

Revista Electrónica Nova Scientia

Análisis de la evaporación y cambio climático
en el centro de México
Evaporation analysis and climate change in
central México

**Rafael Magallanes-Quintanar¹, Aurelio Manuel López
Hernández¹ y Carlos Erick Galván-Tejada²**

¹Programa de Ingeniería en Computación, Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica, Universidad Autónoma de Zacatecas, Zacatecas.

²Programa de Ingeniería de Software, Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica, Universidad Autónoma de Zacatecas, Zacatecas.

México

© Universidad De La Salle Bajío (México)

Resumen

Se analizaron mediante regresión lineal series de largo plazo de evaporación en 35 estaciones localizadas en el estado de Zacatecas, México, con el objetivo de identificar sus tendencias y calcular sus anomalías. Adicionalmente, se analizaron mediante análisis fractal los espectros de potencia de las anomalías de evaporación con el fin de identificar sus frecuencias importantes y su posible conexión con fenómenos periódicos. Los resultados sugieren que las tendencias negativas en las series de tiempo de evaporación prevalecen sobre las tendencias positivas. Se encontró tendencia lineal negativa en 21 de 35 series; 18 de las 21 series fueron significativas a $p < 0.05$. Por otra parte, 14 series tuvieron tendencias lineales positivas, pero solo 8 fueron significativas a $p < 0.05$. El ruido en todas las series de tiempo de evaporación mensual tiene un comportamiento persistente. Adicionalmente, se encontró que las frecuencias importantes detectadas pueden estar relacionadas con el ciclo anual, el ciclo cuasi-bianual, el fenómeno “El Niño Oscilación del Sur” y el ciclo de manchas solares.

Palabras Clave: Tendencias lineales, Dimensión Fractal, Dimensión de espectro de potencias, ENOS, Manchas Solares

Recepción: 04-11-2016

Aceptación: 10-01-2017

Abstract

Long-term monthly pan evaporation time series registered at 35 meteorological stations located within Mexico's state of Zacatecas were analyzed through linear regression approach in order to identify their trends and to calculate their anomalies. In addition, we analyzed the power spectrum signals of evaporation anomaly series through fractal analysis to identify their important frequencies and its possible connection with periodic phenomena. Results suggest that negative trends are prevailing over positive trends. We found negative linear trend for 21 out of 35 pan evaporation time series. 18 out of 21 decreasing trends were significant at $p < 0.05$. On the other hand, 14 out of 35 pan evaporation trends were positive but only 8 of them at significant level ($p < 0.05$). Moreover, the noise in these monthly pan evaporation series tends to be persistent behavior. Additionally, we found that important frequencies in our study seem that could be related with the yearly cycle, quasi-biannual cycle, 'El Niño Southern Oscillation' phenomena and sunspot cycle.

Key words: Linear trends, Fractal dimension, Power spectrum density, ENSO, Sunspot cycle.

Introducción

Históricamente, la mayoría de los estudios confían en el punto de vista tradicional de que las tendencias de evaporación son un reflejo de las tendencias de la evaporación terrestre superficial. La evaporación del agua medida en los tanques evaporímetros ha disminuido en muchas regiones del mundo a partir de la segunda mitad del siglo pasado (Roderick y Farquhar, 2004), lo cual sugiere una disminución reciente en la evaporación terrestre componente del ciclo hidrológico (Lawrimore y Peterson, 2000). En el hemisferio norte, decrementos en la evaporación de tanque evaporímetro, en promedio de 2 a 4 mm/año, han ocurrido en varias décadas y hasta 1990 (Gifford *et al.*, 2005). A pesar de estos impresionantes hechos, persiste la carencia de estudios acerca del comportamiento de la evaporación y su posible relación con fenómenos periódicos en México, aunque se cuenta con una red nacional de estaciones meteorológicas.

Generalmente se esperaría que la evaporación se incremente en el futuro debido al incremento de las temperaturas producto del calentamiento global y a una intensificación del ciclo hidrológico (Huntington 2006). Sin embargo, varios reportes muestran que la tendencia de la evaporación terrestre se está decrementando (Chattopadhyay y Hulme, 1997; Quintana-Gomez, 1998; Linacre, 2004; Brutsaert, 2006; Blanco-Macías *et al.*, 2011).

El conocer el comportamiento de la evaporación local puede ser de gran importancia socioeconómica dado que en las áreas rurales es común asociarlo con valores de coeficientes de cultivos para programación de riego y administración de recursos hidráulicos (Mutziger *et al.*, 2005). Este es el caso de las áreas áridas y semiáridas irrigadas (150, 000 ha) del estado mexicano de Zacatecas, donde los acuíferos están sobreexplotados con un déficit de $201.1 \times 10^6 \text{ m}^3$ por año (SEMARNAT, 2008).

Adicionalmente a los análisis estadísticos tradicionales, las series de tiempo de evaporación pueden ser analizadas utilizando otros enfoques, por ejemplo, pueden tratarse como perfiles fractales (Valdez-Cepeda *et al.*, 2003ab; Blanco-Macías *et al.*, 2011). El concepto fractal es muy útil para la interpretación de datos de series de tiempo en varias ramas de las ciencias de la tierra como la variación de la temperatura horizontal, humedad y precipitación entre otras. Todos esos fenómenos obedecen al comportamiento de una ley potencial. Esos resultados son muy importantes para la comprensión de la variación de la atmósfera y para mejorar la caracterización de esos campos en modelos de gran escala del sistema climático (Dimri, 2005).

