

ANÁLISIS DE LA EVAPORACIÓN EN EL CENTRO DE MÉXICO: TENDENCIAS, AUTO-AFINIDAD Y FRECUENCIAS IMPORTANTES

Magallanes Quintanar R^{1,*}, Valdez Cepeda RD^{2,3}, Blanco Macías F³

¹Universidad Autónoma de Zacatecas, Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica. Ave. Ramón López Velarde 801, CP 98064, Zacatecas, Zac., México. Tel:+52 492 9239407 ext. 1215. tiquis@gmail.com

²Universidad Autónoma Chapingo, Centro Regional Universitario Centro-Norte. Calle Cruz del Sur No. 100, Col. Constelación. Apdo. Postal 196, CP 98085, El Orito, Zacatecas, Zac., México.

³Universidad Autónoma de Zacatecas, Unidad Académica de Matemáticas. Calzada Solidaridad s/n. CP 98064, Zacatecas, Zac., México.

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 and Farquhar, 2004), lo cual sugiere una disminución reciente en la evaporación terrestre componente del ciclo hidrológico, (Lawrimore and 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, existe 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 ha esperado que la evaporación se incremente en el futuro debido al incremento de las temperaturas debido al 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 decreciendo (Chattopadhyay and Hulme, 1997; Quintana-Gomez, 1998; Linacre, 2004).

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 201,100,000 m³ 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. Por lo tanto, los objetivos de este estudio fueron: 1) Identificar las tendencias de 40 series de largo plazo de evaporación registrada en estaciones meteorológicas en el estado de Zacatecas, México y 2) Identificar frecuencias importantes y su posible conexión con fenómenos periódicos de las series de anomalías de largo plazo de evaporación por medio del análisis de espectro de potencia.

MATERIAL Y METODOS

Datos

Los datos originales fueron registros de largo plazo de evaporación. Se colectaron esos conjuntos de datos de 40 estaciones meteorológicas ubicadas en el territorio del estado de Zacatecas, México. 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.

Cuadro 1. Generalidades de las estaciones meteorológicas y análisis de tendencias lineales

Estación	Coordenadas	msnm	Periodo	Meses	Y = a + bx	
					a	b
Cedros	24° 40' 43" N 101° 46' 26" W	1763	Jan 1979–Nov 2005	431	-2524.44	1.35 (p=5.03E-10)
Chalchihuites	23° 14' 27" N 102° 34' 31" W	2060	Nov 1966–Dec 2005	470	-1763.17	0.97 (p=0.142269)
Col. González Ortega	23° 57' 22" N 103° 27' 02" W	2190	Jan 1970–Oct 2003	406	-1113.10	0.65 (p=0.01446)
El Cazadero	23° 41' 35" N 103° 26' 50"	1898	Jun 1959– Dec 2005	564	-244.20	0.21 (p=0.22826)
El Platanito	22° 36' 43" N 104° 03' 05" W	990	Jul 1957–Dec 2005	582	1290.05	0.75 (p=2.20E-4)

