figura 12 .- Valores registrados, con promedio móvil (3), y pronosticado para las aportaciones mensuales superficiales a la presa Lázaro Cárdenas.....	32
Figura 13.- Análisis de tendencia lineal de las aportaciones mensuales a la presa Lázaro Cárdenas.....	33
Figura 14.- Descomposición de la serie de tiempo para las aportaciones mensuales a la presa Lázaro Cárdenas.....	33
Figura 15.- Función de auto-correlación (total) para las aportaciones mensuales a la presa Lázaro Cárdenas.....	34
Figura 16.- Función de auto-correlación parcial para las aportaciones mensuales a la presa Lázaro Cárdenas.....	35
Figura 17.- Función de auto-correlación total para las aportaciones anuales a la presa Lázaro Cárdenas.....	35
Figura 18.- Función de autocorrelación parcial de las aportaciones anuales a la presa Lázaro Cárdenas.....	36
Figura 19 .- SDI para las aportaciones mensuales históricas a la presa Lázaro Cárdenas.....	37
Figura 20.- Expresión gráfica del índice de fluencia, I_f , para las aportaciones mensuales a la presa Lázaro Cárdenas.....	38
Figura 21.- Valores promedio anuales de almacenamiento histórico en la presa Lázaro Cárdenas.....	41
Figura 22 .- IEM para la presa Lázaro Cárdenas, en función de las aportaciones y almacenamientos mensuales históricos.....	42
Figura 23 .- Expresión gráfica del coeficiente de Hurst para aportaciones mensuales históricas 1963-2011 a la presa Lázaro Cárdenas.....	43

CONTENIDO DE TABLAS

Tabla 1.- Interpretación de los valores del SDI.....	23
Tabla 2.- Estadística hidrométrica histórica de aportaciones mensuales a la presa Lázaro Cárdenas (hm ³ /mes)	24
Tabla 3.- Valores resumidos de las aportaciones mensuales y anual de agua superficial a la presa Lázaro Cárdenas. La media general mensual es de 104.1 hm ³ , y la mediana general mensual es de 18.38 hm ³	30
Tabla 4.- Registro histórico de almacenamientos al día 1 de cada mes en la presa Lázaro Cárdenas; media general = mediana = 1,735.4 hm ³	38

Introducción

En general, puede aceptarse la idea de que la cantidad promedio de agua en el tiempo es sensiblemente constante, pero que sí presenta modificaciones y variaciones espaciales y temporales en cantidad y calidad; también, cada vez gana más credibilidad la certeza de que el cambio climático está influyendo sensiblemente en que esas variaciones sean cada vez más acusadas, más severas y más recurrentes.

Ante este panorama, los ecosistemas y las actividades humanas que dependen del agua, enfrentan diversos problemas de oportunidad y cantidad en la disponibilidad del recurso: por un lado, ante condiciones de súbita abundancia, como ocurre con los huracanes y lluvias intensas, atípicas, las avenidas ocasionan inundaciones y problemas de exceso, para las que la población –sobre todo en los centros urbanos– no está preparada, y en estas condiciones, las pérdidas materiales (y a veces también humanas), son de lamentarse por su alto costo social y económico; ambientalmente, también los daños son enormes, debido al arrastre y pérdida de suelo, por ausencia o deterioro de su cobertura vegetal, con lo cual se ocasionan deslaves de lodo, piedras y troncos, y la consecuente acumulación de estos materiales en las partes bajas: embalses, cauces de los ríos, zonas habitadas o de cultivo.

En el otro extremo, cuando las lluvias son menores a lo que históricamente se ha presentado, los escurrimientos disminuyen, así como las aportaciones a los embalses, los niveles de los acuíferos se abaten, los ecosistemas se deterioran paulatinamente, y los problemas derivados de la escasez de agua se magnifican: menor producción agrícola e industrial, más pobreza y marginación, la migración y el abandono del campo se incrementan, los cinturones de miseria en las ciudades aumentan y, en general, la inestabilidad social y el riesgo de colapso se acentúan, poniendo en peligro el desarrollo local y regional.

Cuando el agua es temporalmente insuficiente, por largos periodos y en cantidades tales que no alcanza para satisfacer los requerimientos productivos y de consumo, se produce la sequía socio-económica, siendo éste uno de los fenómenos más dramáticos en relación con el agua. Los sistemas de producción agropecuaria se vuelven eriales, y su recuperación puede tardar años después de que el fenómeno haya cesado. La falta de agua también ocasiona un severo deterioro de las condiciones naturales, flora y fauna, sobre todo la endémica, la que una vez que se pierde, prácticamente desaparece y no vuelve.

La sequía es un antecedente directo de la desertificación, fenómeno inducido que implica el deterioro y pérdida de suelo y de su capacidad productiva, ocasionado por la desaparición o alteración de la cobertura vegetal natural. La tala inmoderada, el sobrepastoreo, el cambio de uso del suelo son, entre otras causas, las más comunes en la desertificación, y si por escasez de agua no se propicia la recuperación natural, la pérdida de las condiciones naturales es prácticamente irreversible.

Este fenómeno, es tal vez el más notorio como efecto de la sequía en las zonas rurales, mientras que en las urbanas es más evidente el deterioro de las condiciones de vida de los habitantes: hacinamiento, falta de higiene, falta de servicios públicos, desempleo, carestía, pérdida de valores, etc.

La sequía es tanto más crítica en tanto más demanda de agua existe y menor es la oferta. De acuerdo con las ideas y evidencias de que el clima está alterándose por factores naturales y antropogénicos -el acelerado crecimiento demográfico y su correspondiente aumento industrial, agrícola, de servicios y demás, incrementando así la demanda-, esto conduce a un cada vez más frágil equilibrio en relación con la oferta, y cualquier alteración puede producir una situación de emergencia e incluso de crisis por falta de agua.

Aunque la sequía puede presentarse en cualquier parte y lugar del planeta, incluyendo las zonas húmedas tropicales, existen regiones que son particularmente propensas a padecer el fenómeno, es decir, que tienen un natural riesgo a que el fenómeno se presente; éstas son las llamadas franjas o zonas de alta presión atmosférica, que definen los grandes desiertos, en ambos hemisferios terrestres y, circunstancialmente, México tiene gran parte de su territorio en la franja de los grandes desiertos del Hemisferio Norte.

De esto deriva que alrededor de dos terceras partes del país tengan condiciones de aridez o semi aridez, así como de subhúmedas secas (UNESCO, 2010); de esto también deriva que buena parte del territorio nacional presente índices altos de desertificación y degradación ambiental.

Como fenómeno natural, la sequía tiene la característica de ser aún muy poco predecible, lo que dificulta enormemente su pronóstico; de hecho, actualmente se puede decir que es un fenómeno impronosticable, porque no es cíclico, aunque sí es recurrente. De aquí que la mejor estrategia para afrontar el embate y mitigar los impactos sea la prevención.

También de esto deriva que una parte importante de la prevención sea la formulación de *escenarios*: conjunto de circunstancias que se producirían si

ocurrieran determinadas condiciones hidrometeorológicas. Así, a partir de determinada condición de partida, actual, supuesta o esperada, y bajo un esquema probabilístico de ocurrencia de eventos meteorológicos esperados o posibles –básicamente la lluvia-, se forman los escenarios para vislumbrar el *qué pasaría si*, condicionado por los diversos factores concurrentes.

En el acontecer natural hidrometeorológico, la estimación de eventos futuros tiene un elevado nivel de incertidumbre, tanto más grande en cuanto más a futuro. Sin embargo, algunos de estos fenómenos –la lluvia y el escurrimiento superficial-, pueden mostrar un cierto nivel de persistencia, entendido el término como la continuación de condiciones iguales o similares o del mismo tipo, lo cual se puede tratar con algunas técnicas estadístico-matemáticas, para intentar estimar su comportamiento futuro.

Este trabajo –desarrollado como un proyecto interno del IMTA- incursiona sobre la estimación de la persistencia hidrológica, como un elemento de posible aplicación para apoyar la formulación de escenarios de sequía.

Objetivo y justificación

El objetivo principal de este proyecto se plantea como:

Estudiar bajo diversos enfoques (Hurst, índices de severidad, etc.) el fenómeno de la persistencia de las sequías, y hacer aplicación a series hidrometeorológicas en alguna cuenca del norte y centro de México.

Desde el enfoque cada vez más aceptado de que la prevención es lo más acertado para mitigar los efectos nocivos de la sequía, y a raíz de que la recurrencia del fenómeno es cada vez más alta, sus impactos sociales, económicos y ambientales más severos, y a la incertidumbre adicional consecuencia del cambio climático, el Gobierno Federal, a través de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), ha puesto el marcha el Programa Nacional Contra la Sequía (PRONACOSE), el cual tiene como objetivo generar los Programas de Medidas Preventivas y de Mitigación de la Sequía (PMPMS), que desarrollados a nivel de Consejo de Cuenca (CC, 26 en todo el país), permitan a autoridades y usuarios del agua disponer de una herramienta metodológica que establezca los procedimientos, estrategias y acciones tendientes al ahorro y uso eficiente del agua, bajo diferentes umbrales de escasez, determinados por indicadores adecuados, haciéndolo operativo por el CC, a través de un equipo de trabajo explícitamente dedicado a ello, el Grupo Técnico Directivo.

La imposibilidad actual de pronosticar con un nivel mínimo aceptable de confiabilidad lo que podría presentarse como lluvia –y por ende, como escurrimientos superficiales y recargas a los acuíferos– en los meses inmediatos, cuando se está en una situación de sequía, impulsa la necesidad de buscar y aplicar métodos de gestión que permitan dar más fundamento a los escenarios posibles, de manera que desde el enfoque de prevención, gobierno y sociedad puedan actuar acertadamente en la aplicación de las medidas y estrategias que propicien el ahorro de agua, su uso más eficiente, y con ello se mitiguen los efectos negativos del fenómeno, disminuyendo así la vulnerabilidad social, económica y del ambiente ante el embate de un fenómeno temporal pero potencialmente de alto impacto.

Antecedentes

Una de las particularidades más importantes de las sequías en cuanto a su potencial de daños es, además de sus características intrínsecas (intensidad, severidad, duración y extensión), su *persistencia*. La persistencia hidrológica se entiende como la continuación en el tiempo, de las condiciones actuales; en el caso de la sequía, persistencia significa que en los siguientes periodos se mantengan eventuales condiciones similares a la actual de déficit de agua. Sin embargo, la persistencia no ha sido estudiada con suficiente profundidad y por ello usualmente no se toma en cuenta en forma apropiada en los planes de preparación contra sequías (Velasco y Montesillo, 2007; Velasco *et al.* 2005).

Como fenómeno climático-meteorológico natural, que se puede presentar en cualquier tiempo y en cualquier lugar, la sequía no tiene ni principio ni fin fácilmente determinados; tampoco tiene una trayectoria ni epicentro definidos, es inevitable y asimismo no es actualmente pronosticable; además, es potencialmente catastrófica. Es un fenómeno tan complejo por la cantidad de factores interrelacionados que la causan, y tan variados los efectos que causa en los sistemas de uso del agua y en el ambiente, que no tiene una definición precisa, aplicable y aceptable a todos los casos.

Una de las muchas causas a las que se atribuye la sequía, y que se dice que contribuye con el 30% a su ocurrencia –entendido esta como la anomalía en la ocurrencia de la lluvia respecto a sus condiciones medias de largo plazo–, es *El Niño* (ENSO, El Niño South Oscillation), que es la perturbación recurrente o fenómeno meteorológico, erráticamente cíclico (ciclos entre tres y ocho años), que consiste en un cambio en los patrones de movimiento de las corrientes marinas en la zona intertropical, provocando una superposición de aguas cálidas procedentes de la zona del hemisferio norte inmediatamente al norte del ecuador sobre las aguas de emersión muy frías que caracterizan la corriente de Humboldt; esta situación provoca estragos a escala zonal (en la zona intertropical) debido a las intensas lluvias, afectando principalmente a América del Sur, tanto en las costas atlánticas como especialmente en las del Pacífico (Madl, 2000). Es un fenómeno explicado por el movimiento de rotación terrestre y, en consecuencia, por el desplazamiento de las mareas del hemisferio norte al hemisferio sur, siempre dentro de la zona intertropical, aunque su influencia es de carácter planetario.

La fase fría del ENSO (*La Niña*), se estima que produce baja en las lluvias en el sur y sureste de México, y aun aumento en el noreste; la fase cálida (*El Niño*), trae

consigo un significativo aumento de lluvia en el noroeste y norte del país, donde su ocurrencia causa grandes expectativas de abundancia de agua, sobre todo después de las severas y prolongadas sequías.

Uno de los parámetros más importantes, básicos para caracterizar la ocurrencia del ENSO es la temperatura de la superficie del mar (SST, sea surface temperature, en el Océano Pacífico, frente a las costas del Perú): la variación en la temperatura superficial del mar, que desde luego influye y es influida hacia las capas inferiores de agua, provoca aumento o disminución de la evaporación, mayor o menor humedad atmosférica y en consecuencia, mayor o menor lluvia en las partes continentales.

Así, el ONI (Oceanic Niño Index), es actualmente un índice estándar con el que la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) identifica los eventos cálidos y fríos del fenómeno, en el Pacífico tropical (ONI, 2014).

El ONI es el promedio móvil de tres meses de las anomalías en la SST para las regiones 3 y 4 de *El Niño*, localizadas entre los 5°N-5°S, y 120-170°W. Los eventos se definen como los 5 meses consecutivos con una anomalía igual o superior a 0.5°C para la fase cálida (*El Niño*), o 5 meses consecutivos con una anomalía menor o igual a -0.5°C para la fase fría (*La Niña*). Además, si la anomalía (en valores absolutos) va de 0.5 a 0.9, el evento es débil; si va de 1.0 a 1.5 es moderado; y si supera el valor de 1.5, es un evento fuerte; si la variación temporal se mantiene entre -0.5 y +0.5°C, se dice que es una fase neutra del fenómeno. También, para efectos ilustrativos, considerar no 5 sino 3 meses consecutivos con anomalías del mismo signo en la SST, ayuda a apreciar más objetivamente el comportamiento del ONI y en consecuencia, del ENSO. La Figura 1 muestra este comportamiento, actualizado al 5 de diciembre de 2013.

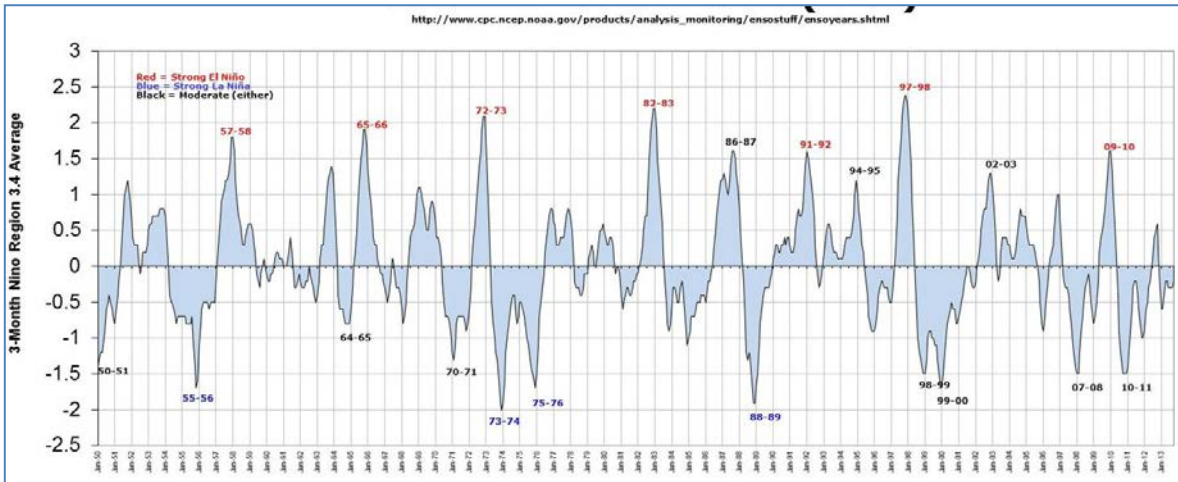


Figura 1.- ONI (Oceanic Niño Index) histórico, calculado con periodos móviles de tres meses (ONI, 2014).

Como se puede apreciar, las anomalías en la SST y por consecuencia en el ONI son recurrentes, aunque difícilmente se puede decir que sean cíclicas, y tampoco se evalúa una tendencia definida, paramétrica. En consecuencia, si el ENSO es uno de los factores determinantes de la sequía, y no tiene un patrón definido, entonces difícilmente puede esperarse que la sequía sí lo tenga.

Esto, para el caso de México, se puede apreciar en la información que procesa y genera el Servicio Meteorológico Nacional (SMN, CONAGUA, 2014), en relación a la evolución de la sequía a nivel país, y que según se muestra en la Figura 2, tampoco permite ver una tendencia definida.

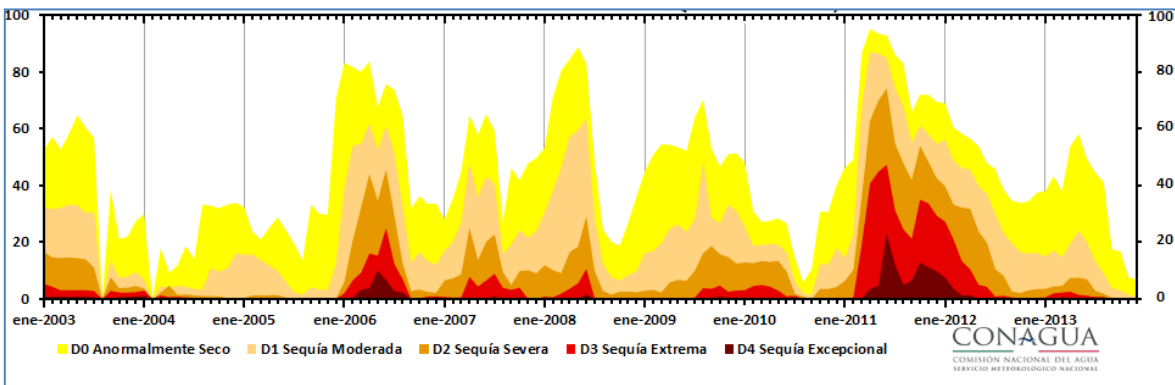


Figura 2.- Porcentaje del área del país afectada por sequía (CONAGUA, 2014)

Esta gráfica, que representa los últimos 13 años, y en donde destaca la sequía de 2011-2012, considerada la más severa de las últimas décadas, no tiene un patrón definido, para ninguno de los niveles de sequía ni para el total. Guarda una razonable coincidencia de los periodos de sequía con la ocurrencia de La Niña, aunque, como se ha mencionado, el ENSO no tiene la misma influencia o comportamiento en todo el país.