Por lo tanto, los objetivos de este estudio fueron: 1) Identificar las tendencias de 35 series de largo plazo de evaporación mensual registrada en estaciones meteorológicas en el estado de Zacatecas, México y 2) Identificar frecuencias importantes en las series de anomalías de largo plazo de evaporación mensual por medio del análisis de espectro de potencia y su posible conexión con fenómenos periódicos.

Materiales y Métodos

Datos

Los datos originales fueron registros de largo plazo de evaporación mensual. Se colectaron esos conjuntos de datos de 35 estaciones meteorológicas ubicadas en el territorio del estado de Zacatecas, México. Para el análisis solo se consideraron estaciones con registros de al menos 40 años (1970-2010). Las series fueron analizadas preliminarmente con el fin de detectar valores atípicos o distantes del resto de los datos. Estos valores fueron eliminados manualmente y se consideraron como datos faltantes. En el caso de series con datos faltantes, sus valores se estimaron al aplicar el método de interpolación Kriging el cual es un método de estimación que obtiene la mejor estimación lineal insesgada de los valores faltantes al elegir el promedio ponderado de los valores de las muestras que tengan la mínima varianza. Para este propósito se utilizó el software GS+ versión 3.5 (Gamma Design Software, 1999). Las generalidades para cada estación se aprecian en el Cuadro 1. Los datos fueron proporcionados por la ‘Comisión Nacional del Agua’, institución nacional oficial a cargo del registro de los datos climatológicos y meteorológicos en México.

Los conjuntos de datos se trataron como perfiles fractales para estimar inicialmente sus tendencias lineales por medio del análisis de regresión lineal y posteriormente para calcular los índices de auto-afinidad de las series de tiempo de anomalías de evaporación mediante análisis fractal utilizando la técnica de espectro de potencias.

Tendencias lineales

Las series de tiempo climáticas son en general no estacionarias, y frecuentemente presentan tendencias de largo plazo. Entre varios de los métodos que existen para calcular las tendencias de las series climatológicas, el método más ampliamente utilizado es la superposición de una tendencia lineal (Trömel y Schönwiese, 2008; Muhlbauer *et al.*, 2009).

Por lo tanto, el remover las tendencias es un paso importante a fin de evitar que el comportamiento no estacionario que acompaña los datos arroje resultados espurios (Peng *et al.*, 1994; Hausdorff y Peng, 1996). Cuando este paso se lleva a cabo, la nueva serie de tiempo se conoce como serie de tiempo de anomalías (Wilks, 2011).

En este sentido, las tendencias lineales de las series de tiempo de evaporación se estimaron a través del análisis de regresión lineal tomando en cuenta el siguiente modelo simple:

$$Y_i = a + bX_i. \quad (1)$$

Antes de efectuar el análisis fractal mediante el enfoque de espectro de potencias, las tendencias lineales de las series fueron removidas tomando en cuenta la ecuación 1:

$$Y_{di} = Y_i - (a + bX_i), \quad (2)$$

Donde Y_{di} es la i ésima evaporación media mensual sin tendencia.

Después de efectuar el paso anterior, la serie de tiempo obtenida se conoce como serie de tiempo de anomalías (Wilks, 2011), la cual para este caso es una serie de tiempo de anomalías de evaporación mensual. El análisis de tendencias lineales de evaporación y el cálculo de las series de tiempo de anomalías se llevó a cabo mediante el software OriginPro versión 8 SR0 (Originlab, 2007).

Análisis Fractal

La variación temporal de fenómenos naturales ha sido difícil de caracterizar y de cuantificar. Para solucionar estos problemas, el análisis fractal fue introducido por Mandelbrot (1982). Las series de tiempo se pueden caracterizar por una dimensión no entera (dimensión fractal) cuando ésta es tratada como una caminata aleatoria o un perfil auto-afín. Los sistemas auto-afines son caracterizados a menudo por la rugosidad, la cual se define como la fluctuación de la altura sobre una escala de longitud. Para los perfiles auto-afines, la rugosidad se escala con el tamaño lineal de la superficie por un exponente llamado de rugosidad o exponente de Hurst. Sin embargo, este exponente da información limitada acerca de la distribución subyacente de la diferencia de alturas (Evertsz y Berkner, 1995). Existe el hecho de que el exponente de Hurst y la dimensión fractal

miden que tan lejana está una curva fractal de cualquier función suavizada que se utiliza para aproximarla (Moreira *et al.*, 1994). Hay una gran cantidad de técnicas para estimar la dimensión fractal para los perfiles auto-afines, pero solamente utilizamos la técnica de espectro potencial, porque es una buena herramienta exploratoria sensible para datos reales (Weber y Talkner, 2001).