III CONGRESO INTERNACIONAL SOBRE CAMBIO CLIMATICO Y DESARROLLO SUSTENTABLE

Estación	Coordenadas	msnm	Periodo	Meses	Y = a + bx	
					a	b
El Rusio	22° 26' 34" N 101° 47' 09" W	2104	Jan 1967–Dec 2005	468	1400.71	-0.61 (p=0.00362)
El Sauz	23° 10' 46" N 103° 01' 26" W	2090	Jan 1947–Dec 2005	707	1139.34	-0.49 (p=0.546E-5)
Excame III	21° 38' 58" N 103° 20' 23" W	1740	Jan 1946–Nov 2005	719	2656.99	-1.26 (p=0)
Fresnillo	23° 10' 22" N 102° 56' 26" W	2195	Sep 1949–Dec 2005	676	1348.22	-0.59 (p=4.47E-5)
Gral. Guadalupe Victoria	22° 23' 43" N 101° 49' 52" W	2183	Jan 1966–Dec 2005	480	1529.21	-0.69 (p=8.40E-5)
Gruñidora	24° 16' 19" N 101° 53' 05" W	1825	Jan 1963–Dec 2005	516	-2164.86	1.17 (p=2.77E-8)
Huanusco	21° 46' 01" N 102° 58' 07" W	1495	Jan 1972–Feb 2005	398	1748.48	-0.79 (p=0.00518)
Jerez	22° 38' 31" N 103° 00' 05" W	2098	Aug 1962–Dec 2005	521	3909.85	-1.88 (p=0)
Jiménez del Téul	23° 15' 18" N 103° 47' 54" W	1900	Aug 1962–Dec 2005	520	1298.81	-0.57 (p=5.09E-4)
Juchipila	21° 23' 14" N 103° 06' 53" W	1270	Jan 1947–Dec 2005	708	807.32	-0.31 (p=0.00765)
La Florida	22° 41' 10" N 103° 36' 09" W	1870	Jul 1954–Nov 2005	617	89.56	0.03 (p=0.84511)
La Villita	21° 36' 08" N 103° 20' 13" W	1790	Jul 1957–Dec 2005	582	1460.08	-0.65 (p=5.14E-4)
Loreto	22° 16' 50" N 101° 56' 50" W	2029	Jan 1963–Dec 2005	516	252.36	0.21 (p=0.25449)
Monte Escobedo	22° 19' 32" N 103° 29' 38" W	2190	Sep 1963–Dec 2005	508	1489.13	-0.67 (p=8.40E-4)
Nochistlán de Mejía	21° 21' 55" N 103° 50' 32" W	1850	Oct 1949–Jun 2001	621	114.57	0.03 (p=0.83059)
Ojocaliente	22° 24' 38" N 102° 16' 09" W	2050	Aug 1959–May 2006	562	57.33	0.05 (p=0.71859)
Palomas	22° 20' 47" N 102° 47' 48" W	2030	Mar 1969–Dec 2005	442	423.63	-0.11 (p=0.70594)
Pinos	22° 16' 54" N 101° 34' 47" W	2408	Jan 1947–Mar 2006	711	41.74	0.06 (p=0.54835)
Presa El Chique	22° 00' 00" N 102° 53' 23" W	1620	Jan 1963–Dec 2005	516	2066.01	-0.95 (p=3.78E-5)
San Antonio del Ciprés	22° 56' 08" N 102° 29' 14" W	2145	Jan 1969–Nov 2005	443	53.62	0.07 (p=0.76251)
San Gil	24° 11' 43" N 102° 58' 36" W	1810	Aug 1969–Apr 2006	441	1594.58	-0.71 (p=0.00502)
San Isidro de los González	22° 50' 41" N 103° 22' 57" W	2000	Jan 1976–May 2006	360	710.52	-0.27 (p=0.43297)
San Pedro Piedra Gorda	22° 27' 09" N 102° 20' 49" W	2032	Jan 1943–Jun 2006	762	1302.66	-0.57 (p=6.62E-8)
Santa Lucía	22° 26' 03" N 104° 13' 00" W	2252	Aug 1972–Oct 2004	387	779.50	-0.31 (p=0.29352)
Santa Rosa	22° 55' 34" N 103° 06' 47" W	2240	Jan 1947–Dec 2005	708	1024.98	-0.43 (p=6.01E-4)
Tayahua	22° 07' 13" N 102° 51' 46" W	1549	Jan 1973–Dec 2005	396	1473.74	-0.65 (p=0.01347)
Tecomate	21° 32' 40" N 103° 02' 32" W	1375	Jan 1947–Jul 1997	607	2740.37	-1.29 (p=7.64E-13)
Teúl de González Ortega	21° 27' 42" N 103° 27' 52" W	1900	Oct 1962–Dec 2005	619	1801.34	-0.83 (p=1.91E-6)
Tlaltenango	21° 46' 54" N 103° 17' 45" W	1700	Jul 1949–Dec 2005	678	2119.65	-0.98 (p=1.03E-14)
Trancoso	22° 44' 39" N 102° 22' 10" W	2190	Jun 1950–Nov 1994	534	3839.05	-1.85 (p=0)
Villa de Cos	23° 17' 26" N 102° 20' 44" W	2050	Jan 1962–Dec 2005	528	370.47	-0.10 (p=0.59771)