También, el SMN, en participación con las respectivas agencias meteorológicas de USA y Canadá, contribuye a la generación del Monitor de Sequía de América del Norte (NADM; CONAGUA, 2014), en el que mensualmente se genera un mapa del subcontinente, que muestra las condiciones espaciales, para el mes en cuestión, de las condiciones de sequía, evaluada con diversos índices correlacionados. La Figura 3 muestra lo que corresponde a diciembre de 2013.

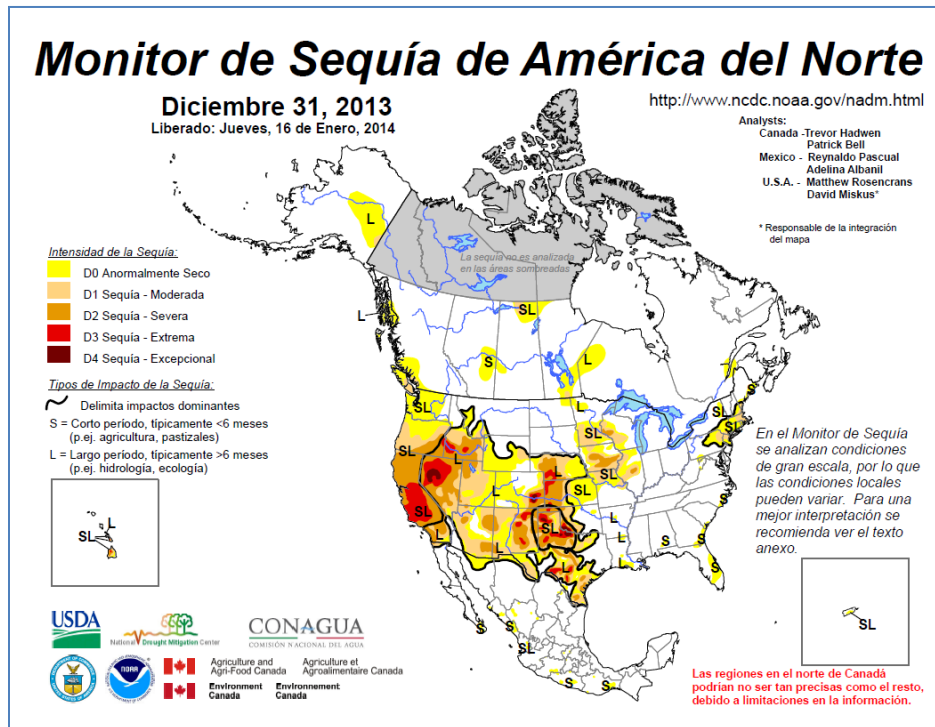


Figura 3.- Monitor de Sequía para América del Norte, a diciembre de 2013 (CONAGUA, 2014).

Como se aprecia de este mapa, en apariencia para diciembre de 2013 México tenía muy poca superficie en condiciones de sequía, si acaso unas pequeñas porciones al norte, en BC, Sonora y Chihuahua. No obstante, dada la escala a la que está elaborado este producto, en realidad es posible que, a menor escala, en condiciones locales, la presencia del fenómeno tenga otras características. Destaca en especial que la línea de sequía tiene una sensible concordancia con la

línea fronteriza entre México y USA. Esto puede deberse a que, efectivamente México no está experimentando en ese periodo problemas de sequía, y/o también a que la información de México, disponible para este reporte, no es suficiente para obtener resultados más precisos. En efecto, para un país de casi 2 millones de km², menos de 400 puntos de observación, que son los que aporta el SMN al proceso, pueden ser insuficientes para representar tanta superficie y tan variada en orografía, fisiografía, vegetación, etc.

También el SMN genera información para obtener mapas mensuales del índice SPI (Standardized Precipitation Index; Figura 4), a diversas escalas temporales, en los que es posible apreciar la presencia de la sequía según la variabilidad en la ocurrencia de la lluvia (única variable meteorológica requerida por el SPI). Este producto también es elaborado con la misma información de lluvia que México aporta al NADM.

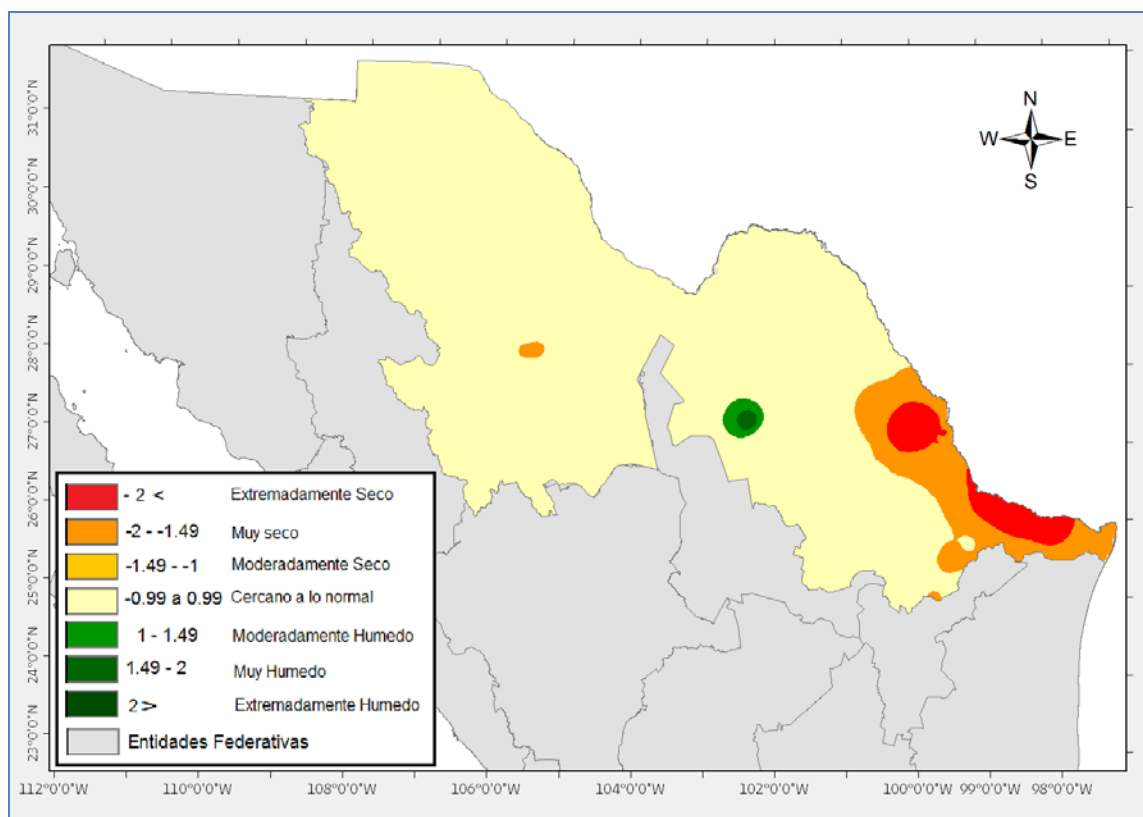


Figura 4.- Mapa de SPI a escala de tres meses, para octubre de 2012, y para el Consejo de Cuenca del Río Bravo. (Elaboración propia con información del SMN).

De estas dos fuentes -ONI y el NADM-, se hace notorio que, por un lado, el ENSO puede tener cierta persistencia, de donde se generan las fases débil, moderada o fuerte de *El Niño* (o *La Niña*), así como la prolongación en el tiempo y espacio de la sequía, también por efecto de la persistencia, pero también, para ambas fuentes, es complicado e incierto obtener una tendencia definida, que en su caso permitiría visualizar las posibles condiciones futuras.

Así entonces, este es uno de los problemas más antiguos y complejos de la sequía: que no se dispone aún de una herramienta capaz de modelarla para obtener proyecciones a futuro que sean confiables y de bajo o moderado nivel de incertidumbre. De aquí también que, como se ha mencionado, la prevención sea la estrategia más apropiada para afrontar su embate y mitigar los impactos.

Conceptos y enfoques de la proyección hidrológica a futuro

Los esfuerzos científicos y técnicos que se han hecho en aras de encontrar y modelar su comportamiento llegan a un punto en el que no ha sido posible avanzar y concluir. Su estudio se ha enfocado desde diferentes orientaciones: estadística, estocástica, hidrológica, etc., sin que se hayan obtenido resultados definitivos. Las apreciaciones retrospectivas del fenómeno confirman su carácter altamente aleatorio y elusivo, dado que, a pesar de que frecuentemente en forma coloquial se dice que es cíclica, en realidad no hay una ciclicidad clara, sino una alta recurrencia, que afecta más a unas regiones que a otras, haciéndolas más expuestas y vulnerables.

Por ende, su proyección hacia el futuro tiene un alto grado de incertidumbre, lo que hace más complicado el desarrollo de medidas para su atención. Esto significa que no se han encontrado funciones, ecuaciones o modelos que permitan caracterizarla de tal forma que su ocurrencia futura se pueda prever ni menos aún dimensionar.

Los trabajos e investigaciones pioneros en este tema se deben al ingeniero e hidrólogo británico H. E. Hurst, quien a mediados del siglo XX estudió la persistencia de diversas series de tiempo con datos geofísicos (Hurst, 1951; Loucks *et al.*, 1981; Kotegoda, 1980). Hurst enfocó su trabajo a un parámetro estadístico que él llamó “rango de desviaciones acumuladas respecto a la media”, que equivale al volumen de almacenamiento requerido en un embalse del cual, dada una serie de aportaciones, pueda extraerse cada año la aportación media.

Considérese una secuencia de flujos por escurrimiento superficial $\{q_1, \dots, q_n\}$; el valor medio de esta serie en el periodo n se denota por:

$$\bar{q}_n = \frac{1}{n} \sum_{y=1}^n q_y$$

La desviación acumulada de las aportaciones q_y respecto a la media en el periodo y es

$$S_y^n = \sum_{y^*}^y (q_{y^*} - \bar{q}_n)$$

En el último periodo, $S_y^n = 0$. El rango de las desviaciones acumuladas respecto a la media es

$$R_n = \max_y(S_y^n) - \min_y(S_y^n) = S_M^n - S_m^n$$

Donde S_M^n y S_m^n son los valores máximo y mínimo de las desviaciones del conjunto $\{S_y^n\}$.

Hurst encontró que el valor medio de R_n cambia en función de n y que el valor esperado de R_n dividido por la desviación estándar s_n de los n valores del flujo es proporcional a n elevado a un exponente H , decir:

$$E \left[\frac{R_n}{s_n} \right] \sim n^H$$

H es conocido como el exponente de Hurst, y para series persistentes, usualmente varía entre $0.69 \leq H \leq 0.80$. Asintóticamente, para variables aleatorias normales e independientes,

$$E[R_n] = \left(\frac{\pi}{2}\right)^{0.5} \sigma n^{0.5}$$

El valor empírico promedio de H es 0.73. Según Rodríguez (2012), si $H < 0.5$, la serie es anti-persistente (más volátil); si $H = 0.5$, la serie es aleatoria y tiene ruido blanco, es decir, tiene movimiento browniano; si $H > 0.5$, la serie es persistente, o sea, con memoria hidrológica. $[R_n/s_n]$ es el llamado rango re-escalado. El coef. H tiene diversas aplicaciones, entre ellas, el pronóstico de tendencias en series de tiempo. Si $H < 0.5$ se trata de una serie en la cual no hay memoria del pasado, es decir, es una serie antipersistente. Si $H > 0.5$ entonces la serie conserva memoria del pasado, y conforme se acerca a 1.0 sería una serie persistente con total dependencia de los valores previos, es decir, hay *tendencia*. Así, la estimación de H para un conjunto de datos proporciona una medida de si los datos siguen un camino aleatorio puro o si tienen tendencias subyacentes.

En la teoría de la probabilidad, se conoce como cadena de Markov o modelo de Markov a un tipo especial de proceso estocástico discreto en el que la probabilidad de que ocurra un evento depende del evento inmediatamente anterior. En efecto, las cadenas de este tipo tienen memoria: "recuerdan" el último evento y esto condiciona las posibilidades de los eventos futuros. Esta dependencia del evento anterior distingue a las cadenas de Markov de las series de eventos independientes, como tirar una moneda al aire o un dado. Reciben su nombre del matemático ruso Andréi Markov (1856-1922), que las introdujo en 1907. Estos modelos muestran una estructura de dependencia simple, pero muy útil en muchas aplicaciones.

Definición formal: en matemática se define como un proceso estocástico discreto que cumple con la propiedad de Markov, es decir, si se conoce la historia del sistema hasta su instante actual, su estado presente resume toda la información relevante para describir en probabilidad su estado futuro.

Una cadena de Markov es una secuencia X_1, X_2, X_3, \dots de variables aleatorias. El dominio de estas variables, es llamado espacio estado, el valor de X_n es el estado del proceso en el tiempo n . Si la distribución de probabilidad condicional de X_{n+1} en estados pasados es una función de X_n por sí sola, entonces:

$$P(X_{n+1} = x_{n+1} | X_n = x_n, X_{n-1} = x_{n-1}, \dots, X_2 = x_2, X_1 = x_1) = P(X_{n+1} = x_{n+1} | X_n = x_n)$$

Donde x_i es el estado del proceso en el instante i ; esta identidad es la propiedad de Markov.

La probabilidad de ir del estado i al estado j en n unidades de tiempo es

$$p_{ij}^{(n)} = \Pr(X_n = j | X_0 = i)$$

En la probabilidad de transición en un paso (una unidad de tiempo) se omite el superíndice de modo que

$$p_{ij} = \Pr(X_1 = j | X_0 = i)$$

Respecto a la recurrencia (propiedad de aquellas secuencias en las que cualquier término se puede calcular conociendo los precedentes; RAE, 2014), en una cadena de Markov con espacio de estados E , si $x \in E$, se define $L_x = P(X_n = x \text{ para algún } n \in N | X_0 = x)$, y se dice que:

x es estado recurrente si $L_x = 1$

x es transitorio si $L_x < 1$

x es absorbente si $p_{x,x} = 1$

En estadística, los **modelos autorregresivos de media móvil** (en inglés *AutoRegressive Moving Average models*, abreviados **ARMA**), también llamados *Modelos Box-Jenkins*, se aplican a series temporales de datos.

Dada una serie temporal de datos X_t , el modelo ARMA es una herramienta para entender y, aún más, para **predecir** futuros valores de la serie. El modelo está formado por dos partes, una parte autorregresiva (AR) y otra de media móvil (MA). El modelo se conoce con el nombre de modelo ARMA (p, q), donde p es el orden de la parte autorregresiva y q es el orden de la parte de media móvil.

Modelo autorregresivo

La notación $AR(p)$ se refiere a un modelo autorregresivo de orden p . Un modelo $AR(p)$ puede escribirse como:

$$X_t = c + \sum_{i=1}^p \phi_i X_{t-i} + \varepsilon_t$$

donde ϕ_1, \dots, ϕ_p son los parámetros del modelo, c es una constante y ε_t es un término de error. Muchos autores omiten el término constante, para fines de simplificación.

Un modelo autorregresivo es esencialmente un filtro de respuesta infinita al impulso IIR, con determinada interpretación adicional.

Se debe tener en cuenta que es necesario imponer ciertas restricciones a los valores de los parámetros de este modelo para que funcione correctamente (proceso estacionario). Por ejemplo, en un modelo $AR(1)$, si $|\phi_1| > 1$ el modelo no tendrá un buen comportamiento.

Ejemplo: Un proceso $AR(1)$

Un proceso $AR(1)$ está dado por:

$$X_t = c + \phi X_{t-1} + \varepsilon_t$$

Donde ε_t es un proceso de ruido blanco con media cero y varianza σ^2 . (el subíndice en ϕ_1 se omitió.) El proceso es de covarianza estacionaria si $|\phi| < 1$. Si $\phi=1$, entonces X_t tiene una raíz unitaria. El cálculo de la esperanza de X_t es directo. Asumiendo la covarianza estacionaria, se tiene:

$$E(X_t) = E(c) + \phi E(X_{t-1}) + E(\varepsilon_t) \rightarrow \mu = c + \phi \mu + 0$$

entonces:

$$\mu = \frac{c}{1 - \phi}$$

Donde μ es la media. La varianza es:

$$var(X_t) = E(X_t^2) - \mu^2 = \frac{\sigma^2}{1 - \phi^2}$$

La función de autocorrelación viene dada por:

$$B_n = E(X_{t+n}X_t - \mu^2) = \frac{\sigma^2}{1 - \phi^2} \phi^{|n|}$$

Se puede ver que la función de autocorrelación decrece con un intervalo de decrecimiento de $\tau = -1/\ln(\phi)$.

La función de densidad espectral es la transformada de Fourier de la función de autocorrelación. En términos discretos, ésta sería la transformada de Fourier de tiempo discreto:

$$\Phi(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sum_{n=-\infty}^{\infty} B_n e^{-i\omega n} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \left(\frac{\sigma^2}{1 + \phi^2 - 2\phi \cos(\omega)} \right)$$

Esta expresión contiene aliasing debido a la naturaleza discreta de X_j . Si se asume que el intervalo de la muestra es mucho menor que el intervalo de decrecimiento ($\tau \ll 1$), entonces se puede utilizar una aproximación continua a B_n :

$$B(t) \approx \frac{\sigma^2}{1 - \phi^2} \phi^{|t|}$$

que da un perfil Lorentzian para la densidad espectral:

$$\Phi(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{\sigma^2}{1 - \phi^2} \frac{\gamma}{\pi(\gamma^2 + \omega^2)}$$

donde $\gamma = 1/\tau$ es la frecuencia angular asociada con el intervalo de decrecimiento τ .