Enfoque de espectro de potencias

Los fractales auto-afines son generalmente tratados cuantitativamente utilizando técnicas espectrales. La variación del espectro de potencias $P(f)$ con frecuencia f parece seguir una ley de potencia (Turcotte, 1992):

$$P(f) \sim f^{-\beta}. \quad (3)$$

El espectro de potencias $P(f)$ Se define como el cuadrado de la magnitud de la transformada de Fourier de la evaporación mensual. Denotando la evaporación como una función del tiempo $Z(t)$, tenemos

$$P(f) = \left| \int_{t_0}^{t_1} Z(t) e^{-i2\pi ft} dt \right|^2, \quad (4)$$

donde t_0 y t_1 son los límites del tiempo sobre el cual se extiende la serie. En el caso del registro de evaporación, el cual se muestrea en intervalos de tiempo discretos, debemos utilizar la versión discreta de la ecuación 4:

$$P(f) = \left| \sum_{t=t_0}^{t_1} Z(t) e^{-i2\pi ft} \right|^2. \quad (5)$$

El siguiente paso es obtener una relación entre la potencia β y la dimensión fractal D . Considerando dos series de tiempo $Z_1(t)$ y $Z_2(t)$ relacionadas por

$$Z_2(t) = \frac{1}{r^H} Z_1(rt); \quad (6)$$

se puede observar que $Z_1(t)$ tiene las mismas propiedades estadísticas que $Z_2(t)$, y ya que Z_2 es una versión reescalada de Z_1 , sus densidades espectrales también deben reescalarsen. Por tanto, podemos escribir

$$P(f) = \frac{1}{r^{2H+1}} P\left(\frac{f}{r}\right). \quad (7)$$

Resulta que

$$\beta = 2H + 1 = 5 - 2D_s, \quad (8)$$

$$D_s = \frac{5 - \beta}{2}, \quad (9)$$

y

$$H = 2 - D_s, \quad (10)$$

donde D_s denota la dimensión fractal estimada a partir del espectro de potencias y H es el exponente de Hurst.

Ya que el periodograma es una estimación pobre del espectro de potencias debido a que la estimación del espectro de potencias en cualquier frecuencia es muy ruidosa, con la amplitud del ruido proporcional al espectro de potencias, preferimos utilizar el artefacto de promediar los periodogramas para obtener 50 intervalos logarítmicos regulares de los dos registros (series completas y series parciales). Más aún, utilizamos la transformación “suma corrida” para incrementar la pendiente por un factor de +2, así, el exponente de Hurst y la dimensión fractal D_s de los datos graficados tendrán una pendiente entre -1 y 1 en la gráfica log-log.

En la práctica, para obtener una estimación de la dimensión fractal D_s , se calcula el espectro de potencias $P(f)$ (donde $f = 2p/l$ es el número de onda, y l es la longitud de onda), y se grafica el logaritmo de $P(f)$ contra los logaritmos de f . Si el perfil es autoafín, la gráfica debería seguir una línea recta con pendiente negativa $-\beta$ (Valdez-Cepeda *et al.*, 2003ab).

El análisis fractal se llevó a cabo mediante el software Benoit Versión 1.3 (TruSoft International Inc, 1999). Las frecuencias importantes de las anomalías de evaporación se estimaron utilizando la gráfica de densidad de espectro de potencias $\Phi_x(f)$ versus la frecuencia tomando en cuenta los picos significativos ($p < 0.05$) mediante el software OriginPro versión 8 SR0 (Originlab, 2007).

Resultados

Tendencias lineales

En el presente estudio un procedimiento de regresión lineal simple se efectuó en 35 series de tiempo de evaporación mensual medida en tanque evaporímetro con el objeto de obtener sus modelos lineales tal como el que se aprecia en la Figura 1. Las generalidades de las estaciones y los resultados del análisis de tendencias se presentan en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Generalidades de las estaciones meteorológicas y análisis de tendencias lineales para el período enero de 1970 a diciembre de 2010.