III CONGRESO INTERNACIONAL SOBRE CAMBIO CLIMATICO Y DESARROLLO SUSTENTABLE

Estación	Coordenadas	msnm	Periodo	Meses	Y = a + bx	
					a	b
Villa García	22° 10' 10" N 101° 57' 27" W	2120	Jan 1959–Oct 2004	550	1130.35	-0.49 (p=0.00251)
Villa Hidalgo	22° 20' 49" N 101° 42' 55" W	2167	Jan 1954–Abr 2006	628	668.92	-0.25 (p=0.07253)
Villanueva	22° 21' 43" N 102° 53' 22" W	1920	Jan 1963–Dec 2005	516	-144.55	0.16 (p=0.40962)
Zacatecas	22° 45' 39" N 102° 34' 30" W	2485	Jun 1963–Dec 2003	633	396.91	-0.11 (p=0.45179)

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

Los conjuntos de datos originales 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 de las series y anomalías de evaporación

Las series de tiempo climáticas son en general no estacionarias, y frecuentemente presentan tendencias de largo plazo. Por lo tanto el remover las tendencias es un punto importante a fin de evitar que el comportamiento no estacionario que acompaña esos datos arroje resultados espurios (Peng et al., 1994; Hausdorff and Peng, 1996). Cuando este paso se lleva a cabo, la nueva serie de tiempo se conoce como serie de tiempo de anomalías (Wilks, 1995).

Las tendencias lineales 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 siguiendo la ecuación 1:

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

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

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 que se define como la fluctuación de la altura sobre una escala de la 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 and 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 de el 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 muestra 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 reescalarse. 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 porque 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 $f = 2^p/l$ f 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).

Las frecuencias importantes de las anomalías de evaporación se estimaron utilizando la gráfica obtenida mediante la densidad de espectro de potencias $\Phi_x(f)$ vs. la frecuencia tomando en cuenta los picos significativos ($p < 0.05$).

RESULTADOS

Tendencias lineales

Como señalamos previamente, la evaporación medida en tanque evaporímetro se ha estado decrementando en varios lugares alrededor del planeta durante los últimos 50 años (See Brutsaert 2006; Roderick y Farquhar 2002; Lawrimore y Peterson 2000). En este siglo muchos estudios han mostrado tendencias locales de decremento en la evaporación del tanque evaporímetro. 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 un procedimiento de regresión lineal simple se efectuó en 40 series de tiempo de evaporación de tanque evaporímetro con el objeto de obtener sus modelos lineales (p.e. Figura 1). Las generalidades de las estaciones y los resultados del análisis de tendencias se presentan en el Cuadro 1.