Una expresión alternativa para X_t se puede obtener substituyendo primero $c + \phi X_{t-2} + \varepsilon_{t-1}$ por X_{t-1} en la ecuación de definición.

Continuando este proceso N veces, se obtiene:

$$X_t = c \sum_{k=0}^{N-1} \phi^k + \phi^k X_{t-N} + \sum_{k=0}^{N-1} \phi^k \varepsilon_{t-k}$$

Cuando N tiende a infinito, ϕ^k tiende a cero y:

$$X_t = \frac{c}{1 - \phi} + \sum_{k=0}^{\infty} \phi^k \varepsilon_{t-k}$$

Véase que X_t es ruido blanco convolucionado con ϕ^k más la constante de la media. Por el teorema del límite central, X_t será distribuido normalmente como cualquier muestra de X_t , que es más grande que el intervalo de decrecimiento de la función de autocorrelación.

Modelo de medias móviles

La notación MA(q) se refiere a un modelo de media móvil de orden q .

$$X_t = \varepsilon_t + \sum_{i=1}^q \theta_i \varepsilon_{t-i}$$

donde $\theta_1, \dots, \theta_q$ son los parámetros del modelo y $\varepsilon_t, \varepsilon_{t-1}, \dots$ son, de nuevo, los términos de error.

Un modelo de medias móviles es esencialmente un filtro de respuesta finita al impulso FIR, con cierta interpretación adicional.

Modelo autorregresivo de media móvil

La notación ARMA(p, q) se refiere a un modelo con p términos autorregresivos y q términos de media móvil. Este modelo combina los modelos AR e MA:

$$X_t = \varepsilon_t + \sum_{i=1}^p \phi_i X_{t-i} + \sum_{i=1}^q \theta_i \varepsilon_{t-i}$$

La dependencia de X_t de valores pasados y en los términos de error ε_t se asume que es lineal, salvo que se especifique lo contrario. Si la dependencia no es lineal, entonces el modelo se llama específicamente *modelo de media móvil no lineal (NMA)*, *modelo autorregresivo no lineal (NAR)* o *modelo autorregresivo de media móvil no lineal (NARMA)*.

Índices de Estado (I_e)

En los sistemas de uso del agua que tienen una fuente de abastecimiento más segura, como son los embalses y/o los acuíferos, a pesar de la relativa seguridad de la disponibilidad de agua, también debe tenerse en cuenta que si el agua disponible no es suficiente, se tendrán problemas de demanda no satisfecha. No obstante, en estos casos es más plausible planear para que los posibles estragos del déficit sean menos severos y de alguna manera se puedan mitigar los efectos nocivos.

Los indicadores a emplear en cada sistema hidrológico de uso del agua dependen de las características del mismo y de los datos disponibles en cada uno de ellos. Para la selección y aplicación de indicadores se debe tener en cuenta la disponibilidad, oportunidad y agilidad de actualización de los datos, así como su

calidad, que condiciona la periodicidad de los informes de estado. Por ello, se han considerado como posibles indicadores los siguientes, para el caso de las presas de almacenamiento: capacidad de almacenamiento de los embalses, ingresos de agua a los embalses (aportaciones), estaciones de aforo y pluviométricas.

Por la escasez de datos referentes a los niveles de las aguas subterráneas, y por la diferente dinámica con que el agua se mueve en el subsuelo, es probable que la evolución de los acuíferos como indicador representativo de la evolución de la cuenca no sea lo más adecuado, aunque tampoco debe subestimarse, puesto que debidamente correlacionados, y tomando en cuenta el amplio desfase en tiempo, también aporte información valiosa. Con el fin de hacer comparables los datos recogidos en diferentes sistemas de explotación o uso del agua, se establece el *índice de estado*, que tomando los valores medios, máximos y mínimos del indicador elegido en cada caso, transforma la medición en un valor *adimensional modular* que varía entre 0 y 1.

Relacionando este indicador al fenómeno de la sequía, en términos de las condiciones actuales de la fuente de suministro, y con el sentido de prevención y preparación a los usos del agua en el periodo que inicia, considerando un posible déficit o demanda no suministrada, y también la probabilidad de que esas condiciones deficitarias se prolonguen en el tiempo, los diferentes niveles de sequía se clasifican de la siguiente manera:

- *Estado de normalidad*: implica que los indicadores de sequía están por encima de los valores medios registrados en las series históricas de los indicadores.
- *Estado de prealerta*: se activa cuando los indicadores descienden por debajo de los valores medios históricos, por lo que es conveniente extremar el control.
- *Estado de alerta*: se activa cuando es necesario poner en marcha medidas de conservación del recurso y de gestión de la demanda que permitan su mantenimiento con aplicación de las medidas de ahorro pertinentes.
- *Estado de emergencia*: se activa cuando es ineludible la aplicación de medidas extraordinarias.

De acuerdo con la experiencia española –y en complemento al SDI, otro índice de sequía–, a partir de la zonificación en sistemas de explotación, para cada uno de los indicadores se proponen cuatro niveles de alerta de sequía, estableciéndose éstos en función del denominado “Índice de Estado *le*”, teniendo en cuenta que (Ministerio de Medio Ambiente, 2005):

- La media aritmética es uno de los estadísticos más robustos, a la vez que más sencillos, por lo que una comparación del dato del indicador con la media de la serie histórica, se ajustará más convenientemente, en principio, a la situación real de la zona de sequía seleccionada, si bien, deben tenerse en cuenta también los valores máximos y mínimos históricos, tal y como queda reflejado en las fórmulas del *le*.
- La conveniencia de homogeneizar los indicadores en un valor numérico adimensional capaz de cuantificar la situación actual respecto de la histórica, y posibilitar una comparación cuantitativa entre los distintos indicadores seleccionados; por ello se adopta una fórmula en la que se define el Índice de Estado (*le*) cuyos valores fluctúan en un rango comprendido entre 0 (correspondiente al mínimo valor histórico) y 1 (correspondiente al máximo valor histórico).

La expresión del Índice de Estado *le* es la siguiente:

$$\text{Si } V_i \geq V_{med}: I_e = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{V_i - V_{med}}{V_{max} - V_{med}} \right]$$

$$\text{Si } V_i < V_{med}: I_e = \frac{1}{2} \left[\frac{V_i - V_{min}}{V_{med} - V_{min}} \right]$$

siendo:

V_i : Valor de la medida obtenida en el mes de seguimiento

V_{med} : Valor medio en el periodo histórico

V_{max} : Valor máximo en el periodo histórico

V_{min} : Valor mínimo en el periodo histórico

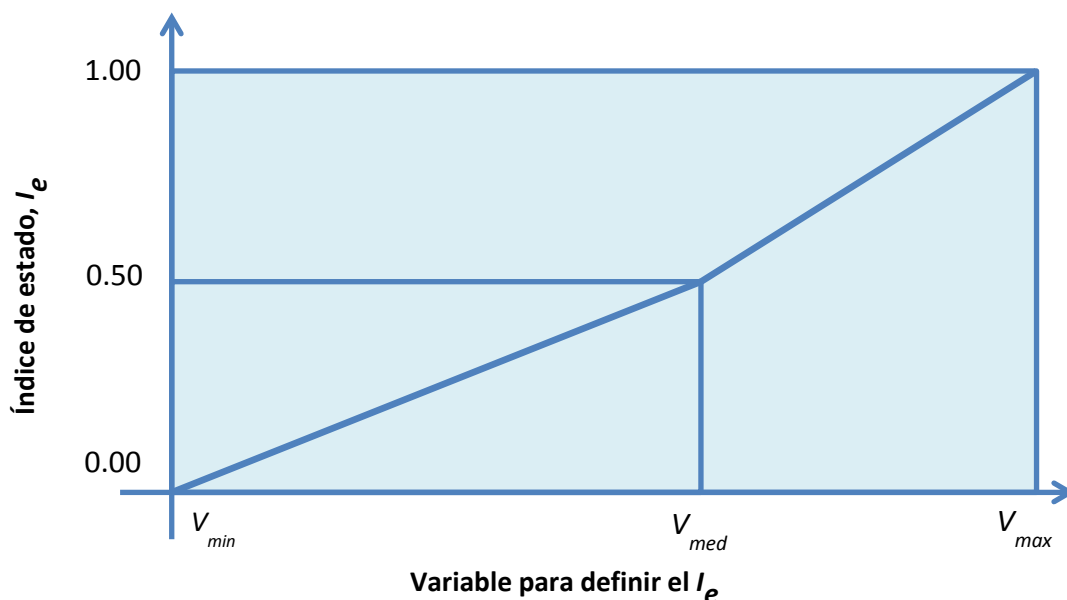


Figura 5.- Elementos para la definición del Índice de Estado, I_e .

Tal como se desprende de la Figura 5 y Figura 6, cuando el valor de la medida V_i está comprendido entre la media de la serie y su valor máximo, el índice dará una cifra que oscilará entre 0.5 y 1, mientras que en el caso de que la medida V_i sea inferior al valor medio, lo hará entre 0 y 0.5.

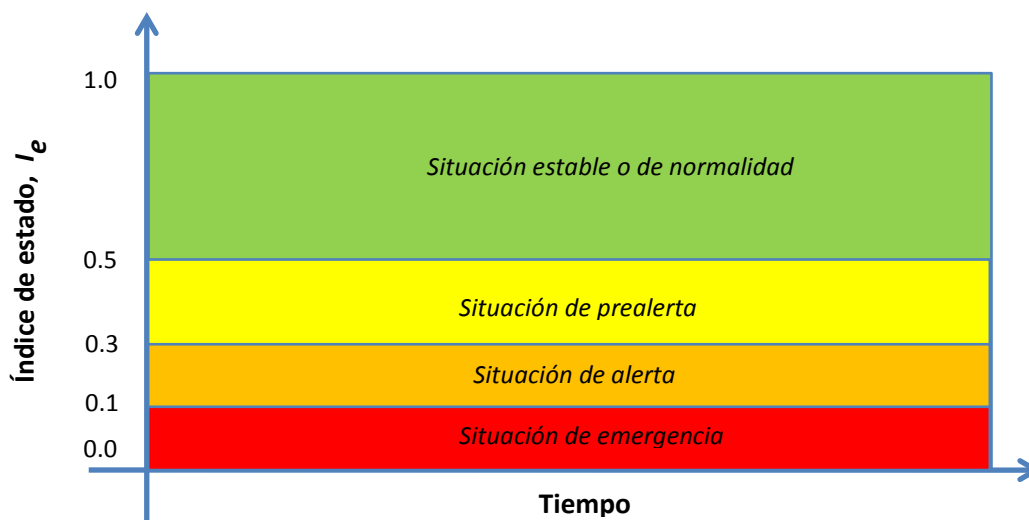


Figura 6.- Clasificación convencional del Índice de Estado, en función de su valor adimensional.

El rango de valores del I_e , que como se ha señalado, va de 0 a 1, se discretiza convencionalmente, en principio, a efectos de diagnóstico de la situación de sequía, en los cuatro niveles siguientes:

- $I_e > 0.5$ nivel verde (situación estable o de normalidad)
- $0.5 > I_e > 0.3$ nivel amarillo (situación de prealerta)
- $0.3 > I_e > 0.15$ nivel naranja (situación de alerta)
- $0.15 > I_e$ nivel rojo (situación de emergencia)

La sequía hidrológica es la disminución en las disponibilidades de aguas superficiales y subterráneas en un sistema de gestión durante un plazo temporal dado respecto a los valores medios, que puede impedir cubrir las demandas de agua al cien por ciento. La sequía hidrológica puede demorarse durante meses o incluso años desde el inicio de la escasez pluviométrica (sequía meteorológica) o, si las lluvias retornan en poco tiempo, no llegar a manifestarse debido a la capacidad de regulación natural y artificial de la cuenca, es decir, de la capacidad de gestión de los recursos hídricos, que hace que la sequía hidrológica no dependa exclusivamente de los caudales de escurrimiento en ríos y manantiales, sino también del volumen de agua almacenado en los embalses y acuíferos, es decir, de la manera en que se gestionen estas reservas. De ahí su definición vinculada al sistema de gestión.

El estudio de la sequía hidrológica tiene por finalidad determinar las pautas de comportamiento de la disponibilidad de agua en sequía (duración, intensidad, recurrencia, distribución, modo de aparición y finalización, desfase con la sequía meteorológica, grado de regulación natural y artificial, evolución de la disponibilidad de agua, evaluación de la serie histórica deficitaria, etc.).

En función de los datos disponibles para cada sistema se calcula el I_e . Para ello se toman como valores medios, máximos y mínimos los resultantes del estudio de los recursos fluyentes (escurrimientos) en el caso de los sistemas no regulados, o los resultantes de los niveles y aportaciones a los embalses si el sistema es regulado. Si el sistema depende tanto de recursos regulados como de no regulados, o cuando dependiendo de recursos regulados, sea necesario distinguir entre volumen de embalse y aportaciones al mismo, se construirá un índice mixto que ponderará ambos componentes.

Así, con el fin de conocer el I_e de un sistema no regulado, se utilizan los valores de las aportaciones en la estación de aforos que haya sido seleccionada como representativa del sistema.

En el caso de sistemas regulados, el estudio de la sequía hidrológica, se realiza a partir de los datos recogidos en el embalse o embalses que caracterizan la cuenca, partiendo de los datos de nivel de embalse al inicio de cada mes, para obtener de ahí el *índice de embalse*, I_{emb} , y con los valores de aportación mensual, obtener el respectivo *índice de escurrimiento* (I_f), procediendo a determinar los valores medio, máximo y mínimo que definan el I_e mixto o compuesto de todo el sistema de suministro de agua.

Como se ha mencionado, en el caso de un sistema dependiente del volumen y la aportación al embalse, el indicador final se compone de las dos variables, las aportaciones al embalse, a partir de las cuales se obtiene el Índice de escurrimiento (I_f), y el volumen de agua embalsada al inicio de cada mes, del que se obtiene el Índice de embalse (I_{emb}). El indicador final es, por tanto, un índice mixto (Índice de estado mixto, I_{EM}), vinculado a la aportación media anual del embalse (A_m):

$$\text{Índice de estado mixto} = I_{EM} = [I_{emb} * (\frac{1}{2} * \frac{V_{util}}{A_m})] + [I_f * (1 - (\frac{1}{2} * \frac{V_{util}}{A_m}))]$$

El índice de escurrimiento, I_f , es un índice de estado que se calcula, teniendo en cuenta las aportaciones mensuales al embalse. En cuanto al índice de embalse, I_{emb} , es un índice de estado que se calcula teniendo en cuenta el nivel del embalse al inicio de cada mes.

En el caso en que el sistema se caracterice por la aportación de una estación de aforo determinada y el volumen de un embalse, el índice de estado mixto se calcula de forma similar a lo explicado, pasando el índice de escurrimiento a determinarse a partir de las aportaciones registradas mensualmente en la estación de aforos considerada para el sistema en estudio.

De esta forma, para un sistema hidráulico-hidrológico de uso del agua, donde la fuente de suministro es un embalse o sistema de embalses alimentados por corrientes superficiales, la determinación para cada uno de los embalses del I_{EM} , aportará elementos comparables y dimensionalmente homogéneos, que ayudarán al análisis global del sistema y a la planeación de los volúmenes a asignar para los diversos usos demandantes, en función de la situación actual de esas fuentes de suministro, que a su vez reflejarán tanto el acontecer natural, dado por las lluvias y el escurrimiento, como los resultados del manejo y gestión inmediatamente previas, dado por los volúmenes disponibles.

Particularmente útil es este I_{EM} , por el hecho de que conjunta los dos factores básicos en el funcionamiento de un embalse: las aportaciones naturales por escurrimiento (I_f), y la operación del embalse (I_{emb}), las extracciones, reflejadas en los volúmenes almacenados mensuales. Así, como es sabido, una sequía, además

de deberse a la baja en la lluvia y el escurrimiento, frecuentemente se acentúa si no se hace una buena gestión de lo disponible; es decir, frecuentemente los conflictos por escasez de agua tienen una alta incidencia debido a la deficiente gestión del agua. Por ende, el cálculo, seguimiento y evaluación de este índice, permite tener una buena aproximación a la estimación del comportamiento del embalse, en donde destaca el aspecto operativo: si las políticas de operación han sido eficientes, puede esperarse que continuándolas se pueda mitigar el impacto de la sequía; si no han sido adecuadas, habrá que revisarlas, evaluarlas y en su caso corregirlas.

Índice Hidrológico de Sequía (SDI)

Este índice fue desarrollado por Nalbantis y Tsakiris (2009) con el propósito de determinar a través del tiempo el déficit de caudales (escurrimientos) para una corriente y en un período de tiempo dado. De acuerdo con su metodología, la relación de sequía entre cuatro aspectos, severidad-duración-frecuencia-área, se reduce a solo dos, severidad contra frecuencia.

A partir de una serie de tiempo de volúmenes de escurrimiento mensuales Q_{ij} disponibles donde i denota el año hidrológico y j el mes dentro de este, se tiene que:

$$V_{i,k} = \sum_j^{3k} Q_{i,j} \quad (1)$$

$$i = 1, 2, 3, \dots \quad j = 1, 2, \dots, 12 \quad k = 1, 2, 3, 4$$

donde $V_{i,k}$ es el volumen de escurrimiento acumulado para el i -ésimo año hidrológico y el k -ésimo periodo de referencia.

