

La influencia de la oscilación de la temperatura del aire sobre el ecosistema de la Presa de Atlangatepec, Tlaxcala, México.

Influence of the air temperature oscillation on the ecosystem of the Atlangatepec Dam, Tlaxcala, México.

Norma Sánchez-Santillán¹, Sergio Guzmán Ruíz²
Rubén Sánchez-Trejo¹, Walter Ritter Ortíz²
Elba Lázaro-Chávez Mancilla³

¹Depto. El hombre y su Ambiente. Universidad Autónoma Metropolitana – Xochimilco. E-mail: santilla@cueyatl.uam.mx

²Centro de Ciencias de la Atmósfera, Circuito Exterior, U.N.A.M.

³Centro Regional ASFIS para América Latina. Depto. de Bibliografía Latinoamericana, DGB U.N.A.M.

Sánchez-Santillán N., S. Guzmán-Ruíz., R. Sánchez-Trejo., W. Ritter Ortíz y E. Lázaro-Chávez Mancilla 2004. La influencia de la oscilación de la temperatura del aire sobre el ecosistema de la Presa de Atlangatepec, Tlaxcala, México. *Hidrobiológica* 14 (1): 75-84.

RESUMEN

En el presente estudio se analizan los registros de la temperatura del aire en la localidad de la Presa de Atlangatepec, Cuenca Central de México durante el período 1951-1998, con el fin de determinar la variabilidad de la temperatura anual a partir de su oscilación. La amplitud promedio de la oscilación por año fue de 1.2°C en el 6.3%, de 0.3°C en el 74% de los años y en el resto de los casos fue estable. El 57% de los años registró una tendencia de calentamiento promedio de 0.8°C y coincidieron con El Niño. En el 34% de los años, durante La Niña, se registró una temperatura con tendencia al enfriamiento cuyo promedio fue de -0.4°C. Se emplearon técnicas de estadística lineal no paramétrica, series de tiempo y correlaciones de series de tiempo para analizar la oscilación de la temperatura del aire. En el lapso de estudio de 48 años se detectaron dos tipos de períodos: a) de 10.6 a 2.6 años y b) de 2.2 años. Los primeros periodos estuvieron íntimamente relacionados con El Niño y el segundo con la Oscilación cuasi-bienal. El tiempo de retardo de la temperatura del aire con respecto a El Niño y a la actividad solar, fue en promedio de uno y dos años respectivamente.

Palabras clave: Variabilidad climática, Oscilación de la temperatura, El Niño, La Niña, Actividad solar, Ecosistema.

ABSTRACT

From 1951 to 1998, air temperature records were analyzed in the Atlangatepec Dam, in Mexico Central Basin, in order to determine annual temperature variability, setting out from its oscillation. Oscillation average amplitude was 1.2°C per year in 6.3% of the cases. In the 74.4% of the cases, the same average amplitude was 0.2°C per year. In the rest of the cases it was stable. More than a half of the years (57%) with an average warming trend of 0.8°C, coincided with El Niño events. In some of the years (34%), during La Niña events, a temperature with trend to the -0.4°C average cooling was recorded. Non-parametrical linear statistics techniques, time series and time series correlations were employed to analyze air temperature oscillation. The study period was of 48 years. Two types of periods were detected: a) 10.6 to 2.6 periods, and b) 2.2 years. The first periods were intimately related with solar activity, and the second with cuasi-biennial oscillation. Estimated temperature delay time was in average, a year. The same temperature delay time with respect to solar activity was in average two years.

Key words: Climatic variability, Temperature oscillation, El Niño, La Niña, Solar activity, Ecosystem.

INTRODUCCIÓN

La variabilidad climática terrestre y particularmente el comportamiento de la temperatura en escala local, regional y global ha ocurrido a lo largo de diferentes escalas de tiempo; se han señalado como posibles causas: los ciclos de actividad solar (Willett, 1974; Herman & Golberg, 1978); las variaciones en las condiciones de la superficie de la Tierra (océanos y continentes) (Wegener, 1976; Perry & Walker, 1977; Larson, 1995); los mecanismos de retroalimentación que existen entre la atmósfera, la superficie de la tierra (océanos y continentes y la cubierta de hielo y nieve) (Oerlemans & van der Veen, 1984; Hunter, 1988; Fohn, 1989; Gehrels & Matthews, 1995), los cambios en las concentraciones del contenido de polvo, bióxido de carbono, ozono y otros componentes de la atmósfera (Caldeira & Rampiro, 1991; Mann & Lazier, 1991; Martin, 1992), entre otros.