Estación	Latitud	Longitud	Altitud (msn)	Y = a+bx		
	Norte	Oeste		a	b	p
Calera	22° 54' 00"	102° 39' 00"	2192	-718.4471	0.4574	5.82E-02
Cedros	24° 40' 43"	101° 46' 26"	1763	-1982.8467	1.0816	1.68E-09
Chalchihuites	23° 14' 27"	102° 34' 31"	2060	-968.1773	0.5681	1.21E-03
Col. González Ortega	23° 57' 22"	103° 27' 02"	2190	-180.7542	0.1751	0.36991
El Cazadero	23° 41' 35"	103° 26' 50"	1898	-565.8938	0.3685	0.07745
El Platanito	22° 36' 43"	104° 03' 05"	990	-2287.0189	1.2500	3.50E-06
El Rusio	22° 26' 34"	101° 47' 09"	2104	1766.573	-0.7965	7.01E-05
El Sauz	23° 10' 46"	103° 01' 26"	2090	-469.9876	0.3176	1.47E-01
Excámé III	21° 38' 58"	103° 20' 23"	1740	770.9165	-0.3121	0.13941
Fresnillo	23° 10' 22"	102° 56' 26"	2195	2599.6468	-1.2137	3.28E-07
Gral. Gpe. Victoria	22° 23' 43"	101° 49' 52"	2183	2033.2381	-0.9383	6.04E-08
Gruñidora	24° 16' 19"	101° 53' 05"	1825	-1961.9548	1.0655	1.69E-06
Huanusco	21° 46' 01"	102° 58' 07"	1495	1761.7594	-0.7974	9.22E-05
Jerez	22° 38' 31"	103° 00' 05"	2098	2960.4031	-1.4018	3.53E-11
Jiménez del Teul	23° 15' 18"	103° 47' 54"	1900	577.2975	-0.2091	2.57E-01
Juchipila	21° 23' 14"	103° 06' 53"	1270	1925.9457	-0.8745	3.33E-05
La Florida	22° 41' 10"	103° 36' 09"	1870	588.7498	-0.2236	0.26005
La Villita	21° 36' 08"	103° 20' 13"	1790	2207.4950	-1.0215	1.64E-05
Loreto	22° 16' 50"	101° 56' 50"	2029	291.1077	-0.0656	0.74265
Monte Escobedo	22° 19' 32"	103° 29' 38"	2190	1649.9908	-0.7496	5.08E-04
Ojocaliente	22° 24' 38"	102° 16' 09"	2050	-244.5616	0.2032	0.2644
Palomas	22° 20' 47"	102° 47' 48"	2030	192.5257	0.0024	0.99247
Pinos	22° 16' 54"	101° 34' 47"	2408	-2145.3613	1.1605	7.48E-11
Presa El Chique	22° 00' 00"	102° 53' 23"	1620	3261.9937	-1.5454	1.74E-10
Ramón López Velarde	24° 49' 25"	102° 57' 06"	2045	-220.7966	0.1982	0.34968
San Gil	24° 11' 43"	102° 58' 36"	1810	1567.3441	-0.6943	0.00153
Santa Rosa	22° 55' 34"	103° 06' 47"	2240	846.5304	-0.3372	1.23E-01
Tayahua	22° 07' 13"	102° 51' 46"	1549	1157.7751	-0.4928	0.009
Teul de González O.	21° 27' 42"	103° 27' 52"	1900	1666.9733	-0.7633	1.13E-04
Tlaltenango	21° 46' 54"	103° 17' 45"	1700	2171.8852	-1.0101	2.43E-07
Villa de Cos	23° 17' 26"	102° 20' 44"	2050	-920.4686	0.5546	0.01514
Villa García	22° 10' 10"	101° 57' 27"	2120	1920.1525	-0.8812	4.17E-06
Villa Hidalgo	22° 20' 49"	101° 42' 55"	2167	1714.9100	-0.7705	2.81E-04
Villanueva	22° 21' 43"	102° 53' 22"	1920	-262.5099	0.2207	0.31012
Zacatecas	22° 45' 39"	102° 34' 30"	2485	2365.3506	-1.0961	6.55E-08

Tendencias lineales significativas a $p < 0.05$ están en negritas

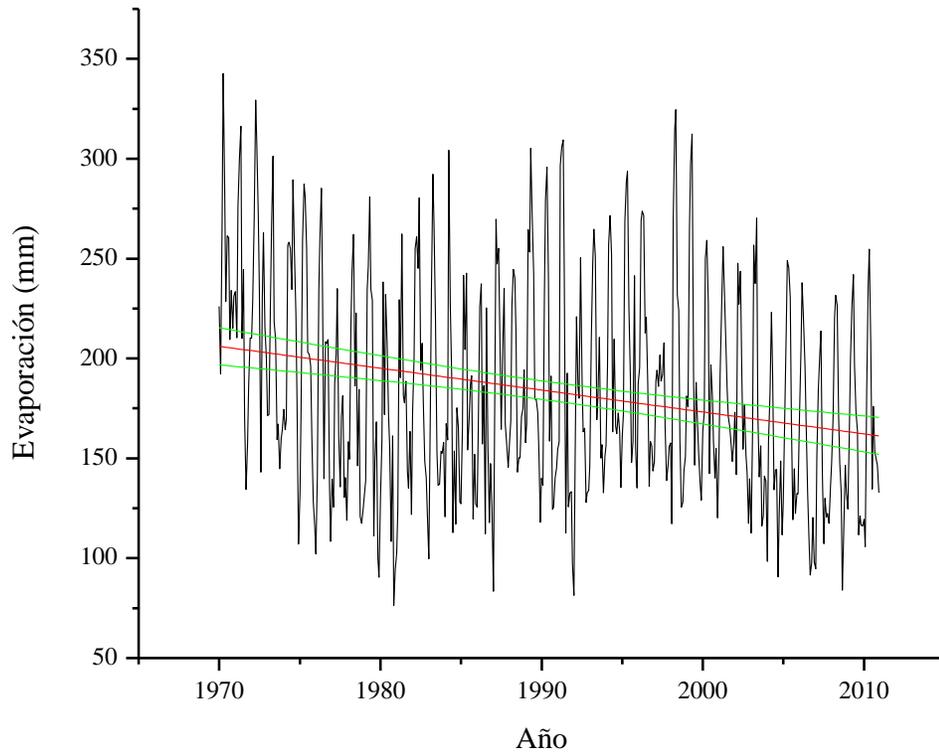


Figura 1. Serie de tiempo de evaporación mensual registrada en Zacatecas, Zac., México de enero de 1970 a diciembre de 2010. La línea ajustada $Y = 2365.35 - 1.09X$ se utilizó para estimar la tendencia anual de $-1.09 \text{ mm año}^{-1}$.