Con base en el volumen de escurrimiento acumulado $V_{i,k}$, el SDI es definido por cada periodo de referencia k de un i -ésimo año hidrológico como se muestra:

$$SDI_{i,k} = \frac{V_{i,j} - \bar{V}_k}{S_k} \quad (2)$$

$$i = 1, 2, 3, 4$$

donde \bar{V}_k es la media y S_k la desviación estándar de los volúmenes de escurrimiento acumulados del periodo de referencia k , tal como los estimados en un periodo largo de tiempo.

Al utilizar el logaritmo natural para una normalización sencilla, el índice SDI se define como:

$$SDI_{i,k} = \frac{y_{i,j} - \bar{y}_k}{S_{y,k}} \quad (3)$$

$$i = 1, 2, 3 \dots \quad k = 1, 2, 3, 4$$

donde:

$$y_{i,k} = \ln(V_{i,k}) \quad (4)$$

$$i = 1, 2, 3 \dots \quad k = 1, 2, 3, 4$$

Y $y_{i,k}$ son los logaritmos naturales de escurrimiento acumulado con media \bar{V}_k y desviación estándar $S_{y,k}$.

En similitud al SPI para la obtención del índice de sequía meteorológica, la clasificación por categorías del SDI se muestra en la Tabla 1 siguiente.

Tabla 1.- Interpretación de los valores del SDI

Estado	Valor del SDI	Interpretación	Probabilidad (%)
0	$SDI \geq 0$	Sin sequía	50.5
1	$-1.0 \leq SDI < 0.0$	Sequía ligera	34.1
2	$-1.5 \leq SDI < -1.0$	Sequía moderada	9.2
3	$-2.0 \leq SDI < -1.5$	Sequía severa	4.4
4	$SDI < -2.0$	Sequía extrema	2.3

La obtención del SDI es más simple que el SPI; una de las razones es que el escurrimiento superficial tiene un carácter más definido –estadísticamente– que la lluvia, pues tiende a tener “memoria hidrológica” o auto dependencia de los eventos en el tiempo, y por ello la normalización simple es suficiente, y su transformación logarítmica. En cambio, el SPI, dado el carácter errático de la lluvia y su carácter de eventos independientes escasamente correlacionados, hace necesaria una transformación previa de la información a la *pdf* Gamma incompleta, y luego ésta a la normal estándar.

Resultados

A efecto hacer la aplicación de algunos de los conceptos aquí presentados, se consideran los datos hidrométricos de la presa Lázaro Cárdenas (El Palmito), embalse artificial ubicado sobre el río Nazas, y que se destina a controlar y almacenar los escurrimientos de dicha corriente, para su uso en la agricultura del Distrito de Riego 017: Región Lagunera. La estadística hidrométrica de aportaciones históricas se presenta en la Tabla 2:

Tabla 2.- Estadística hidrométrica histórica de aportaciones mensuales a la presa Lázaro Cárdenas (hm³/mes)

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	SUMA
1963	7.3	6.0	5.1	5.8	7.2	37.4	92.6	282.7	327.2	100.9	13.9	295.4	1181.6
1964	16.4	10.1	13.1	11.6	12.4	60.1	62.3	254.2	493.6	130.3	14.0	9.2	1087.4
1965	8.8	12.1	10.6	19.6	14.7	25.6	34.3	74.1	191.0	32.4	13.0	53.8	489.9
1966	24.0	17.7	11.7	13.0	11.9	22.4	23.3	676.1	874.2	81.1	11.0	7.9	1774.3
1967	8.4	7.7	20.1	9.8	5.7	48.5	240.3	616.4	603.2	63.9	11.7	32.1	1667.8
1968	8.2	46.6	120.2	57.3	25.5	46.3	508.9	404.9	1950.0	118.3	17.0	13.8	3316.9
1969	57.7	11.8	18.8	36.0	22.7	33.4	113.8	59.6	83.0	54.3	11.5	18.9	521.3
1970	38.0	21.6	46.8	39.6	37.1	65.4	132.8	238.2	575.1	157.3	15.9	14.3	1382.0
1971	12.0	9.4	61.9	18.4	27.2	83.3	120.1	473.7	140.8	175.8	20.5	15.9	1158.9
1972	29.8	11.9	35.0	23.6	30.5	80.9	150.7	184.4	247.6	98.3	120.2	26.1	1038.9
1973	14.0	43.3	77.2	18.4	25.7	75.9	205.7	1623.0	694.8	53.9	13.9	10.7	2856.4
1974	11.5	8.2	9.9	10.3	25.2	58.3	77.4	217.4	575.0	96.8	39.3	111.7	1241.0
1975	34.5	15.9	15.5	12.0	46.3	35.5	127.9	303.4	169.1	17.4	11.2	11.8	800.5
1976	11.8	10.9	22.6	14.5	7.7	49.8	834.6	174.3	414.5	99.6	51.4	32.0	1723.7
1977	53.1	25.0	12.5	13.5	7.7	65.6	128.3	96.4	198.9	18.2	11.9	9.3	640.4
1978	7.8	8.5	8.4	9.2	7.0	13.2	73.6	205.6	1302.6	205.9	13.0	13.3	1868.0
1979	62.0	98.6	8.6	4.2	4.7	48.8	9.3	484.3	39.2	11.9	8.3	5.8	785.6
1980	4.6	3.7	3.8	0.7	2.8	0.0	11.7	211.0	669.9	183.5	28.2	18.6	1138.5
1981	24.5	13.2	30.6	15.4	4.2	6.8	28.1	506.4	620.5	586.2	22.4	7.9	1866.0
1982	7.7	4.5	16.4	6.6	6.8	0.0	45.8	51.8	51.4	10.4	10.7	29.5	241.5
1983	18.9	21.6	33.2	7.2	0.1	0.1	0.2	283.3	241.3	131.6	22.7	15.2	775.3
1984	12.5	39.9	0.0	11.0	4.5	145.8	796.0	478.4	100.1	33.9	8.8	41.3	1672.2

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	SUMA
1985	124.9	19.4	6.8	13.9	6.4	26.9	100.3	158.0	203.3	70.0	3.3	2.1	735.2
1986	4.3	3.1	2.9	7.7	2.3	38.0	434.4	253.9	1044.9	209.8	16.6	26.5	2044.3
1987	4.5	2.0	2.6	8.0	5.8	7.3	244.2	546.8	332.4	98.3	1.5	25.0	1278.4
1988	6.6	2.0	14.1	7.7	0.0	23.5	667.2	550.5	145.5	8.4	2.1	10.4	1438.1
1989	4.1	2.4	1.4	10.0	0.1	0.3	2.1	275.9	317.1	27.0	65.6	67.6	773.4
1990	39.0	8.0	5.5	14.5	1.3	0.1	273.8	1030.1	371.7	377.0	4.4	2.7	2128.0
1991	5.0	2.7	10.2	2.8	2.6	6.9	751.0	1041.6	1306.2	123.5	41.4	193.8	3487.8
1992	531.5	190.9	19.9	10.6	14.7	2.3	20.1	133.4	89.9	9.4	5.4	6.3	1034.3
1993	5.1	3.3	0.9	7.8	0.0	30.6	247.6	48.2	1156.0	60.0	19.5	4.0	1583.0
1994	3.9	2.9	2.4	10.1	0.2	4.3	20.2	16.2	57.4	34.5	5.2	5.2	162.5
1995	3.8	3.9	1.0	9.2	1.4	5.9	43.6	70.1	174.5	16.5	5.1	4.6	339.4
1996	6.9	0.6	6.2	1.2	4.6	23.5	86.8	559.0	765.0	193.1	11.1	9.1	1667.0
1997	11.6	12.4	10.7	56.3	14.7	15.1	110.4	164.0	78.2	18.1	14.4	6.6	512.5
1998	10.4	7.1	11.8	7.3	3.2	9.4	29.5	205.6	49.7	33.7	13.0	7.4	388.2
1999	7.3	4.8	6.3	5.0	6.6	90.4	412.7	186.8	92.8	10.2	6.1	4.7	833.6
2000	6.1	6.2	2.9	12.7	3.0	79.3	156.4	48.8	107.6	147.1	26.9	12.5	609.5
2001	7.9	6.1	9.1	10.7	3.6	1.6	147.8	170.8	40.3	10.3	6.6	5.7	420.3
2002	7.0	6.8	8.2	4.7	10.7	17.6	102.5	332.4	62.0	13.5	7.8	11.9	585.0
2003	9.2	13.3	6.5	10.8	5.5	25.9	209.7	119.2	458.3	99.5	13.9	2.2	974.1
2004	27.6	13.3	19.6	15.0	6.8	13.3	72.8	337.1	486.7	67.7	106.6	22.0	1188.5
2005	7.7	31.0	9.3	14.2	2.3	4.3	136.1	388.1	70.0	12.3	6.2	3.9	685.3
2006	1.4	7.3	7.4	13.6	10.7	56.3	388.3	722.1	788.6	42.8	11.1	7.7	2057.2
2007	35.5	9.5	19.6	6.8	9.4	21.2	117.1	186.6	177.8	80.7	7.4	6.5	678.1
2008	6.1	7.2	19.9	8.2	4.8	19.7	279.7	923.2	1711.1	294.2	20.5	2.7	3297.3
2009	9.2	8.0	17.1	12.9	11.9	27.4	71.4	148.2	452.3	187.5	16.6	2.8	965.0
2010	8.1	11.5	22.8	24.8	14.6	25.8	738.8	255.9	603.8	111.9	11.6	12.4	1841.8
2011	9.5	11.0	26.9	20.8	17.3	21.4	50.7	39.3	24.5	9.8	6.0	9.0	246.0
PROMEDIO	28.1	17.2	17.4	14.0	10.2	32.7	198.6	343.1	443.5	98.5	19.3	25.9	1248.6
MAXIMO	531.5	190.9	120.2	57.3	46.3	145.8	834.6	1623.0	1950.0	586.2	120.2	295.4	3487.8
MINIMO	1.4	0.6	0.0	0.7	0.0	0.0	0.2	16.2	24.5	8.4	1.5	2.1	162.5
RANGO	530.1	190.3	120.2	56.6	46.3	145.8	834.4	1606.8	1925.5	577.7	118.7	293.3	3325.3

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	SUMA
DESV EST	76.4	30.0	21.2	11.6	10.3	30.4	223.8	312.2	446.4	106.7	23.2	50.5	803.8
ASIMETRIA	6.2	4.6	3.1	2.4	1.6	1.4	1.7	2.0	1.6	2.5	3.1	4.2	1.1
MEDIANA	9.2	9.4	10.7	10.8	6.8	25.6	117.1	253.9	317.1	70.0	13.0	10.7	1087.4
MODA	#N/A	2.0	#N/A	#N/A	0.0	0.0	#N/A	205.6	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A

Una primera aproximación para estimar su comportamiento en el tiempo es la visualización de los valores anuales, lo que se presenta en la Figura 7.

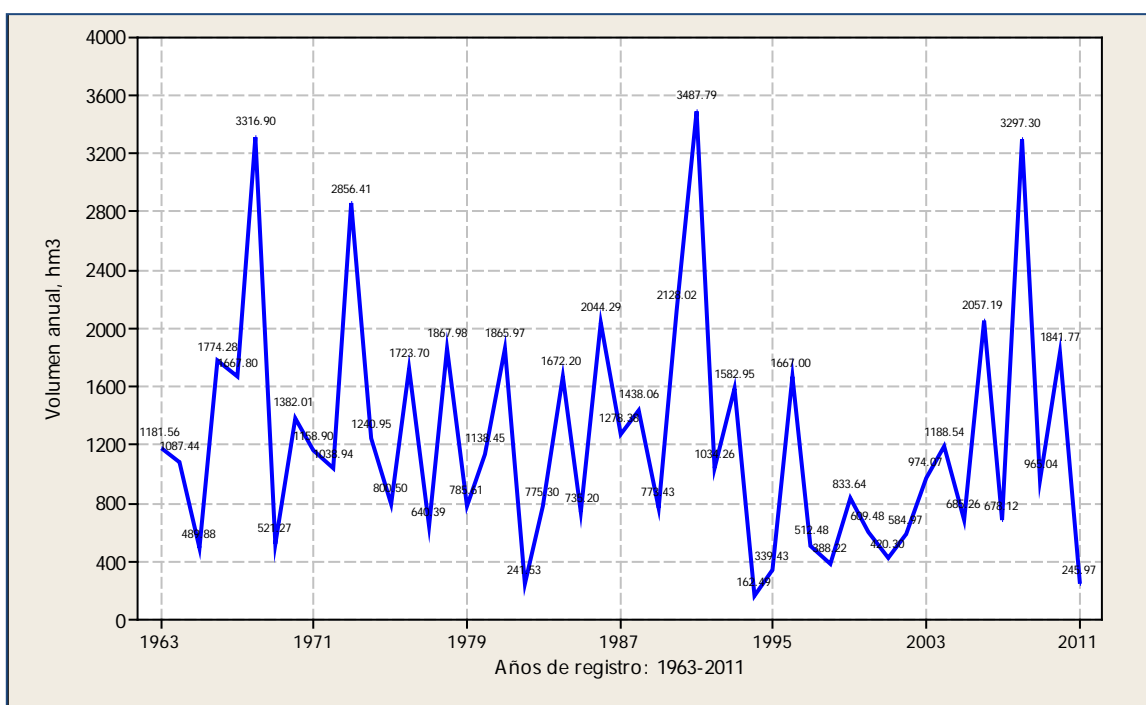


Figura 7.- Comportamiento histórico de las aportaciones anuales a la presa Lázaro Cárdenas

Como se observa, existe una amplia variación interanual de los escurrimientos, que se presentan de manera errática, a veces con valores sumamente altos y en cortas duraciones, que han provocado inundaciones en las zonas aguas abajo de la presa, incluyendo las ciudades más pobladas de la región (Torreón, Gómez Palacio y Lerdo), y también prolongados periodos de intensas sequías.

Esta gran variabilidad anual y la aparente falta de tendencia definida de los sucesos en el tiempo, hace complicado el proceso de modelación del fenómeno, obteniendo modelos con un muy bajo grado de ajuste, lo que a su vez, causa una alta incertidumbre con la proyección de posibles valores a un futuro cercano. Así, el ajuste de esta información a un modelo lineal se aprecia en la Figura 8.

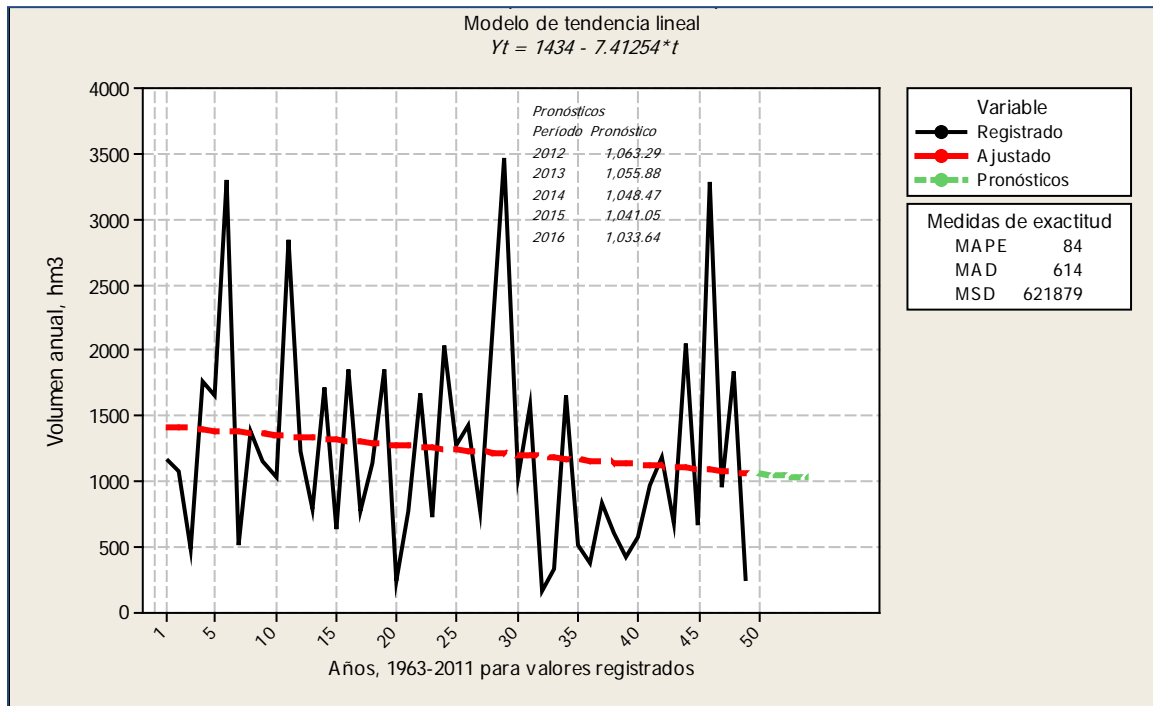


Figura 8.- Análisis de tendencia de las aportaciones anuales a la presa Lázaro Cárdenas, con un modelo lineal.

Según este modelo, la tendencia es a la baja, por lo que los valores futuros esperados, tienden a ser menores.

Otro modelo de ajuste es el exponencial (curva de crecimiento), cuyos resultados gráficos se muestran en la Figura 9, donde se aprecia que la tendencia es también a la baja, y que los valores pronosticados incluso son menores que en modelo lineal.

En estas figuras, MAPE significa *Mean Absolute Percentage Error*, mide la precisión de los valores de la serie ajustada, y se expresa como porcentaje,

$$MAPE = \frac{\sum_{t=1}^n \left| \frac{y_t - \hat{y}_t}{y_t} \right|}{n} * 100, \quad (y_t \neq 0)$$

donde y_t equivale al valor en el tiempo t , \hat{y}_t es el valor ajustado en t , y n es el número de observaciones.

Similarmente, $MAD = \text{Mean Absolute Deviation} = \frac{\sum_{t=1}^n |y_t - \hat{y}_t|}{n}$, mide la aproximación de los valores de la serie ajustada, se expresa en las mismas unidades de volumen, y ayuda a entender la magnitud del error.