Aparte de los cambios naturales el hombre también a contribuido a la variabilidad climática al modificar el ambiente, sobre todo en escalas temporales cortas (décadas), básicamente con el empleo de combustibles fósiles al aumentar el bióxido de carbono, y el cambio del uso del suelo para fines agrícolas y ganaderos al aumentar el metano, edificación de ciudades o construcción de reservorios de agua (canales de irrigación y presas), con la consecuente alteración de los biomas originales. El tiempo meteorológico influye sobre los ecosistemas, si la escala temporal es corta, de horas y días, ya que regula los procesos fisiológicos de desarrollo, crecimiento y metabolismo en la mayoría de los organismos, el clima, modifica las migraciones, dispersión y distribución de éstos (Gates, 1977; Margalef, 1980; Melillo *et al.*, 1992), además, controla la composición de las comunidades, ya sea directamente al aumentar la mortalidad en los grupos mal adaptados, o indirectamente, cuando interviene en las interacciones entre las especies, tales como depredación, parasitismo y competencia.

La variabilidad del clima modifica la estructura y función de los ecosistemas y sus interacciones con la atmósfera y el tiempo (Cushing, 1982; McNaughton, 1983). La compleja estructura ecológica incluye, entre otros aspectos, la diversidad biológica, la cual integra no sólo la diversidad de las especies sino también la de los ecosistemas. Dentro de las funciones del ecosistema están los procesos de producción primaria y secundaria, distintos niveles tróficos, descomposición y reciclamiento de nutrilitos y sus interacciones (De la Lanza, 1993; Naeem *et al.*, 1994; Tielman & Downing, 1994). La hipótesis de diversidad-estabilidad sugiere que las perturbaciones en la atmósfera y por consecuencia en el tiempo y el clima, pueden ocasionar cambios en la función y estructura de los ecosistemas (Tielman & Downing, 1994), lo que acarrea impactos de distinta magnitud en la diversidad biológica y en

los aspectos económicos de los recursos biológicos disponibles.

Como consecuencia de lo anterior actualmente se registra un aumento en la temperatura, denominado calentamiento global; expresado en dos aspectos fundamentales, primero al modificar el albedo tanto de la atmósfera como de la superficie y generar una alteración en el balance de la radiación de la Tierra y segundo, al cambiar la composición de la atmósfera, particularmente la nubosidad, los aerosoles y los gases de invernadero (Trenberth, 1997).

Un aspecto sobresaliente de la variabilidad climática es indudablemente el lapso de tiempo en el cual ocurre, ya que se incrementa en razón directa a la escala temporal empleada (Trenberth, 1997) y determina tanto el impacto en el medio ambiente, como la influencia que tiene de manera directa en las diversas fases de los ciclos de vida de los organismos que integran los ecosistemas, y que a su vez, la respuesta biológica está en proporción directa con la velocidad e intensidad del cambio de las variables del clima; de ahí que la influencia en algunos organismos será mayor cuando las variaciones de los elementos ocurran en una escala de días y/o meses y su intervalo de variación se encuentre hacia los extremos de la curva de distribución de frecuencias (Lowry, 1970).

Lo anterior obedece a que las oscilaciones de la temperatura del aire registradas en escalas diarias, repercuten evidentemente en la variabilidad climática tanto mensual como anual y, en consecuencia determinan la variabilidad interanual en períodos cortos de tiempo (décadas), de ahí que se propone estimar tanto la amplitud de la oscilación como el intervalo de tiempo en el que ocurre, la periodicidad de los ciclos y el tiempo de retardo en dicha oscilación, cuando se presenta El Niño; además, determinar la influencia de los ciclos de actividad solar sobre las oscilaciones de la temperatura del aire en la Presa de Atlangatepec, Tlaxcala, México, durante el periodo 1951-1998, como una forma de evaluar la oscilación climática local.