Se obtuvieron tendencias negativas lineales para 21 de 35 series de tiempo de evaporación; 18 de 21 tendencias negativas fueron significativas a $p < 0.05$. Por otra parte, 14 tendencias de evaporación fueron positivas, pero solo 8 de ellas fueron significativas a un nivel $p < 0.05$.

La tendencia general media fue de $-0.24 \text{ mm año}^{-1}$. Adicionalmente, la media de las tendencias significativas positivas de evaporación fue de 1.03 mm año^{-1} , y la media de las tendencias significativas negativas de evaporación fue de $-0.94 \text{ mm año}^{-1}$.

Análisis de espectro de potencias

Los valores estadísticos de fractalidad de las series de tiempo de evaporación se presentan en el Cuadro 2. Las series de tiempo de las anomalías de evaporación fueron analizadas y se obtuvieron líneas rectas en la gráfica log-log (Figura 2) con pendiente $-\beta$ variando de -2.07 a -2.92 , sugiriendo que $P(f) \propto f^{-\beta}$. Por lo tanto, significa que el espectro es singular y está representado por una curva en el plano complejo en todos los 35 casos. Los valores de D_s variaron de 1.04 a 1.46, y los valores

de H variaron de 0.54 a 0.96. Así, el ruido en esas series de evaporación tiende a tener un comportamiento persistente o con memoria de largo plazo (de la Fuente *et al.*, 1999). Como un resultado, encontramos que la variación de largo plazo es más importante que la variación de corto plazo en todos los perfiles de evaporación analizados.

Frecuencias importantes

Las gráficas de densidad del espectro de potencias, $\Phi_x(f)$ *versus* frecuencia tal como el que se muestra en la Figura 2, nos permitió identificar las frecuencias dominantes (1/año) en las series de anomalías de evaporación, que parecen ser importantes en el proceso de evaporación. El Cuadro 2 nos muestra los resultados de las frecuencias dominantes en el total de las series analizadas. Los lectores deben tomar nota de que este enfoque nos da algunos componentes de frecuencia que no toman en cuenta tiempo y longitud, porque este análisis nos da una resolución en frecuencia que está determinada por el tamaño de ventana en toda la serie de tiempo analizada. En otras palabras, los resultados como los que se muestran en la Figura 2 proporcionan información útil acerca de los contenidos de frecuencia de la serie analizada, pero no indican en que tiempo ocurren esas frecuencias.

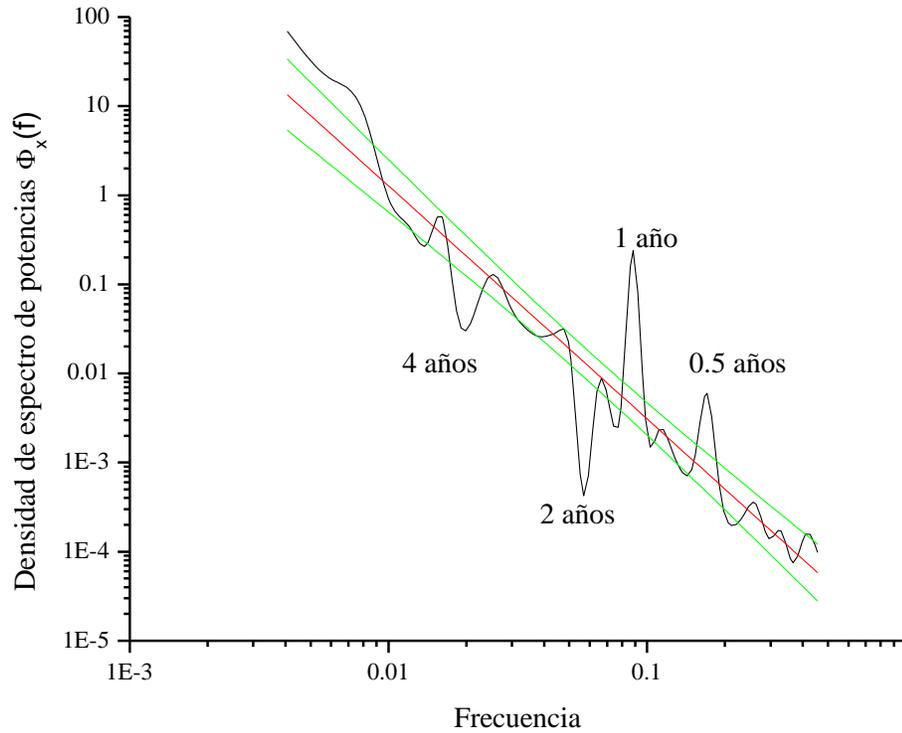


Figura 2. Espectro de potencias de la serie de tiempo de anomalías de evaporación registrada en Zacatecas, Zac., México de junio de 1970 a diciembre de 2010. La densidad del espectro de potencias está dada como una función de la frecuencia para una escala de tiempo de 2 a 480 meses. La línea ajustada se utilizó para estimar la dimensión fractal (D_s). $Y = -5.128 \cdot X^{-2.617}$, r^2 ajustada = 0.89. $D_s = [(5 - \beta)/2]$; $D_s = [(5 - 2.617)/2]$; $D_s = 1.192$.