También, $MSD = \text{Mean Squared Deviation} = \frac{\sum_{t=1}^n |y_t - \hat{y}_t|}{n}$, se calcula siempre usando el mismo denominador n ; MSD es una medida más sensible que MAD para el error en pronósticos de largo plazo.

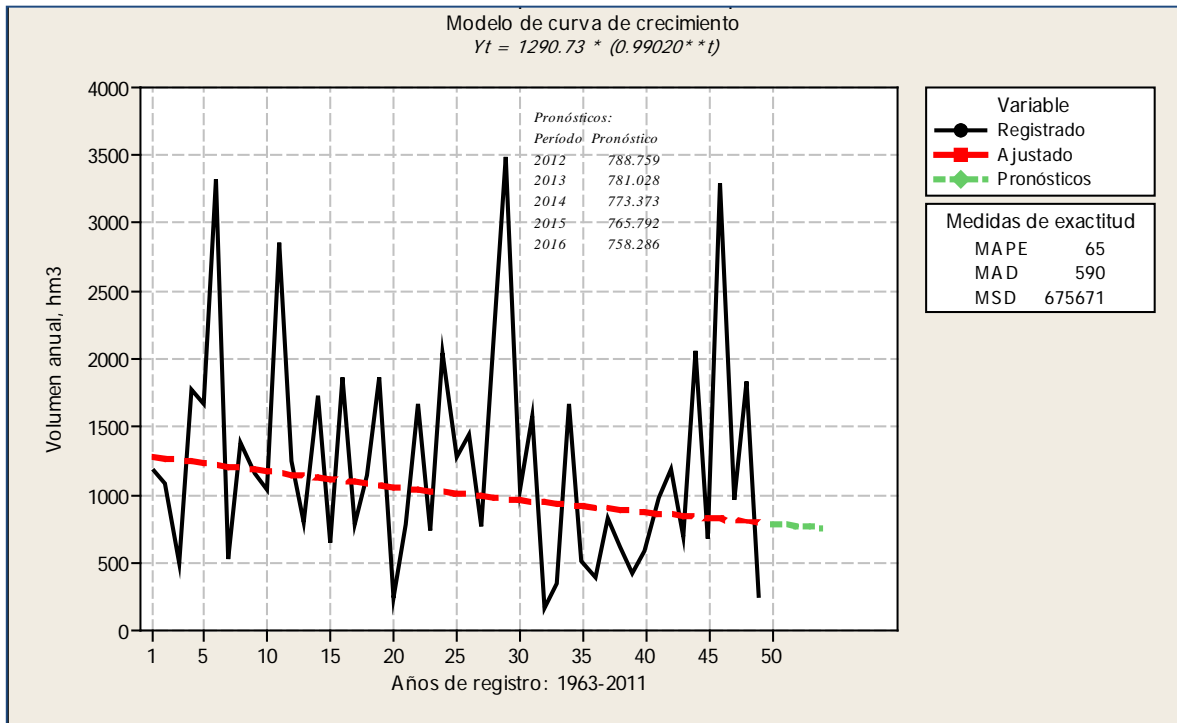


Figura 9 .- Análisis de tendencia de las aportaciones anuales para la presa Lázaro Cárdenas, según el modelo de curva de crecimiento

Aún más, puede hacerse un ajuste para fines de pronóstico con un modelo cuadrático, cuyos resultados gráficos se muestran en la Figura 10. Este modelo pareciera dar los resultados de pronóstico menos severos, pues tienden a parecerse a la media anual histórica.

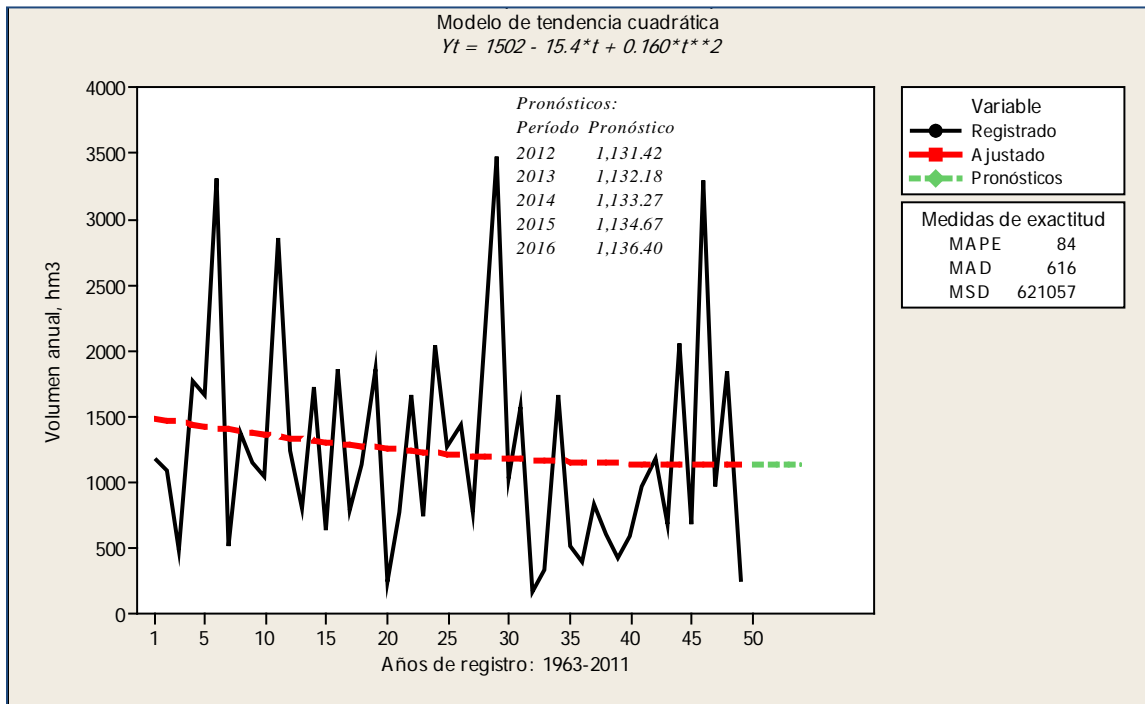


Figura 10 .- Análisis de tendencia de las aportaciones anuales a la presa Lázaro Cárdenas, según el modelo de tendencia cuadrática.

La información anual, con todo y su utilidad en dar un panorama amplio de cómo ha evolucionado el fenómeno, resulta un tanto imprecisa, dado que, en general, la lluvia y por ende los mayores escurrimientos se presentan en la época veraniega (julio-octubre), por lo cual resulta decisivo que la cantidad de lluvia de este periodo es determinante en la disponibilidad (oferta, sobre todo de agua superficial) del recurso para satisfacer la demanda, que se presenta durante todo el año, y sobre todo para el sector más demandante, el agrícola de riego.

La Figura 11 siguiente muestra, para el mismo periodo de registro, la ocurrencia de los escurrimientos registrados a la entrada del embalse.

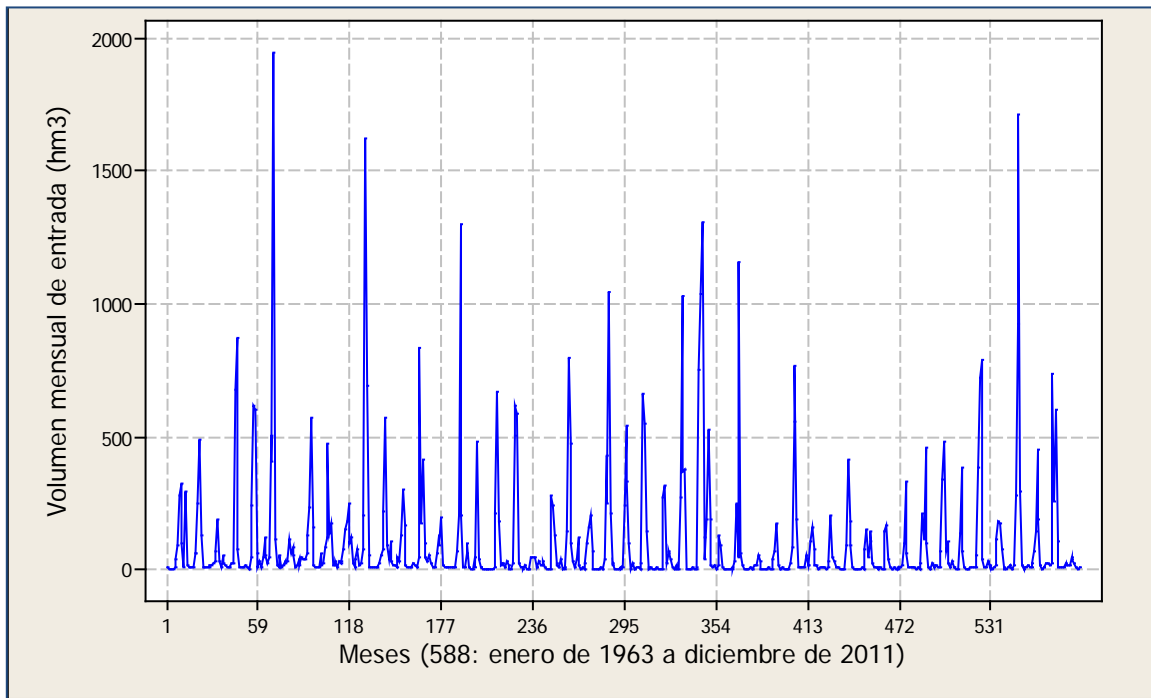


Figura 11.- Régimen de aportaciones mensuales por escurrimiento a la presa Lázaro Cárdenas, periodo 1963-2011

Como se aprecia, la ocurrencia de los escurrimientos tiende a ser de forma periódica, cada verano, aunque hay una gran variación entre un verano y otro, como se aprecia en los valores siguientes Tabla 3:

Tabla 3.- Valores resumidos de las aportaciones mensuales y anual de agua superficial a la presa Lázaro Cárdenas. La media general mensual es de 104.1 hm³, y la mediana general mensual es de 18.38 hm³.

Concepto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
PROMEDIO	28.1	17.2	17.4	14.0	10.2	32.7	198.6	343.1	443.5	98.5	19.3	25.9	1248.6
MAXIMO	531.5	190.9	120.2	57.3	46.3	145.8	834.6	1623.0	1950.0	586.2	120.2	295.4	3487.8
MINIMO	1.4	0.6	0.0	0.7	0.0	0.0	0.2	16.2	24.5	8.4	1.5	2.1	162.5
RANGO	530.1	190.3	120.2	56.6	46.3	145.8	834.4	1606.8	1925.5	577.7	118.7	293.3	3325.3
DESV EST	76.4	30.0	21.2	11.6	10.3	30.4	223.8	312.2	446.4	106.7	23.2	50.5	803.8
ASIMETRIA	6.2	4.6	3.1	2.4	1.6	1.4	1.7	2.0	1.6	2.5	3.1	4.2	1.1
MEDIANA	9.2	9.4	10.7	10.8	6.8	25.6	117.1	253.9	317.1	70.0	13.0	10.7	1087.4
MODA	#N/A	2.0	#N/A	#N/A	0.0	0.0	#N/A	205.6	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A

De acuerdo con esto, de julio a octubre se presentan los mayores escurrimientos, aunque con un amplio rango de variación: 834.4, 1,606.8, 1,925.5 y 577.7 hm³, respectivamente; en contraparte, los meses más secos, correspondientes al estiaje, van de diciembre a mayo, y también con un amplio rango de variación. Los valores de la *Mediana* (parámetro que divide en partes iguales la cantidad de eventos) son menores que la media aritmética, y por ende, para fines de análisis y planeación son tanto o más útiles. También, se deduce que tanto para cada mes como para los totales anuales, son más frecuentes los valores menores a la media aritmética que los mayores, a través del *coeficiente de asimetría*, es decir, la mayor parte de los valores registrados están cargados hacia la izquierda de la media. Esto se puede representar gráficamente por un histograma de frecuencias, como se muestra en la Figura 12: los valores bajos son mucho más frecuentes que los valores extremos altos.

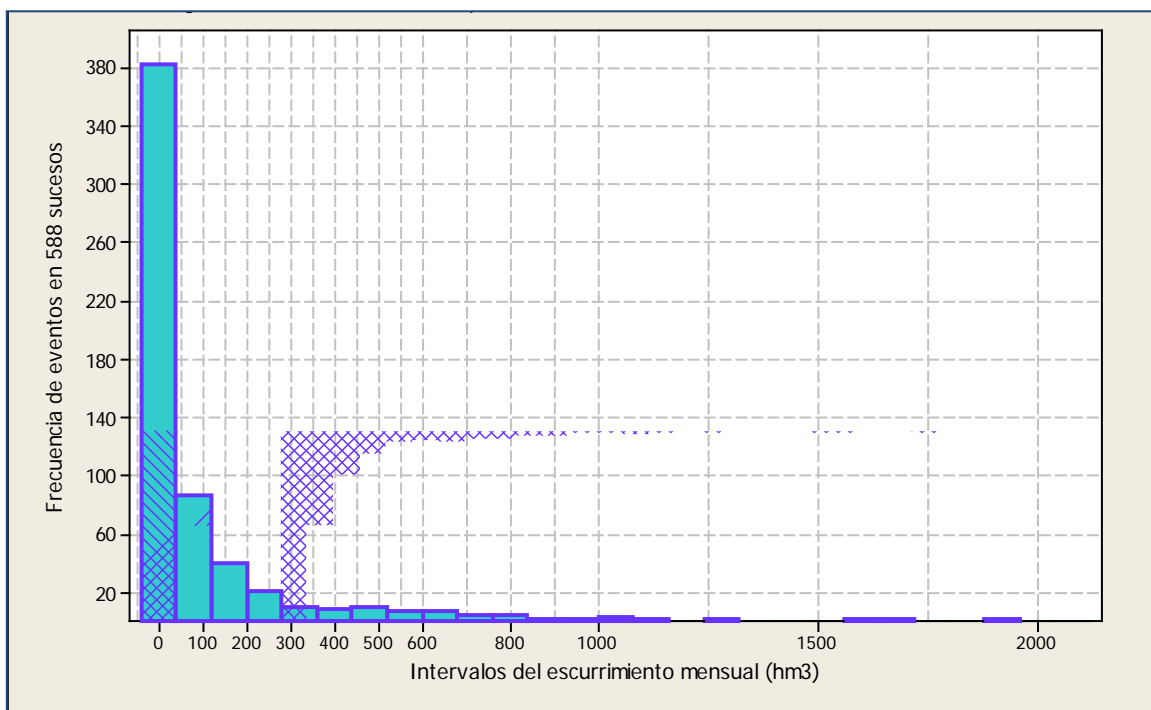


Figura 12 .- Histograma de frecuencias de las aportaciones mensuales a la preas Lázaro Cárdenas

Considerando un promedio móvil de tres meses para esta serie, y estimando el pronóstico a partir del último valor disponible (diciembre de 2011), el resultado gráfico se muestra en la Figura 13.

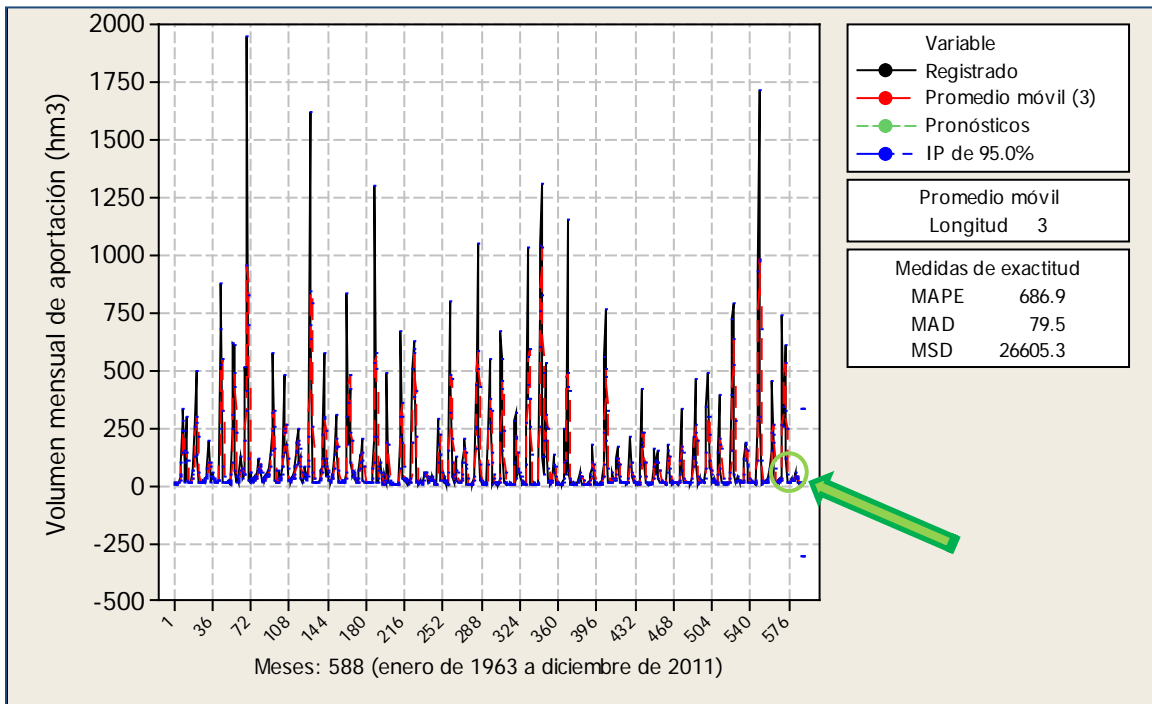


Figura 13.- Valores registrados, con promedio móvil (3), y pronosticado para las aportaciones mensuales superficiales a la presa Lázaro Cárdenas.