Área de estudio. Tlaxcala es el estado más pequeño del país en superficie, con 3,914 km² y representa el 0.9% de la superficie, se ubica a más de 2,000 msnm (García & Falcón, 1980), y se sitúa en el Eje Neovolcánico dentro de la Cuenca Puebla-Tlaxcala. Cuenta con cuatro subcuencas hidrográficas, de las cuales dos son endorreicas: La Cuenca del Noroeste y la Cuenca Oriental y dos exorreicas: La Cuenca del Norte y la Cuenca Central-Sureste. Ésta última es la de mayor importancia debido al área que cubre, que es de 1,676 km², equivalente a casi la mitad del territorio del estado, en ella está la Presa de Atlangatepec, a 19°34' de latitud Norte y 98°11' de longitud Oeste, y una altitud de 2,480 msnm. El clima es Cb(w₂)(w)w''(i')g, que corresponde a un clima templado

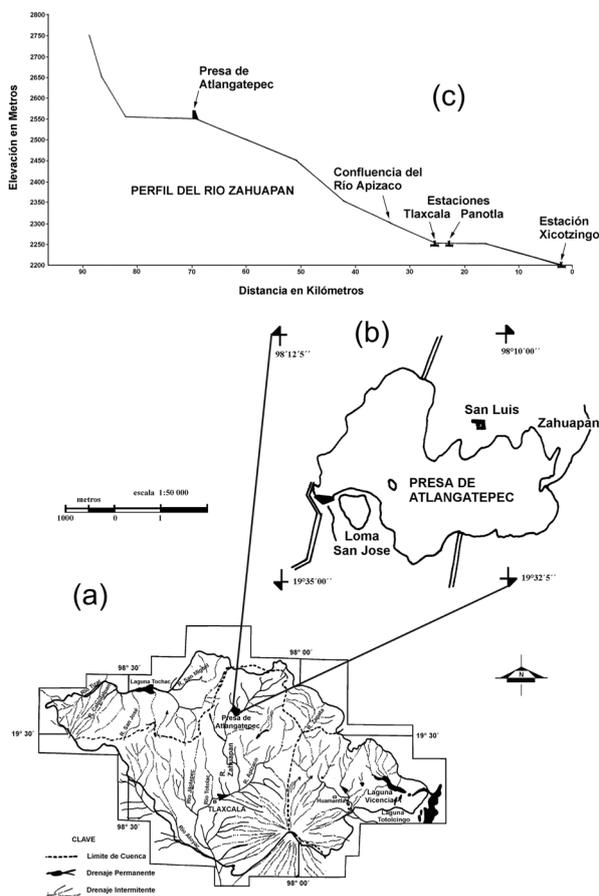


Figura 1. Localización del área de estudio: (a) Tlaxcala, (b) Presa de Atlangatepec y (c) perfil orográfico del Río Zahuapan.

con verano fresco y largo, subhúmedo, con una temperatura media anual de 14.1°C , enero es el mes más frío con 11°C y mayo el más cálido con 16.5°C , por lo que se considera con poca oscilación térmica; la marcha de la temperatura es tipo ganges. La precipitación total anual es de 745.8 mm, diciembre es el mes más seco con 7.3 mm y agosto el más lluvioso con 135.2 mm; tiene régimen de lluvias en verano y registra canícula en el mes de julio. La presa se construyó en el período 1957-1959 con el objeto de aprovechar las aguas del Río Zahuapan para uso de riego de 4,000 ha; la cuenca de escurrimiento es de 275 km^2 y el volumen máximo que alberga es de 54.7 millones de m^3 (Leal, 1978; CNA, 1993), (Figuras 1a, b, c).

En Tlaxcala las elevaciones ocupan el 78%, mientras que las planicies y depresiones el 22% restante, que en su mayor parte resulta una meseta. Limita al este con la Sierra Madre Oriental, al oeste con la Sierra Nevada y al sur con la Sierra Volcánica Transversal, y por ende, presenta una gran variedad de microclimas (Leal, 1978).