Cuadro 2. Estadísticos de auto-afinidad (Dimensión fractal, D_s ; exponente de Hurst, H ; y pendiente, $-\beta$) y frecuencias identificadas (años) para las series de tiempo de anomalías de evaporación de estaciones climatológicas del estado de Zacatecas, México.

Estación	Parámetros de auto-afinidad			Frecuencias identificadas										
	D_s	H	$-\beta$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Calera	1.218	0.782	2.565	x	x			x						
Cedros	1.215	0.785	2.571	x		x	x			x				
Chalchihuites	1.172	0.828	2.656	x		x				x				
Col. Glz. Ortega	1.183	0.817	2.634	x										
El Cazadero	1.347	0.653	2.307	x			x							
El Platanito	1.308	0.692	2.385	x								x		
El Rusio	1.325	0.675	2.349	x		x		x						
El Sauz	1.287	0.713	2.426	x		x		x						
Excámé III	1.277	0.723	2.446	x	x		x	x						
Fresnillo	1.313	0.687	2.374	x		x	x							
Guadalupe Victoria	1.325	0.675	2.351	x			x		x					
Gruñidora	1.151	0.849	2.698	x				x	x					
Huanusco	1.297	0.703	2.406	x				x		x		x		

Estación	Parámetros de auto-afinidad			Frecuencias identificadas										
	Ds	H	-β	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Jeréz	1.039	0.961	2.923	x				x						
Jiménez del Téul	1.295	0.705	2.409	x		x		x	x					
Juchipila	1.315	0.685	2.370	x									x	
La Florida	1.394	0.606	2.211	x										
La Villita	1.333	0.667	2.335	x	x		x				x			
Loreto	1.133	0.867	2.735	x	x									
Monte Escobedo	1.231	0.769	2.538	x		x	x	x		x				
Ojocaliente	1.213	0.787	2.574	x	x		x							
Palomas	1.463	0.537	2.074	x										
Pinos	1.265	0.735	2.470	x			x	x	x					
El Chique	1.378	0.622	2.245	x	x					x				
Ramón López V.	1.233	0.767	2.533	x	x	x								
San Gil	1.214	0.786	2.572	x							x			
Santa Rosa	1.359	0.641	2.282	x										
Tayahua	1.287	0.713	2.427	x						x				x
Téul de González O.	1.278	0.722	2.445	x		x								x
Tlaltenango	1.250	0.750	2.501	x					x					
Villa de Cos	1.196	0.804	2.609	x						x				
Villa García	1.264	0.736	2.473	x										
Villa Hidalgo	1.135	0.865	2.730	x		x			x		x			x
Villanueva	1.226	0.774	2.549	x		x		x						
Zacatecas	1.192	0.808	2.617	x	x		x							

En todas las series de tiempo de anomalías de evaporación, la frecuencia anual se presentó en el espectro de potencias. Este resultado es evidente porque el proceso de evaporación está fuertemente influenciado por el movimiento de la tierra alrededor del sol que ocasiona las estaciones. En 8 de 35 series el ciclo cuasi-bianual estuvo presente. El ciclo cuasi-bianual es un ciclo de 26 meses que se explica por la inversión del viento en la estratósfera baja del polo norte y la actividad solar (Labitske y van Loon, 1989; Mendoza *et al.*, 2001). El posible efecto de un evento periódico como ‘El Niño Oscilación del Sur’ (ENOS) con un ciclo errático de 3 a 5 años (Weber y Talkner, 2001), de 3 a 6 años (Monetti *et al.*, 2003) o 2 a 7 años (Zubair, 2002; MacMynowski y Tziperman, 2008) se presentó en 29 de 35 series. El posible efecto del ciclo de manchas solares que varía de 8 a 14 años (Mendoza *et al.*, 2001) con un promedio de largo plazo de 11.3 años estuvo presente en 9 series de tiempo.

Discusión

Como señalamos previamente, la evaporación medida en tanque evaporímetro se ha estado decrementando en varios lugares alrededor del planeta durante los últimos 50 años (Lawrimore y

Peterson, 2000; Roderick y Farquhar, 2004; Brutsaert, 2006). En este siglo muchos estudios han mostrado tendencias locales de decremento en la evaporación del tanque evaporímetro, particularmente Johnson y Charma (2010), resumieron algunas tendencias generales anuales negativas del tanque evaporímetro: Australia (-2 mm año^{-1}), New Zealand (-2.1 mm año^{-1}), China (-2.9 mm año^{-1}), ex-Unión Soviética (-4 mm año^{-1}); el caso de los Estados Unidos de América se encontró en un rango de aproximadamente -1.5 a -2 mm año^{-1} . También, Gifford *et al.* (2005) consignaron un rango de -2 a -4 mm año^{-1} para el hemisferio norte.