El promedio móvil atenúa mucho los valores –altos y bajos; en el límite, es igual a la media aritmética-, por lo que, tratándose de extrapolar a futuro la serie, para obtener un estimado de pronóstico, resulta tanto más incierto en tanto más grande sea el promedio. Así, en este caso, el pronóstico a marzo de 2012, indicado con el círculo y flecha en la figura, puede estar entre 0 y 350 hm³, que resulta poco aproximado, y un tanto poco útil, dado que, históricamente, marzo es un mes de baja aportación; en este caso, estimar el pronóstico es más útil e importante cuando se trata de los meses húmedos, que son los que determinan las características del año hidrológico.

Es también posible hacer un análisis de tendencia de esta serie; para el modelo lineal se muestra en la Figura 14, siguiente.

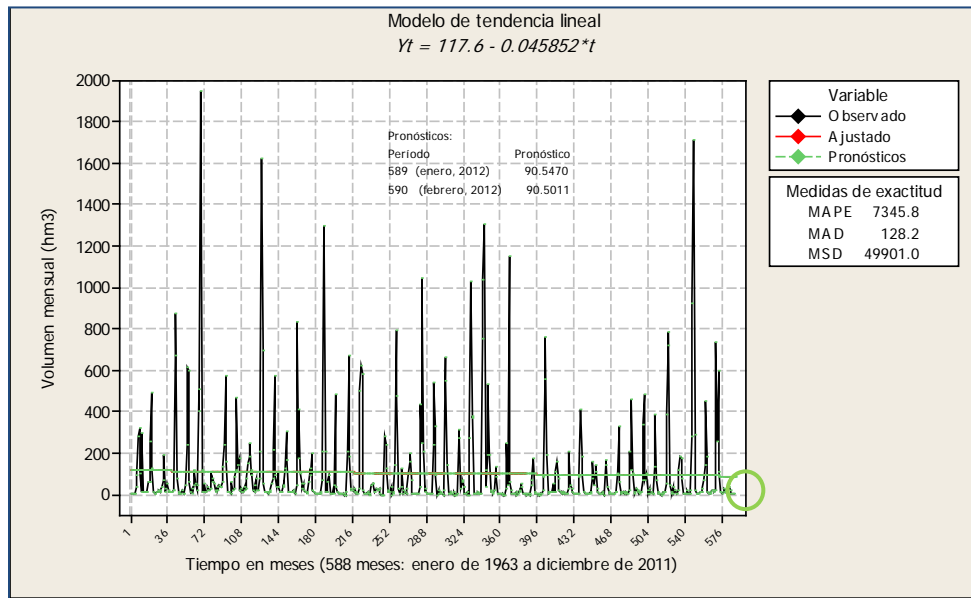


Figura 14.- Análisis de tendencia lineal de las aportaciones mensuales a la presa Lázaro Cárdenas

Bajo esta tendencia, los valores pronósticos tienden a ser similares a la media mensual general del registro, 104.1 hm³, los cuales, para meses de estiaje, son poco aproximados.

La descomposición de la serie de tiempo, según un modelo aditivo, y con el fin de tener una idea de los probables valores en los siguientes meses, se muestra en la Figura 15.

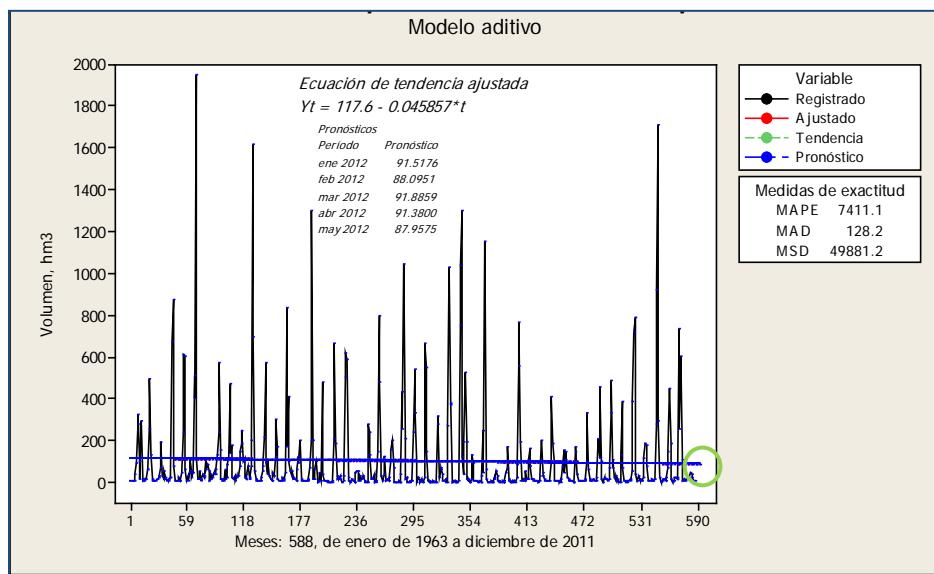


Figura 15.- Descomposición de la serie de tiempo para las aportaciones mensuales a la presa Lázaro Cárdenas

También aquí se aprecia que la tendencia, los ajustes y el pronóstico, según el modelo lineal, se parecen a la media mensual general, aunque un poco más bajos. Todo esto indica que, dada la gran variabilidad de los valores mensuales, aunque son tendientes a ser altos durante el periodo veraniego, no hace preciso el obtener un pronóstico certero, aun a corto plazo, indicado en el círculo dentro de la figura, con los valores anotados en la misma.

No obstante esta incertidumbre, dada la naturaleza auto-correlacionada de los escurrimientos, es posible obtener los valores y gráficos de esta auto-correlación; para la autocorrelación total, la Figura 16 muestra su comportamiento:

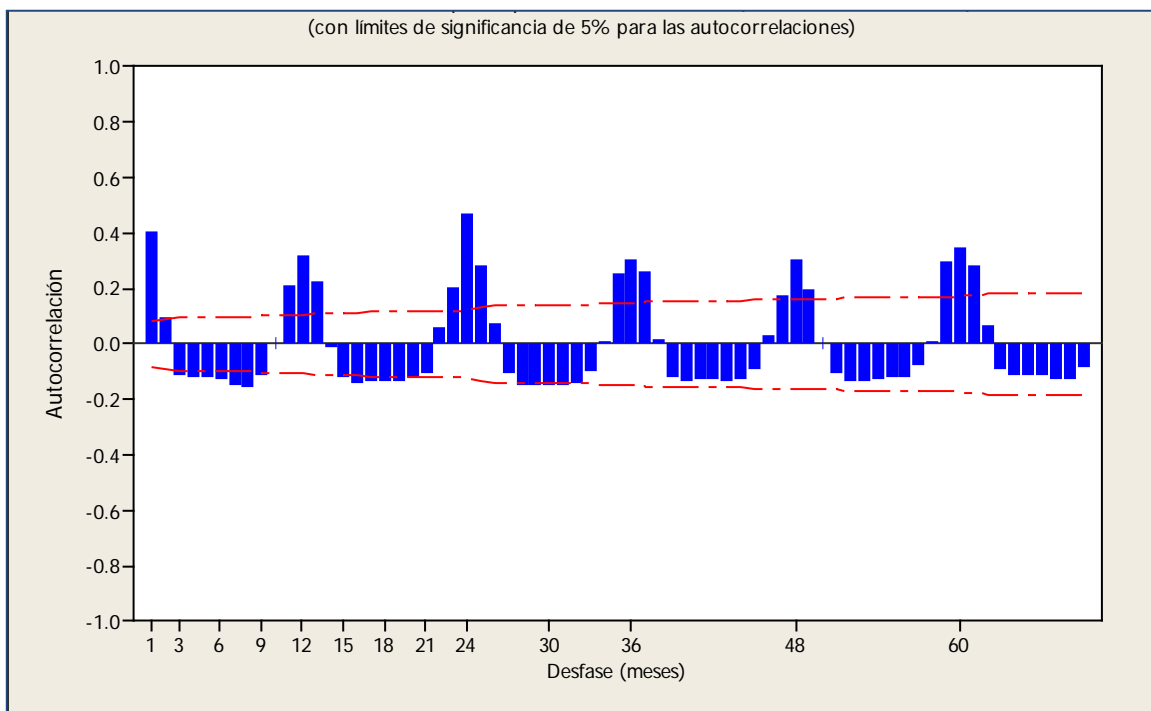


Figura 16.- Función de auto-correlación (total) para las aportaciones mensuales a la presa Lázaro Cárdenas

Como se observa, la auto-correlación más alta, positiva, corresponde a los meses 1, 12, 24, 36, 48 y 60, mientras que las más bajas, negativas, corresponden a los meses 6, 18, 30, 42 y 54. Esto confirma el carácter estacional de las aportaciones, en periodos anuales. En términos de la autocorrelación parcial, la Figura 17 muestra los resultados gráficos.

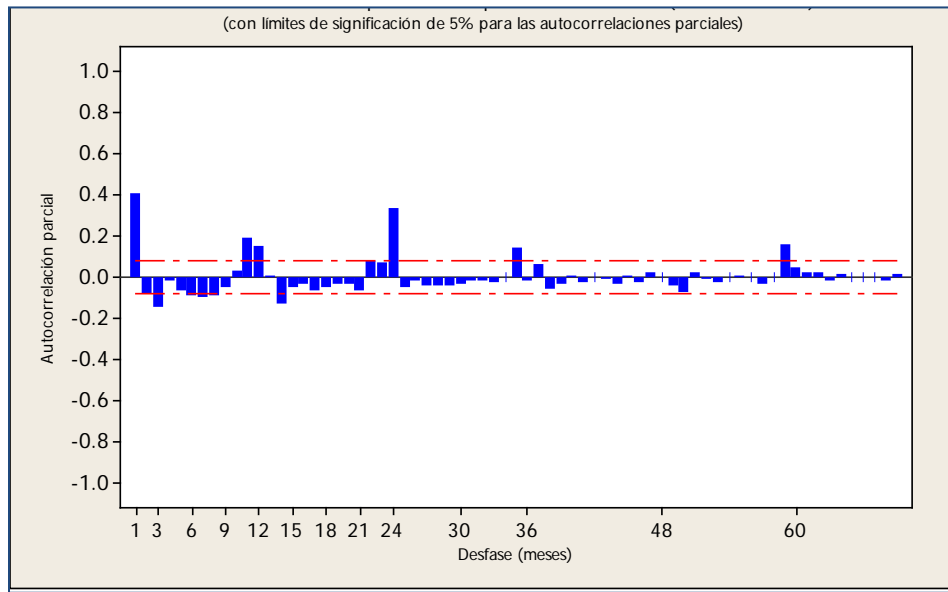


Figura 17.- Función de auto-correlación parcial para las aportaciones mensuales a la presa Lázaro Cárdenas

La estructura de este parámetro estocástico también muestra un comportamiento similar al anterior, aunque menos acusado en sus valores.

Lo correspondiente para los valores anuales de las aportaciones es más incierto; por ejemplo, para la auto-correlación total, los resultados se muestran en la Figura 18.

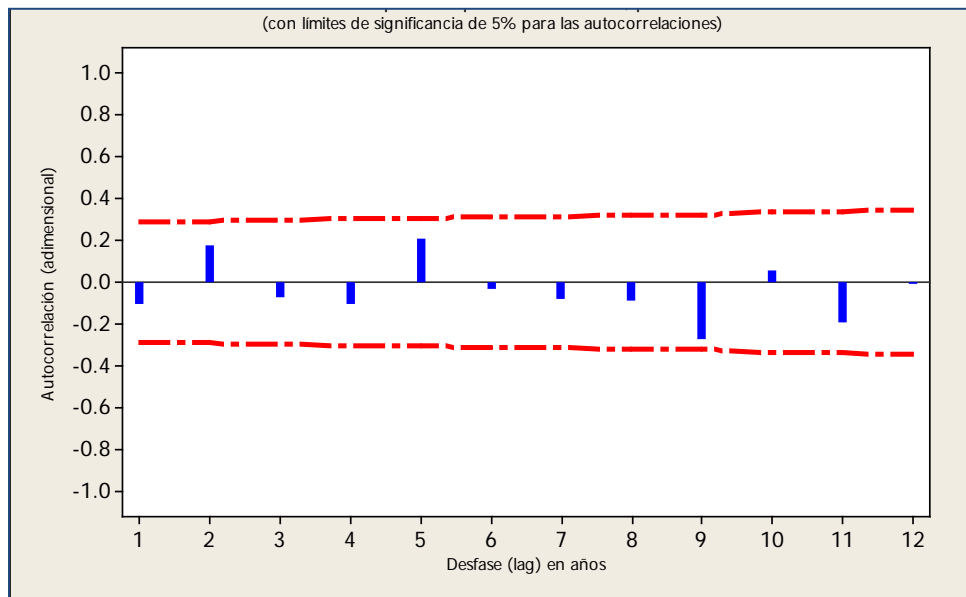


Figura 18.- Función de auto-correlación total para las aportaciones anuales a la presa Lázaro Cárdenas

Aquí se aprecia que, en términos anuales, no hay una tendencia clara en cuanto a la auto-dependencia anual del fenómeno, es decir, hay poca influencia entre las aportaciones de un año y el siguiente o un año y el anterior.

Algo similar ocurre con la auto-correlación parcial de estos mismos valores anuales, según se muestra en la Figura 19.

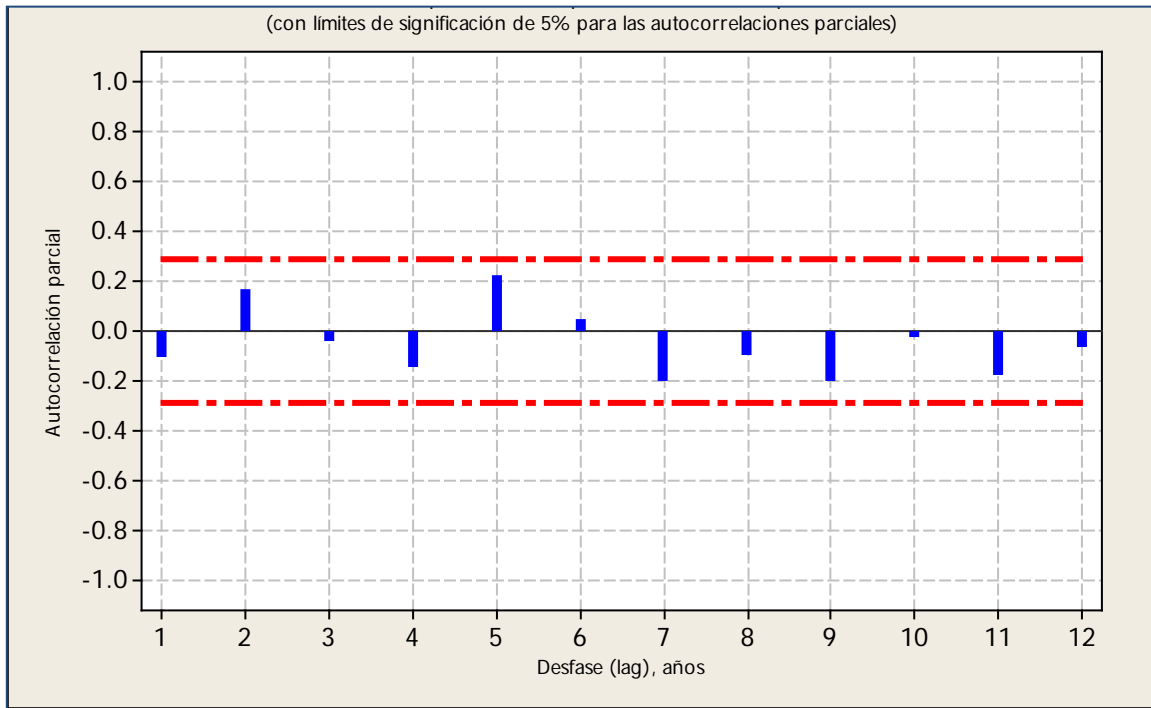


Figura 19.- Función de autocorrelación parcial de las aportaciones anuales a la presa Lázaro Cárdenas

Aunque se obtienen valores calculados de la función para los diversos desfases anuales, la tendencia de ellos no es clara, y por ende es complicado e incierto hacer un pronóstico, aun de corto plazo, para el año siguiente.

El SDI (Streamflow Drought Index) es un indicador de la sequía hidrológica, aplicado a los escurrimientos superficiales, en este caso a las aportaciones registradas a un embalse.

Como se mencionó en Conceptos y enfoques, la manera de obtenerlo es, según Nalbantis y Tsakiris (2009), una normalización logarítmica en periodos trimestrales, iniciando el 1 de octubre. Los resultados obtenidos para la misma presa Lázaro Cárdenas, se muestran en su forma gráfica en la Figura 20.