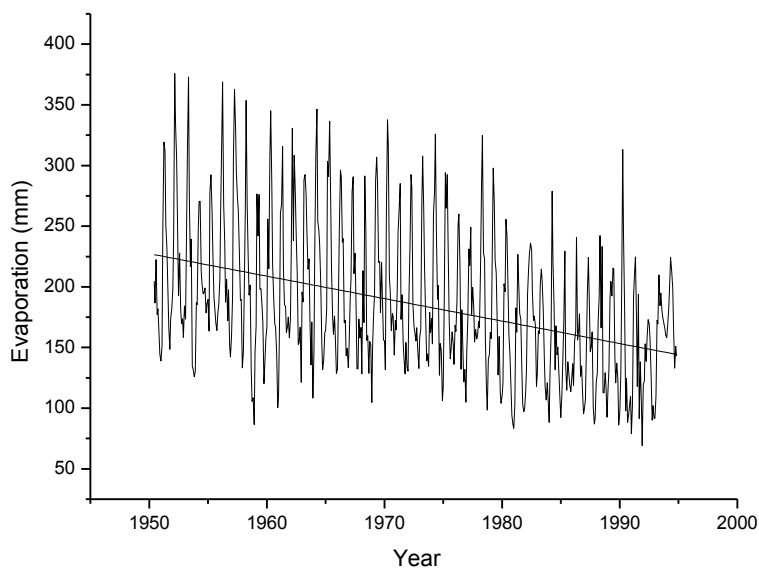


Figura 1.

Serie de tiempo de evaporación mensual registrada en Trancoso, Zac., México de Junio de 1950 a Noviembre de 1994. La línea ajustada $Y = 3849.05 - 1.85X$ se utilizó para estimar la tendencia anual de $-1.85 \text{ mm año}^{-1}$.

Tendencias negativas lineales se obtuvieron para 27 de 40 series de tiempo de evaporación. 18 de 27 tendencias fueron significativas a $p < 0.05$. Por otra parte 13 tendencias de evaporación fueron positivas pero solo 3 fueron significativas a un nivel $p < 0.05$.

La tendencia general media fue de $-0.32 \text{ mm año}^{-1}$; mientras que la media de todas las tendencias significativas fue de $-0.53 \text{ mm año}^{-1}$. Adicionalmente, la media de las tendencias significativas crecientes de evaporación fue de 1.09 mm año^{-1} , y la media de las tendencias significativas decrecientes de evaporación fue de $-0.79 \text{ mm año}^{-1}$.

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 con tendencias significativas (23 de 40) fueron analizadas y se obtuvieron líneas rectas en la gráfica log-log con pendiente ($-\beta$) variando de -2.36 a -2.83 , 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 23 casos. Los valores de D_s variaron de 1.32 a 1.48, y los valores de H variaron de 0.52 a 0.68. Así, el ruido en esas series de evaporación tiende a tener un comportamiento persistente (memoria de largo plazo) (de la Fuente et al., 1999). Como un resultado, encontramos que la variación de

III CONGRESO INTERNACIONAL SOBRE CAMBIO CLIMATICO Y DESARROLLO SUSTENTABLE

largo plazo es más importante que la variación de corto plazo en todos los perfiles de evaporación analizados.

Cuadro 2. Estadísticos de auto-afinidad (Dimensión fractal, D_s ; exponent de Hurst, H ; y pendiente, $-\beta$) y frecuencias identificadas (años) para las series de tiempo de anomalías de evaporación con tendencias lineales significativas.

Estación	Coordenadas	Parametros de auto-afinidad			Períodos (años) de las frecuencias importantes identificadas													
		D_s	H	$-\beta$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Cedros	24° 40' 43" N 101° 46' 26" W	1.32	0.68	2.36	1.0	2.0	3.7	4.0										
El Platanito	22° 36' 43" N 104° 03' 05" W	1.32	0.68	2.36	1.0	2.0	3.0	4.0			7.0							
El Rusio	22° 26' 34" N 101° 47' 09" W	1.27	0.73	2.46	1.0		3.0	4.0		6.0				11.0				
El Sauz	23° 10' 46" N 103° 01' 26" W	1.27	0.73	2.45	1.0					5.0	6.0	7.0		10.0			13.0	
Excame III	21° 38' 58" N 103° 20' 23" W	1.20	0.81	2.61	1.0	2.0	3.0			6.0		8.0		11.0				
Fresnillo	23° 10' 22" N 102° 56' 26" W	1.48	0.52	2.04	1.0	2.0		4.0		6.0	7.0		9.0					14.0
Gral. Guadalupe Victoria	22° 23' 43" N 101° 49' 52" W	1.30	0.70	2.40	1.0	2.0	3.0	4.0		6.0		8.0						13.0
Gruñidora	24° 16' 19" N 101° 53' 05" W	1.15	0.85	2.70	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0		7.0			11.0				
Huanusco	21° 46' 01" N 102° 58' 07" W	1.31	0.70	2.39	1.0	2.0		4.0		6.0				11.0				
Jerez	22° 38' 31" N 103° 00' 05" W	1.09	0.91	2.83	1.0		3.0	4.0	5.0		7.0			10.0				14.0
Jiménez del Téul	23° 15' 18" N 103° 47' 54" W	1.25	0.75	2.50	1.0	2.0	3.0	4.0		6.0				11.0				
Juchipila	21° 23' 14" N 103° 06' 53" W	1.28	0.72	2.44	1.00	2.7	3.7	4.2	5.0					10.3				