En el presente estudio se encontraron tendencias lineales negativas para 21 de 35 series de tiempo de evaporación; 16 de esas 21 tendencias negativas fueron significativas a $p < 0.05$. Por otro lado, 14 tendencias de series de tiempo de evaporación fueron positivas, pero solo 5 fueron significativas a $p < 0.05$. Estos resultados sugieren que las tendencias negativas prevalecen sobre las tendencias positivas cuando se toma en cuenta las series de tiempo de evaporación de tanque evaporímetro en el estado de Zacatecas, México. Estos hallazgos extienden los de Linacre (2004), Gifford *et al.* (2005), Johnson y Charma (2010) y Blanco-Macías *et al.* (2011) quienes reportaron tendencias lineales negativas en series de tiempo de evaporación para Australia, Nueva Zelanda, China, la ex-Unión Soviética, los Estados Unidos de América y México.

Los resultados presentados en este trabajo de investigación, son evidencia contundente que en la mayoría de las series analizadas (21 de 35) se manifiesta el fenómeno conocido como “Paradoja de la evaporación” es decir que se presentan decrementos en la evaporación medida en el tanque evaporímetro pese a incrementos globales de temperatura. Los datos de temperatura de la superficie terrestre y oceánica, combinados y promediados globalmente, calculados a partir de una tendencia lineal, muestran un calentamiento de $0.85 [0.65 \text{ a } 1.06] \text{ }^\circ\text{C}$, durante el período 1880-2012 (IPCC, 2015). La disminución de la evaporación del tanque indica un aumento de la evaporación real del medio ambiente sin humedad circundante, que indican que la evaporación real y la evaporación del tanque mostraron una relación complementaria en lugar de una relación proporcional (Brutsaert y Parlange, 1998). Los resultados de tendencia en la evaporación medida en tanque evaporímetro en Zacatecas confirman el hecho de que el cambio climático difiere de elemento climático a elemento climático y de región a región (Yunling y Yiping 2005).

Por otra parte, los resultados del análisis fractal proveen evidencia convincente de que el ruido en esas series mensuales de evaporación de tanque evaporímetro tiende a tener un comportamiento

persistente (memoria de largo plazo, $D_s < 1.5$), lo cual sugiere que la variación de largo plazo es más importante que la variación de corto plazo en todos los perfiles de evaporación analizados.

Adicionalmente, las frecuencias importantes detectadas en nuestro estudio parecen estar relacionadas con el ciclo anual, el ciclo cuasi-bianual, el fenómeno ENOS (2 a 7 años) y el ciclo de manchas solares (8 a 14 años).

Conclusiones y Recomendaciones

Las tendencias negativas prevalecen sobre las tendencias positivas cuando se toma en cuenta las series de tiempo de evaporación de tanque evaporímetro en el estado de Zacatecas, México. Estos resultados confirman el hecho de que el cambio climático difiere de elemento climático a elemento climático y de región a región. La variación de largo plazo es más importante que la variación de corto plazo en todos los perfiles de evaporación analizados. Las frecuencias importantes detectadas en las anomalías de evaporación parecen estar relacionadas con fenómenos periódicos como el ciclo anual, el ciclo cuasi-bianual, el fenómeno ENOS y el ciclo de manchas solares. Las anteriores conclusiones son temas importantes a tomar en cuenta para incrementar el conocimiento acerca del comportamiento de las series de tiempo de evaporación medida en tanque evaporímetro. Trabajo futuro pudiera analizar las series de tiempo de evaporación utilizando registros diarios o bien, explorar otras técnicas de cálculo de tendencias lineales en series de tiempo tales como los métodos no paramétricos de Mann-Kendall y la pendiente de Sen, así como el uso del análisis de ondeletas para corroborar la posible relación de las series de tiempo de evaporación con fenómenos periódicos.

Agradecimientos

Los autores agradecen el soporte financiero a FoMix Zacatecas–CoNaCyT proyecto M0024–2005–1–16085.

Referencias

Brutsaert, W., M. B. Parlange (1998), Hydrologic cycle explains the evaporation paradox, *Nature*, 396, 30.

Brutsaert W. (2006). Indications of increasing land surface evaporation during the second half of the 20th century. *Geophys. Res. Lett.* 33: L20403. doi:10.1029/2006GL027532.