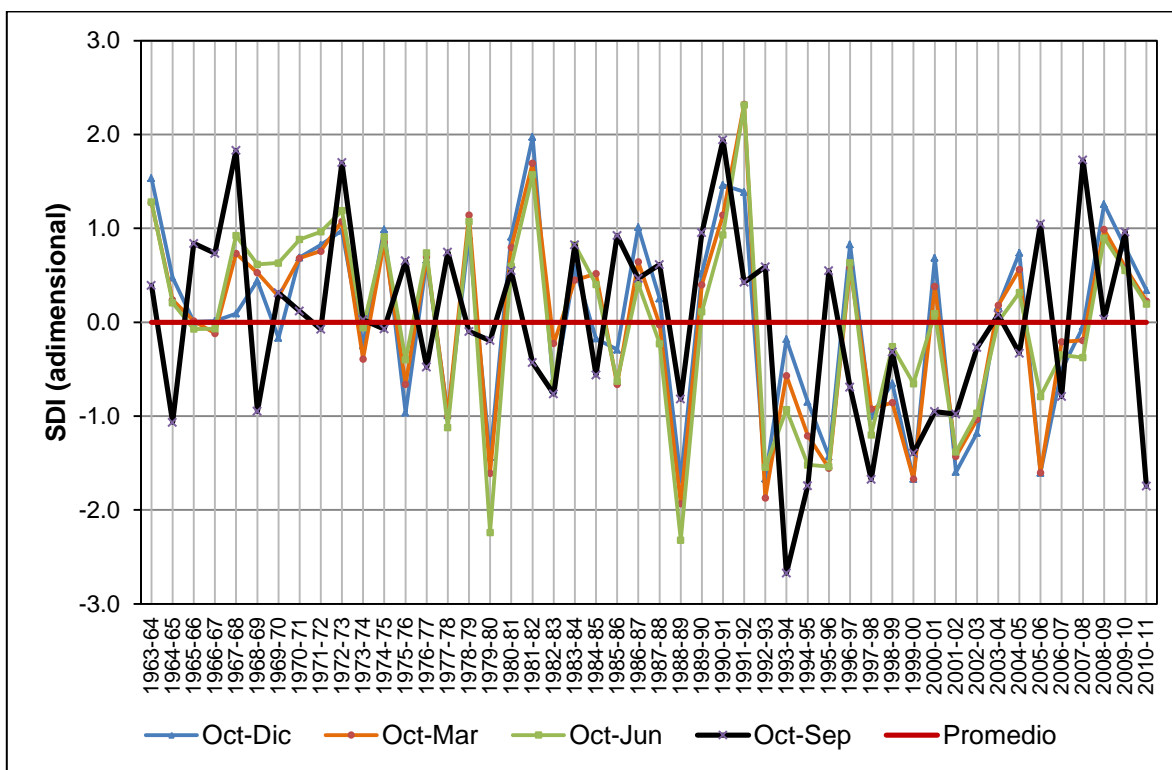


Figura 20.- SDI para las aportaciones mensuales históricas a la presa Lázaro Cárdenas

Se observa aquí que el comportamiento del SDI para los diferentes periodos trimestrales tiene una tendencia semejante para los primeros 3 periodos, octubre-diciembre, octubre-marzo y octubre-junio, mientras que para el último periodo, octubre-septiembre, es diferente. La explicación a este hecho es que, a partir de octubre, en general cesan las lluvias o disminuyen rápidamente, y no vuelve a llover hasta junio del siguiente año, aunque más bien en este mes apenas empiezan las lluvias, y es hasta julio cuando se establecen y poco después inician los escurrimientos por los cauces.

Así entonces, a excepción de aquellos años inusualmente húmedos (o secos) fuera del periodo julio-octubre, puede decirse que el análisis determinante para este índice es el que corresponde al cuarto trimestre, octubre-septiembre, pues es el que incluye la temporada lluviosa; de ahí las diferencias en el comportamiento. Y de acuerdo con esto, se aprecia que han existido diversos periodos, intensos unos y prolongados otros, en los que, según el SDI, ha habido episodios severos de sequía, tal como se han registrado, aunque la tendencia no parece estar definida.

Quizá uno de los indicadores actuales más prometedores, para el caso de los embalses en cuanto a la sequía hidrológica, sea el de los índices de estado (I_e). como también se mencionó en el apartado de Conceptos y enfoques, este índice

puede reflejar lo ocurrido en un embalse, tanto en términos del fenómeno natural del escurrimiento, como del fenómeno inducido que es el almacenamiento; para el caso de la presa Lázaro Cárdenas, la Figura 21 muestra el índice estado del escurrimiento, I_f .

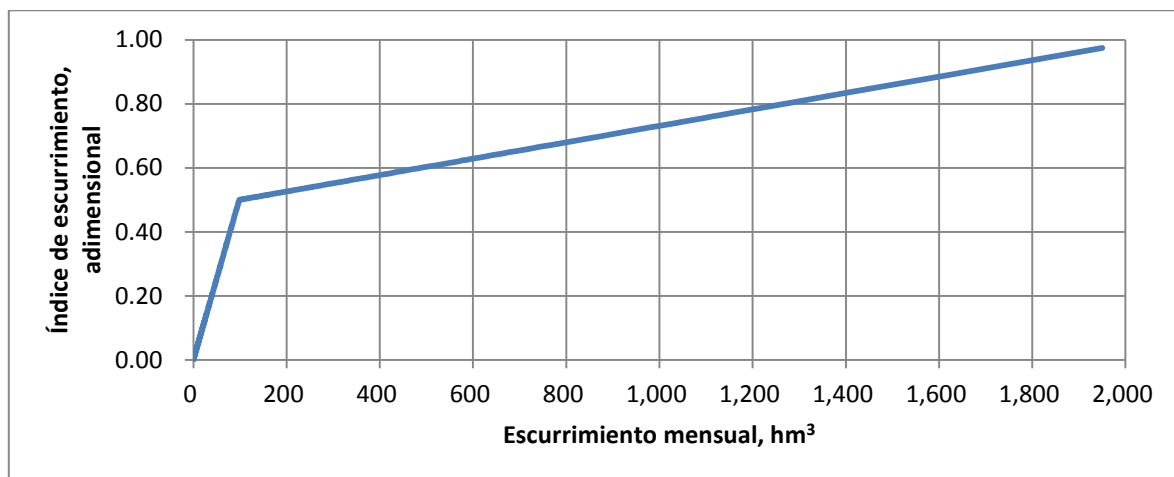


Figura 21.- Expresión gráfica del índice de fluencia, I_f , para las aportaciones mensuales a la presa Lázaro Cárdenas

El cambio en la pendiente de la recta que representan el fenómeno se da en el valor medio (aritmético) de las aportaciones, que es de 104.1 hm^3 –aunque, como se ha mencionado, la mediana es de sólo 18.38 hm^3 , a pesar del amplio rango en que varía este valor. Intuitivamente, en complemento a la interpretación de la Figura 11, podría pensarse entonces en que sí hay una aparente persistencia, a los valores bajos, que son los más frecuentes.

Respecto al índice de embalse, IE, para su cálculo se presentan en la Tabla 4 los registros históricos de los almacenamientos en el embalse al día primero de cada mes.

Tabla 4.- Registro histórico de almacenamientos al día 1 de cada mes en la presa Lázaro Cárdenas; media general = mediana = $1,735.4 \text{ hm}^3$

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	PROME DIO
1963	199.8	203.2	205.5	195.7	186.5	188.6	221.3	311.6	591.0	915.9	1,010.0	1,017.0	437.2
1964	1,307.0	1,315.0	1,314.0	1,223.0	1,110.0	1,084.0	996.3	783.4	889.6	1,384.0	1,506.0	1,509.0	1,201.8
1965	1,508.0	1,508.0	1,508.0	1,384.0	1,272.0	1,201.0	986.6	741.1	664.1	848.9	873.7	880.5	1,114.7
1966	928.4	946.5	955.0	904.5	750.3	752.1	573.3	367.4	962.7	1,832.0	1,902.0	1,900.0	1,064.5
1967	1,893.0	1,890.0	1,884.0	1,662.0	1,639.0	1,432.0	1,245.0	1,229.0	1,810.0	2,410.0	2,464.0	2,461.0	1,834.9
1968	2,383.0	2,378.0	2,357.0	2,281.0	2,097.0	2,002.0	1,739.0	1,972.0	2,162.0	3,041.0	3,037.0	3,036.0	2,373.8
1969	3,034.0	2,960.0	2,954.0	2,867.0	2,705.0	2,553.0	2,220.0	1,988.0	1,780.0	1,852.0	1,896.0	1,895.0	2,392.0

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	PROME DIO
1970	1,902.0	1,924.0	1,935.0	1,737.0	1,637.0	1,482.0	1,249.0	1,037.0	1,025.0	1,597.0	1,743.0	1,745.0	1,584.4
1971	1,746.0	1,744.0	1,736.0	1,490.0	1,454.0	1,354.0	1,151.0	988.7	1,336.0	1,473.0	1,642.0	1,649.0	1,480.3
1972	1,650.0	1,666.0	1,663.0	1,551.0	1,560.0	1,369.0	1,295.0	1,091.0	995.0	1,235.0	1,325.0	1,431.0	1,402.6
1973	1,446.0	1,448.0	1,477.0	1,281.0	1,264.0	1,196.0	1,010.0	962.2	2,581.0	3,010.0	3,038.0	3,022.0	1,811.3
1974	3,010.0	2,999.0	2,984.0	2,956.0	1,922.0	2,818.0	2,507.0	2,223.0	2,151.0	2,650.0	2,676.0	2,695.0	2,632.6
1975	2,744.0	1,758.0	2,754.0	2,725.0	1,698.0	2,482.0	2,178.0	2,052.0	2,155.0	2,305.0	2,305.0	2,293.0	2,287.4
1976	2,295.0	2,291.0	2,284.0	2,044.0	2,007.0	1,850.0	1,629.0	2,335.0	2,240.0	2,625.0	2,678.0	2,703.0	2,248.4
1977	2,715.0	2,748.0	2,747.0	2,529.0	2,500.0	2,346.0	2,101.0	1,903.0	1,723.0	1,907.3	1,911.5	1,909.0	2,253.3
1978	1,904.8	1,895.0	1,888.0	1,658.5	1,687.4	1,640.3	1,169.0	894.6	1,084.0	2,495.6	2,622.1	2,626.2	1,797.1
1979	2,583.1	2,578.4	2,753.1	2,732.8	2,667.1	2,460.8	2,276.9	1,933.7	2,228.6	2,255.2	2,247.7	2,238.6	2,413.0
1980	2,234.0	2,228.6	2,224.9	1,943.6	1,924.5	1,748.1	1,437.6	1,091.0	1,093.3	1,719.5	1,854.0	1,953.0	1,787.7
1981	1,965.1	1,983.5	1,985.8	1,869.2	1,867.5	1,717.4	1,481.5	1,225.0	1,497.2	2,120.4	2,441.0	2,716.1	1,905.8
1982	2,715.1	2,709.8	2,699.0	2,513.0	2,500.8	2,313.0	2,021.2	1,761.0	1,560.3	1,602.9	1,603.7	1,604.4	2,133.7
1983	1,629.2	1,645.3	1,657.7	1,484.2	1,477.4	1,368.0	1,174.9	950.7	1,110.8	1,338.8	1,477.4	1,495.2	1,400.8
1984	1,502.7	1,524.5	1,557.6	1,392.4	1,369.9	1,275.4	1,252.7	1,970.7	2,430.1	2,521.8	2,542.8	2,535.7	1,823.0
1985	2,560.9	2,677.8	2,685.2	2,408.5	2,398.1	2,209.3	1,935.4	1,788.0	1,752.7	1,942.1	1,979.9	1,980.8	2,193.2
1986	1,977.4	1,977.4	1,974.0	1,699.2	1,683.3	1,500.6	1,307.1	1,570.9	1,470.6	2,533.8	2,741.6	2,756.8	1,932.7
1987	2,771.0	2,771.0	2,761.2	2,624.4	2,579.0	2,416.6	2,149.3	2,069.0	2,409.8	2,764.4	2,878.6	2,870.7	2,588.8
1988	2,883.1	2,885.3	2,877.5	2,622.1	2,543.0	2,264.0	1,976.0	2,441.0	2,873.0	2,972.0	2,977.0	2,961.5	2,689.6
1989	2,966.0	2,954.8	2,945.8	2,610.3	2,540.8	2,245.9	1,905.2	1,559.7	1,597.9	1,930.4	1,944.7	2,014.3	2,268.0
1990	2,079.3	2,118.3	2,120.0	1,878.1	1,844.8	1,682.5	1,359.4	1,428.2	2,436.0	2,813.5	3,187.3	3,179.6	2,177.3
1991	3,165.3	3,155.8	3,145.1	3,028.1	2,976.3	2,672.6	2,354.5	2,939.1	3,191.5	3,343.9	3,343.9	3,343.9	3,055.0
1992	3,326.0	3,343.9	3,327.4	3,261.1	3,201.0	2,970.5	2,625.4	2,333.4	2,297.7	2,325.9	2,326.8	2,325.0	2,805.3
1993	2,324.0	2,324.0	2,317.4	2,276.6	2,002.3	1,648.2	1,409.7	1,471.9	1,372.0	2,517.8	2,582.1	2,597.2	2,070.3
1994	2,591.2	2,583.2	2,575.1	2,403.0	2,313.7	1,996.2	1,692.4	1,430.9	1,286.6	1,334.9	1,364.5	1,363.2	1,911.2
1995	1,363.2	1,358.1	1,355.5	1,143.5	1,058.5	836.4	550.6	437.7	496.1	673.0	684.8	689.8	887.3
1996	693.1	643.5	378.1	314.3	313.7	241.4	246.6	271.0	830.7	1,582.8	1,770.0	1,773.1	754.9
1997	1,775.5	1,779.4	1,782.6	1,563.9	1,580.7	1,397.7	1,081.0	942.0	1,057.0	1,129.9	1,141.2	1,150.5	1,365.1
1998	1,151.7	1,156.3	1,025.2	949.8	944.3	725.7	473.3	298.8	506.1	552.0	582.3	591.3	746.4
1999	593.6	598.3	598.7	391.0	388.3	266.3	310.3	718.8	892.6	980.7	982.9	983.4	642.1
2000	981.8	982.3	980.7	835.5	774.0	625.6	587.0	546.4	571.5	675.5	815.3	836.4	767.7
2001	844.6	847.0	846.5	690.6	676.4	532.7	330.4	335.5	503.2	538.6	543.5	545.7	602.9
2002	547.6	550.2	552.8	395.6	392.6	295.1	240.9	337.0	665.1	727.0	734.4	737.0	514.6

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	PROME DIO
2003	743.7	748.7	755.8	660.9	621.7	462.0	307.5	470.5	596.3	1,155.2	1,249.7	1,256.9	752.4
2004	1,255.1	1,278.6	1,284.1	1,132.2	1,127.1	1,066.8	827.8	731.4	1,076.6	1,565.3	1,624.9	1,725.0	1,224.6
2005	1,742.6	1,748.1	1,771.6	1,648.2	1,617.6	1,416.3	1,143.0	1,043.2	1,426.9	1,488.4	1,490.4	1,485.6	1,501.8
2006	1,485.6	1,478.1	1,474.7	1,246.7	1,203.5	953.0	750.0	999.3	1,719.7	2,503.8	2,538.8	2,536.8	1,574.2
2007	2,536.8	2,554.9	2,550.9	2,325.9	2,308.0	2,014.3	1,758.3	1,721.2	1,898.5	2,074.8	2,146.6	2,143.1	2,169.4
2008	2,137.8	2,130.7	2,099.7	1,857.0	1,844.8	1,580.0	1,304.0	1,405.7	2,333.5	3,386.9	3,117.8	3,127.3	2,193.8
2009	3,126.2	3,114.3	3,101.2	2,854.0	2,830.0	2,627.5	2,372.0	2,215.8	2,359.4	2,809.2	2,925.7	2,930.2	2,772.1
2010	2,925.7	2,916.7	2,914.5	2,725.7	2,612.4	2,474.9	2,162.8	2,610.3	2,547.8	3,073.0	2,963.8	2,957.1	2,740.4
2011	2,955.9	2,941.4	2,931.3	2,664.0	2,628.5	2,388.5	2,052.3	1,803.8	1,827.7	1,835.5	1,830.9	2,003.7	2,321.9
MEDIA	1,975.5	1,958.4	1,972.6	1,808.9	1,720.4	1,594.8	1,369.9	1,341.5	1,552.4	1,925.9	1,985.0	2,003.7	1,767.4
MAXIMO	3,326.0	3,343.9	3,327.4	3,261.1	3,201.0	2,970.5	2,625.4	2,939.1	3,191.5	3,386.9	3,343.9	3,343.9	3,055.0
MINIMO	199.8	203.2	205.5	195.7	186.5	188.6	221.3	271.0	496.1	538.6	543.5	545.7	437.2
RANGO	3,126.2	3,140.7	3,121.9	3,065.4	3,014.5	2,781.9	2,404.1	2,668.1	2,695.4	2,848.3	2,800.4	2,798.2	2,617.8
DESV EST	811.9	803.6	822.0	808.9	765.9	755.6	684.3	704.1	711.7	787.5	781.3	780.0	699.0
ASIMETRIA	-0.3	-0.2	-0.3	-0.2	-0.2	-0.2	-0.1	0.2	0.2	-0.0	-0.1	-0.2	-0.3
MEDIANA	1,965.1	1,924.0	1,974.0	1,737.0	1,687.4	1,580.0	1,304.0	1,229.0	1,497.2	1,907.3	1,911.5	1,980.8	1,834.9
MODA	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	1,091.0	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A

El almacenamiento, al ser un fenómeno inducido y por ende, “controlado”, tiene menos variación, por lo cual la media aritmética y la mediana tienen el mismo valor, y como, para los valores anuales, lo muestra la Figura 22 . Para este embalse, los valores de la geometría hidráulica son: NAMO = 2,873 hm³, NAMIN = 95 hm³, Volumen útil = 2,778 hm³ = NAMO – NAMIN.

En esta figura se aprecia que, con todo y ser un fenómeno controlado, las variaciones en el tiempo son muy significativas, debido primeramente a la alta variación del fenómeno natural que les da origen y, en segundo lugar, a las políticas de operación que se han aplicado. Destaca en este sentido la gran presión que reciben las autoridades locales de la CONAGUA, cada año, en cuanto a que los concesionarios de estas aguas superficiales generalmente exigen volúmenes que técnicamente no son aconsejables, pues ello significa extraer cantidades tales que no garantizan la oferta para el siguiente ciclo. Esto ocasiona que al embalse se apliquen políticas operativas inadecuadas, que desvirtúan el objetivo de regular y almacenar los volúmenes en épocas de abundancia, para usarlos en tiempos de escasez, y con ello hacer menos variable y pernicioso el

daño a las actividades que dependen del agua, precisamente por la escasez temporal de ella.

No obstante, también es cierto que si no fuera por este embalse y la función que desempeña, las cosas serían más complicadas, por la alta demanda de agua y la gran variación con que se presenta.