III CONGRESO INTERNACIONAL SOBRE CAMBIO CLIMATICO Y DESARROLLO SUSTENTABLE

Estación	Coordenadas	Parametros de auto-afinidad			Periodos (años) de las frecuencias importantes identificadas													
		Ds	H	-β	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
La Villita	21° 36' 08" N 103° 20' 13" W	1.42	0.59	2.17	1.0	2.6	3.0		5.6		7.0	8.7						
Monte Escobedo	22° 19' 32" N 103° 29' 38" W	1.26	0.74	2.48	1.0		3.0	4.7	5.8		7.0							14.0
Presa El Chique	22° 00' 00" N 102° 53' 23" W	1.17	0.83	2.66	1.0	2.0		4.0			7.0		9.7					
San Gil	24° 11' 43" N 102° 58' 36" W	1.27	0.73	2.47	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0									
San Pedro Piedra Gorda	22° 27' 09" N 102° 20' 49" W	1.21	0.79	2.58	1.0	2.0		4.0				8.0					12.0	
Santa Rosa	22° 55' 34" N 103° 06' 47" W	1.39	0.61	2.22	1.0	2.0	3.3	4.0			7.0	8.0						
El Tecamate	21° 32' 40" N 103° 02' 32" W	1.21	0.79	2.58	1.0	2.0	3.0				7.0							
Teúl de González Ortega	21° 27' 42" N 103° 27' 52" W	1.27	0.74	2.47	1.0	2.0	3.5	4.0	5.5	6.3	7.8							
Tlaltenango	21° 46' 54" N 103° 17' 45" W	1.27	0.73	2.45	1.0	2.0	3.0	4.7			7.0	8.3	9.7					
Trancoso	22° 44' 39" N 102° 22' 10" W	1.33	0.67	2.33	1.0		3.0	4.0					9.0					
Villa García	22° 10' 10" N 101° 57' 27" W	1.28	0.72	2.44	1.0	2.8		4.2	5.3		7.0		9.5					

Frecuencias importantes

Las gráficas de densidad del espectro de potencias, $\Phi_x(f)$ versus frecuencia nos permitió identificar las frecuencias dominantes en las series de anomalías de evaporación, en términos de frecuencias dominantes (1/año) que parecen ser importantes en el proceso de evaporación. El cuadro 2 nos muestra los resultados solo para las 23 series con tendencias lineales significativas. 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 nos dan información útil acerca de los contenidos de frecuencia de la serie analizada, pero no indican en que tiempo ocurren esas frecuencias.