- Blanco-Macías, F., R. D. Valdez-Cepeda, R. Magallanes-Quintanar (2011). Pan evaporation analysis in central Mexico: Trends, self-affinity and important frequencies. *International Journal of Physical Sciences*, 6(3), 540-549.
- Chattopadhyay N., M. Hulme (1997). Evaporation and potential evapotranspiration in India under conditions of recent and future climate. *Agric. Forest Meteorol.* 187: 55–73.
- De la Fuente I.M., L. Martínez, J. M. Aguirregabiria, J. Veguillas, M. Iriarte M (1999). Long-range correlations in the phase-shifts of numerical simulations of biochemical oscillations in experimental cardiac rhythms. *J. Biol. Systems* 7:113–130.
- Dimri, V. P. (2005). *Fractals in geophysics and seismology: an introduction* (pp. 1-22). Springer Berlin Heidelberg.
- Evertsz C.J.G., K. Berkner. (1995). Large deviation and self-similarity analysis of curves: DAX stock prices. *Chaos, Solitons & Fractals* 6:121–130.
- Gamma Design Software. (1999). *GS+ Geostatistics for the Environmental Sciences*. (Version 3.5). <https://www.gammasdesign.com/default.aspx>
- Gifford R.M., D. F. Graham, N. Neville, L. R. Michael. (2005). Workshop summary on pan evaporation: An example of the detection and attribution of climate change variables. In: Gifford R.M. (editor). *Pan Evaporation: An Example of the Detection and Attribution of Trends in Climate Variables*.
- Hausdorff J.M., C–K Peng. (1996). Multiscaled randomness: A possible source of 1/f noise in biology. *Phys. Rev. E* 54: 2154–2157.
- Huntington T.G. (2006). Evidence for intensification of the global water cycle: Review and synthesis. *J. Hydrol.* 319: 83–95.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2015). *Climate Change 2014, Synthesis Report*. IPCC, 2014.
- Johnson F., A. Sharma (2010). A Comparison of Australian Open Water Body Evaporation Trends for Current and Future Climates Estimated from Class A Evaporation Pans and General Circulation Models. *J. Hydrometeorology* 11:105–121.
- Labitske K., H. van Loon. (1989). Associations between the 11-year solar cycle, the QBO and the atmosphere. Part I: The troposphere and stratosphere in the northern hemisphere in winter. *J. Atmosph. & Solar-Terr. Phys.* 50: 197–206.
- Lawrimore J.H., T. C. Peterson. (2000). Pan evaporation trends in dry and humid regions of the United States. *J. Hydrometeor.* 1: 543–546.
- Linacre E.T. (2004). Evaporation trends. *Theor. Appl. Climatol.* 79: 11–21.
- MacMynowski D.G., E. Tziperman (2008). Factors affecting ENSO's period. *J. of the Atmospheric Sciences* 65: 1570–1586.
- Mandelbrot B.B. (1982). *The Fractal Geometry of Nature*. W.H. Freeman, New York.
- Mendoza B., A. Lara, D. Maravilla, E. Jáuregui (2001). Temperature variability in central México and its possible association to solar activity. *J. Atmosph. and Solar-Terr. Phys.* 63: 1891–1900.

- Monetti R.A., S. Havlin, A. Bunde. (2003). Long-term persistence in sea-surface temperature fluctuations. *Physica A*. 320: 581–589.
- Moreira J.G., L. D. S. J. Kamphorst, K. S. Oliffson. (1994). On the fractal dimension of self-affine profiles, *J. Phys. A: Math. Gen.* 27: 8079–8089.
- Muhlbauer, A., P. Spichtinger, P., U. Lohmann. (2009). Application and comparison of robust linear regression methods for trend estimation. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 48(9), 1961-1970.
- Mutziger A.J., C. M. Burt, D. J. Howes, R. G. Allen. (2005). Comparison of measured and FAO-56 modeled evaporation from bare soil, *J. Irrigation and Drainage Engineering* 131(1): 59–72.
- Originlab (2007). Origin (Versión SR0 8). <http://www.originlab.com/>
- Peng C-K, S. V. Buldyrev, S. Havlin, M. Simons, H. E. Stanley, A. L. Goldberger. (1994). Mosaic organization of DNA nucleotides. *Phys. Rev. E* 49: 685–1689.
- Quintana-Gomez R.A. (1998). Changes in evaporation patterns detected in northernmost South America. *Proc. 7th Int. Meeting on Statistical Climatology*. Whistler, BC, Canada, Institute of Mathematical Statistics, p. 97.
- Roderick M.L., G. D. Farquhar. (2004). Changes in Australian pan evaporation from 1970 to 2002. *Int. J. Climatol.* 24: 1077–1090.
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) (2008). Volúmenes de recarga y extracción de acuíferos sobreexplotados. http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/cd_compendio08/compendio_2008/compendio2008/10.100.8.236_8080/archivos/03_Dimension_ambiental/01_Agua/D3_AGUA02_02.pdf. Downloaded 11th January, 2011.
- Trömel, S., C. D. Schönwiese. (2008). Robust trend estimation of observed German precipitation. *Theoretical and Applied Climatology*, 93(1-2), 107-115.
- Turcotte D.L. (1992). *Fractals and Chaos in Geology and Geophysics*. Cambridge University Press, Cambridge.
- TruSoft International Inc. (1999). Benoit Fractal Analysis System (Versión 1.3). <http://trusoft-international.com/index.html>
- Valdez-Cepeda RD, D. Hernández-Ramírez, B. Mendoza, J. Valdés-Galicia, D. Maravilla. (2003a). Fractality of monthly extreme minimum temperature. *Fractals* 11: 137–144.
- Valdez-Cepeda R.D., B. Mendoza, R. Díaz-Sandoval, J. Valdés-Galicia, J. D. López-Martínez, E. Martínez-Rubín de Celis. (2003b). Power-spectrum behavior of yearly mean grain yields. *Fractals* 11(3): 295–301.
- Weber R. O., P. Talkner. (2001). Spectra and correlations of climate data from days to decades. *J. Geophys. Res. D*. 106: 20131–20144.
- Wilks D. S. (2011). *Statistical Methods in the Atmospheric science*. Academic Press. ISBN 0–12–751965–3 (page 42).
- Yunling, H., Z. Yiping. (2005). Climate change from 1960 to 2000 in the Lancang River Valley, China. *Mountain Research and Development*, 25(4), 341-348.

Zubair L. (2002). El Niño Southern Oscillation influences on rice production in Sri Lanka. *Int. J. Climatol.* 22: 249–260.