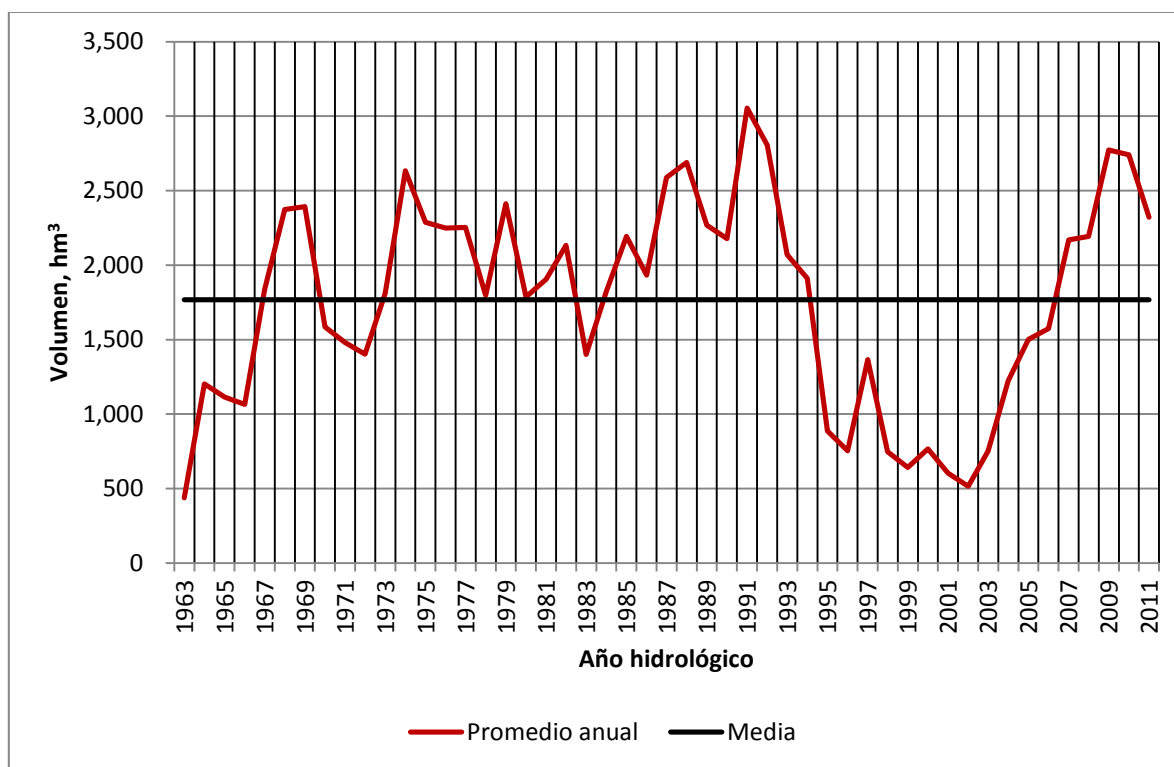


Figura 22.- Valores promedio anuales de almacenamiento histórico en la presa Lázaro Cárdenas

La combinación de estos dos fenómenos, aportación natural y volumen almacenado, pueden combinarse para obtener el índice de estado mixto, I_{EM} , el cual se muestra en la Figura 23. Como se aprecia en esta figura, el I_f es altamente variable, por las características propias regionales; el I_E , por ende, es proclive a una tendencia similar, aunque más acentuada, precisamente por ser un fenómeno inducido, y la combinación de ambos índices parciales, indica que así como ha habido periodos de relativa abundancia y por ende de “normalidad” en la oferta hídrica, también se han presentado severos y prolongados periodos de escasez, que han impactado sensiblemente a las actividades, especialmente a la agricultura de riego.

También, puede argumentarse que, contrario a la creencia popular, y a lo arraigado que existe el erróneo concepto del carácter cíclico de la sequía, en realidad se confirma la recurrencia o alta frecuencia de ocurrencia del fenómeno,

y con un carácter aleatorio, tanto en severidad como en duración, extensión y magnitud; es decir, a partir de estos análisis, es poco factible que se pueda obtener una tendencia modelable con una razonable aproximación, que permitiera de alguna forma aproximarse a la estimación de los acontecimientos futuros.

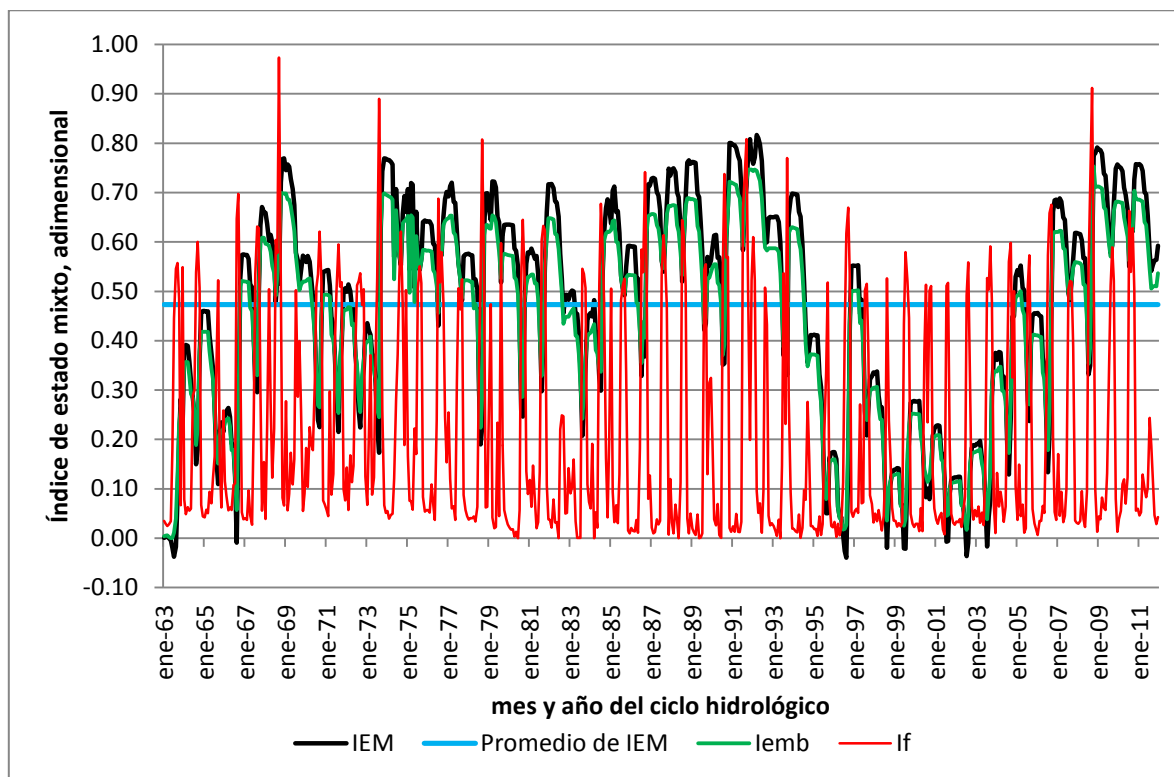


Figura 23 .- IEM para la presa Lázaro Cárdenas, en función de las aportaciones y almacenamientos mensuales históricos

Destaca en esta figura que ha habido periodos en los que, según los IE, las condiciones de sequía han sido intensas y prolongadas, por ejemplo, de 1994 a 2004, que efectivamente fueron periodos críticos en la Región Lagunera, cuando la agricultura de riego descendió a niveles mínimos históricos, impactando dramáticamente a toda la región, y cuando se hizo mayor uso del agua subterránea, con los sabidos consiguientes problemas.

El coeficiente de Hurst, para este mismo embalse, considerando los valores mensuales de aportación, y aplicando la metodología de Rodríguez (2012), conduce a lo que muestra la Figura 24; de acuerdo con la teoría de Hurst, si el coeficiente está entre 0.5 y 1.0, sí hay persistencia, y en este caso, tal valor es de 0.73, de lo cual se deduce que los escurrimientos mensuales –y anuales- del río Nazas, si son persistentes, aunque en este caso, a los valores bajos, lo que se corrobora con lo expuesto en la Figura 14 y con el I_f . Los valores extremos altos,

aunque muy significativos, son más bien puntuales, por su corta duración, no obstante que pueden provocar severos daños también por inundación.

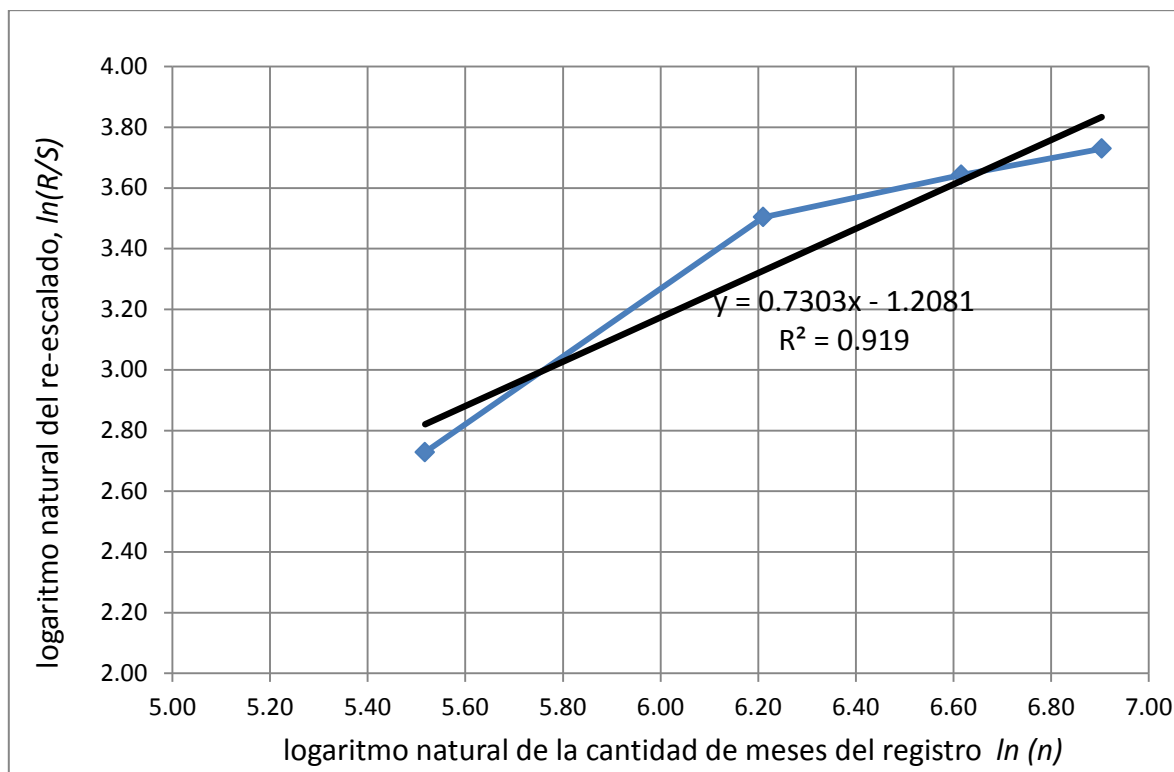


Figura 24 .- Expresión gráfica del coeficiente de Hurst para aportaciones mensuales históricas 1963-2011 a la presa Lázaro Cárdenas

Así entonces, según Hurst sí hay persistencia en este río, a la entrada del embalse, una podría decirse “persistencia normal” para los ríos que caracterizan la región árida y semiárida del país, y en este caso, además, para una cuenca endorreica.

La importancia y conveniencia de hacer análisis como los aquí esbozados para un río de estas características es que, dado que es una cuenca cerrada, la única fuente de agua superficial es precisamente el río Nazas, y resulta determinante para las labores que dependen del agua, dado que prácticamente toda está concesionada para uso agrícola, y cuando hay escasez, no hay fuentes alternas, excepto la del subsuelo, pero éste enfrenta serios problemas de abatimiento, calidad y costos de extracción. De aquí que la formulación de escenarios, entre más fundamentados mejor, resulta crucial para esta región.

Conclusiones y recomendaciones

Prever o incursionar en el futuro, en términos hidrológicos no es tarea fácil. Los niveles de incertidumbre son altos y por ende, el riesgo de obtener valores estimados con mucha diferencia de los reales potenciales es también grande.

Esto complica la tarea de formular medidas y estrategias de prevención de la sequía que tengan un sólido fundamento, en el sentido de evaluar láminas de lluvia y caudales de escurrimiento superficial o infiltrados al subsuelo, tales que en su caso permitieran mitigar los impactos del fenómeno. Estas ideas son las que dan soporte al concepto de que el término pronóstico no es aplicable a la sequía, de que la prevención es la mejor manera de anticiparse a la ocurrencia segura del fenómeno, aunque por lo mismo no se sabe ni cuándo ni qué tan severo puede ser el evento.

Por ende, la formulación de escenarios y la consideración del *qué pasaría si*, son las herramientas que, en la actualidad, permiten hacer aproximaciones, algunas con un buen nivel de acierto y otras no tanto, tales que de alguna manera, sirvan de base o marco de referencia para la actuación cuando la emergencia se presente.

Desde luego, para fines de formulación de escenarios, existen diversos conceptos y métodos, teóricamente todos buenos, pero que en su aplicación práctica difieren en su facilidad de implementación y en sus resultados. Por ende, un mismo método no siempre es el mejor o tiene el mismo desempeño en todas las situaciones.

De aquí entonces que dado que cada situación es diferente, habrá que probar diferentes métodos para la misma, y hacer las valoraciones de bondad para definir cuál o cuáles son los más adecuados, en términos de sus resultados y de la información que se tenga para su aplicación. Esto implica que los diversos métodos disponibles deben ser utilizados con criterio, e interpretados con sentido común, a fin de que su valoración redunde en una mejor aproximación a las condiciones registradas y, por ende, a las proyecciones inmediatas que se usarían como posibles eventos a presentarse.

En todo caso, debe tenerse presente que las herramientas estadísticas que aquí se mencionan, por su propia naturaleza, llevan implícitas el concepto de “error”, como una medida de la incertidumbre natural de los fenómenos que se pretenden caracterizar, y que, por tanto, los resultados a obtener siempre tendrán también una imprecisión, reflejo de la alta (o baja) variabilidad de los datos que se

modelen, y que en consecuencia, esperar valores “pronosticados” precisos es una utopía, lo cual es comprensible a la luz de los múltiples factores naturales (y a veces inducidos) que intervienen en su ocurrencia, y que se manifiesta en la complejidad de estos fenómenos, principalmente la lluvia.

Desde este enfoque, hablar de “persistencia hidrológica” implica evaluar algunos de los diferentes métodos para intentar proyectar al futuro inmediato los posibles sucesos, con un nivel mínimo de certidumbre.

Como se ha mencionado, para esta región es muy importante hacer el mejor uso de la limitada cantidad de agua superficial, más aun cuando la variabilidad temporal es tan alta. De hecho, expresamente por esta gran variación, el intento de estimar los eventos probables, aunque muy necesario, es también muy incierto. Sin embargo, tener al menos una idea de la probable magnitud de las aportaciones futuras resulta muy valioso, con la idea de dimensionar los posibles escenarios de ocurrencia, y con ello estimar, aun con todo y esa incertidumbre, el qué pasaría si ocurrieran determinadas condiciones hidrológicas.

En síntesis, la persistencia existe para las aportaciones de agua superficial a la presa Lázaro Cárdenas, según Hurst; la complejidad de modelar con aproximación lo esperado es debido a la gran variabilidad del fenómeno registrado, y a su indefinida tendencia.

Por ello, la recomendación que deriva de este trabajo es que sería útil e importante continuar analizando la información mediante los diversos métodos, estadísticos, por ejemplo, de tal forma que, eventualmente, se pudiera encontrar alguno que describa de manera más acertada el fenómeno; con ello, se estaría en posibilidades de una mejor estimación, más precisa, de los sucesos por venir, y con ello a la vez mejorar los escenarios en los que, la escasez de agua tenga los mínimos impactos, es decir, que se constituya, esta estimación, en una de las medidas aplicables, preventivas, para lograr que, a pesar de la inevitabilidad de la sequía, sus consecuencias sean menos graves.

Referencias

CONAGUA (2014)

http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=236&Itemid=74

Hurst, H.E. (1951) Long-terms Storage of Reservoirs. Transactions of the American Society of Civil Engineers, vol. 116, pp. 770-799.

Kotegoda, N. T. (1980) Stochastic Water Resources Technology. John Wiley & Sons. New York. pp. 384.

Loucks, Daniel P., Jerry R. Stedinger, Douglas A. Haith. (1981) Water Resources Systems Planning and Analysis. Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey. 559 p.

Madl, P. (2000) The El Niño (ENSO) Phenomenon. Environmental Physics/Lettner, VO 437-453. Disponible en línea: <http://biophysics.sbg.ac.at/atmo/elnino.htm>

Ministerio de Medio Ambiente, Dirección General Del Agua (2005). Guía para la redacción de planes especiales de actuación en situación de alerta y eventual sequía, España

Nalbantis y Tsakiris (2009) Assessment of Hydrological Drought Revisited, Water Resources Management March 2009, Volume 23, Issue 5, pp 881-897

ONI (2014) <http://ggweather.com/enso/oni.htm>

RAE (2013) <http://lema.rae.es/drae/?val=recurrencia>

Rodríguez S. Edgar. (2012) Hidrología de Hurst y Box Counting para el análisis de persistencia, volatilidad y riesgo en dos series de tiempo colombianas. Cuadernos Latinoamericanos de Administración, Volumen VIII, Número 14, p. 41-50. Universidad Javeriana, Colombia.

UNESCO (2010) Atlas de Zonas Áridas de América Latina y El Caribe. Programa Hidrológico Internacional para América Latina y El Caribe. Documento Técnico No. 25. Montevideo, Uruguay.

Velasco, Israel, y José Luis Montesillo-Cedillo (2007) La gestión de cuencas en sequía. CIDE, Gestión y Política Pública. Volumen XVI, Numero 1, primer semestre de 2007, pp. 5-27. México.

Velasco, Israel, Leonel Ochoa, y Carlos Gutiérrez (2005) Sequía, un problema de perspectiva y gestión. El Colegio de Sonora, Revista Región y Sociedad. Vol. XVII, No. 34, septiembre-diciembre 2005. Hermosillo, México, pp 35-71.