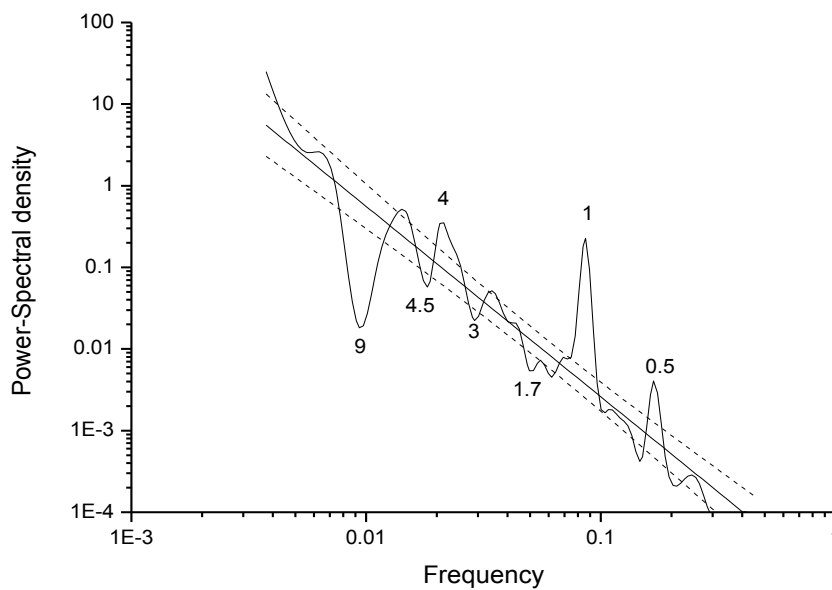


Figura 2.

Espectro de potencias de la serie de tiempo de anomalías de evaporación registrada en Trancoso, Zac., México de Junio de 1950 a Noviembre de 1994. La densidad del espectro de potencias está dada como una función de la frecuencia para escala de tiempo de 2 a 534 meses. La línea ajustada se utilizó para estimar la dimensión fractal (D_s). $Y = -4.918 X^{-2.33}$, r^2 ajustada = 0.8759. $D_s = [(5 - \beta)/2]$; $D_s = [(5 - 2.333)/2]$; $D_s = 1.334$.

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 18 de 23 series el ciclo cuasi-bianual estuvo presente. El ciclo cuasi-bianual es un ciclo de 26 meses que explicado 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 11 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 8 series de tiempo.

DISCUSION

Trabajo previo ha documentado decrementos en las tendencias lineales globales en series de tiempo de evaporación en Australia, Nueva Zelanda, China, La ex-Unión Soviética y los Estados Unidos de América (Johnson y Charma, 2010). Sin embargo, no encontramos reportes para México. Adicionalmente, en los casos mencionados no se identificaron frecuencias importantes. En nuestro caso de estudio, el análisis de regresión lineal fue utilizado para estimar las tendencias para 40 perfiles de evaporación; el análisis de espectro de potencias fue empleado con el fin de identificar frecuencias importantes que afectan el comportamiento de las series de tiempo de las anomalías de evaporación.

Encontramos tendencias lineales negativas para 27 de 40 series de tiempo de evaporación; 18 de esas 27 tendencias negativas fueron significativas a $p < 0.05$. Por otro lado, 13 tendencias de series de tiempo de evaporación fueron positivas pero solo 3 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) y Johnson y Charma (2010) quienes reportaron tendencias globales lineales negativas en series de tiempo de evaporación para Australia, Nueva Zelanda, China, La ex-Unión Soviética y los Estados Unidos de América.

III CONGRESO INTERNACIONAL SOBRE CAMBIO CLIMATICO Y DESARROLLO SUSTENTABLE

Nuestros resultados 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). Estos 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.

CONCLUSIONES

La media global de tendencias de evaporación fue de $-0.32 \text{ mm año}^{-1}$; mientras que la media de todas las tendencias significativas fue de $-0.53 \text{ mm año}^{-1}$. Adicionalmente, la media de las tendencias significativas crecientes de evaporación fue de 1.09 mm año^{-1} , y la media de las tendencias significativas decrecientes fue de $-0.79 \text{ mm año}^{-1}$.

El ruido en todas las 40 series de tiempo de evaporación tiende a ser 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.

Las frecuencias importantes detectadas 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).

AGRADECIMIENTOS

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

REFERENCES

- 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.
- Chattopadhyay N, Hulme M (1997). Evaporation and potential evapotranspiration in India under conditions of recent and future climate. *Agric. Forest Meteorol.* 187: 55–73.
- de la Fuente IM, Martínez L, Aguirregabiria JM, Veguillas J, 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.
- Evertsz CJG, Berkner K (1995). Large deviation and self-similarity analysis of curves: DAX stock prices. *Chaos, Solitons & Fractals* 6:121–130.
- Gifford RM, Graham DF, Neville N, Michael LR (2005). Workshop summary on pan evaporation: An example of the detection and attribution of climate change variables. *In: Gifford RM (editor). Pan Evaporation: An Example of the Detection and Attribution of Trends in Climate Variables.*
- Hausdorff JM, Peng C–K (1996). Multiscaled randomness: A possible source of $1/f$ noise in biology. *Phys. Rev. E* 54: 2154–2157.
- Huntington TG (2006). Evidence for intensification of the global water cycle: Review and synthesis. *J. Hydrol.* 319: 83–95.
- Johnson F, Sharma A (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, van Loon H (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 JH, Peterson TC (2000). Pan evaporation trends in dry and humid regions of the United States. *J. Hydrometeor.* 1: 543–546.
- Linacre ET (2004). Evaporation trends. *Theor. Appl. Climatol.* 79: 11–21.
- MacMynowski DG, Tziperman E (2008). Factors affecting ENSO's period. *J. of the Atmospheric Sciences* 65: 1570–1586.
- Mandelbrot BB (1982). *The Fractal Geometry of Nature.* W.H. Freeman, New York.
- Mendoza B, Lara A, Maravilla D, Jáuregui E (2001). Temperature variability in central México and its posible association to solar activiy. *J. Atmosph. and Solar-Terr. Phys.* 63: 1891–1900.
- Monetti RA, Havlin S, Bunde A (2003). Long-term persistence in sea-surface temperature fluctuations. *Physica A.* 320: 581–589.

III CONGRESO INTERNACIONAL SOBRE CAMBIO CLIMATICO Y DESARROLLO SUSTENTABLE

- Moreira JG, Kamphorst LDSJ, Oliffson KS (1994). On the fractal dimension of self-affine profiles, *J. Phys. A: Math. Gen.* 27: 8079–8089.
- Mutziger AJ, Burt CM, Howes DJ, Allen RG (2005). Comparison of measured and FAO–56 modeled evaporation from bare soil, *J. Irrigation and Drainage Engineering* 131(1): 59–72.
- Peng C–K, Buldyrev SV, Havlin S, Simons M, Stanley HE, Goldberger AL (1994). Mosaic organization of DNA nucleotides. *Phys. Rev. E* 49: 685–1689.
- Quintana–Gomez RA (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 ML, Farquhar GD (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.
- Turcotte DL, (1992). *Fractals and Chaos in Geology and Geophysics*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Valdez–Cepeda RD, Hernández–Ramírez D, Mendoza B, Valdés–Galicía J, Maravilla D (2003a). Fractality of monthly extreme minimum temperature. *Fractals* 11: 137–144.
- Valdez–Cepeda RD, Mendoza B, Díaz–Sandoval R, Valdés–Galicía J, López–Martínez JD, Martínez–Rubín de Celis E (2003b). Power–spectrum behavior of yearly mean grain yields. *Fractals* 11(3): 295–301.
- Weber RO, Talkner P (2001). Spectra and correlations of climate data from days to decades. *J. Geophys. Res. D.* 106: 20131–20144.
- Wilks DS (1995). *Statistical Methods in the Atmospheric science*. Academic Press. ISBN 0–12–751965–3 (page 42).
- Zubair L (2002). El Niño Southern Oscillation influences on rice production in Sri Lanka. *Int. J. Climatol.* 22: 249–260.