La parte norte del estado cuenta con una barrera montañosa (Fig. 1a) y existe en ella una depresión al noroeste de la presa que obliga a las masas de aire, como puede ser la polar modificada, también conocida como norte (Mosiño, 1988), evento que provoca en el estado de Tlaxcala, la presencia de heladas durante la temporada invernal (Orozco, 2000), a pasar por allí y continuar por el cause del Río Zahuapan y la Presa de Atlangatepec, la cual actúa como un amortiguador de las temperaturas, y, por lo tanto evita que las fluctuaciones de éstas sean drásticas. Razón por la cual, ésta localidad fue seleccionada para el presente estudio, otra fue que al estar protegida por los accidentes fisiográficos y alejada del Golfo de México y del Océano Pacífico nos permite evitar la influencia directa y un posible enmascaramiento del patrón climático regional. Además, hay evidencias de un posible vínculo del comportamiento de la temperatura con la actividad solar (Sánchez-Santillán & De la Lanza, 2001). Por otro lado, por efectos de teleconexión climática, la región es susceptible de ser influenciada por El Niño (Magaña, 1999; Sánchez-Santillán & De la Lanza, 2001).

De acuerdo a la Convención Relativa a los Humedales de Importancia Internacional y, según el inventario de Humedales de la Región Neotropical, la presa ocupa el primer lugar en el estado, no sólo por poseer la mayor capacidad volumétrica de almacenamiento, sino también, por ser un ecosistema acuático abierto, con una productividad natural alta, lo que la convierte en un embalse que posee una notable diversidad de especies de aves acuáticas, tanto migratorias como residentes; además de otras poblaciones de peces e invertebrados (Pérez-Rodríguez & Badillo-Solís, 1996).

MATERIALES Y MÉTODOS

La temperatura del aire se obtuvo de los registros de la estación climatológica de Atlangatepec, que se ubica después de la cortina de la presa, perteneciente a la Comisión Nacional del Agua (C. N. A.). La homogeneidad de los registros, se verificó con una visualización gráfica de los mismos para observar su comportamiento según el criterio de García (1984) y después se determinó la confiabilidad de los mismos, con el método de Sved-Eisen-Hart (Klein, 1982; Wilkis, 1995), criterio que se aplicó por ser la serie superior a 20 registros; dio por resultado un intervalo de confianza calculado para registros homogéneos del 95%.

Para evaluar la amplitud de la oscilación y el intervalo temporal de ésta durante el período 1951-1998, se usó la derivada de la temperatura promedio anual del aire con respecto al tiempo y se calculó con diferencias finitas hacia atrás a partir de 1952, de acuerdo al criterio de Brown & Rothery (1993).

Las características de los ciclos, tanto de la amplitud de la oscilación como del periodo de éstos, se determinaron a través de análisis de series de tiempo, donde se incluyó la serie original, la serie sin tendencia, la transformada rápida de Fourier (FFT), el espectro de potencia y el espectro de fase; estos dos últimos se representaron como espectros normalizados en virtud de que son análisis complementarios, según los criterios de Bloomfield (1976) y Wei (1990).

Se aplicó un análisis de la función de correlación cruzada de series de tiempo de acuerdo al criterio propuesto por Wei (1990), para determinar la existencia de un posible tiempo de retardo en el comportamiento de la oscilación con respecto a la ocurrencia de El Niño y de la actividad solar,

Tabla 1. Primera derivada de la oscilación de la temperatura promedio anual del aire en la Presa de Atlangatepec, Tlaxcala durante el período 1951-1998.

Años	Temperatura media anual	Primera derivada	Años	Temperatura media anual	Primera derivada
	\bar{T}	T		\bar{T}	T
1951	14.4		1975	12.6	0.2
1952	14.8	0.4	1976	12.5	-0.1
1953	15.1	0.3	1977	12.8	0.3
1954	14.9	-0.2	1978	12.9	0.1
1955	13.6	-1.3	1979	12.8	-0.1
1956	13.5	-0.1	1980	13.1	0.3
1957	14.1	0.6	1981	12.7	-0.4
1958	14.2	0.1	1982	13.1	0.4
1959	14.1	-0.1	1983	13.1	0.0
1960	14.0	-0.1	1984	13.6	0.5
1961	14.0	0.0	1985	14.2	0.6
1962	14.1	0.1	1986	14.4	0.2
1963	14.0	-0.1	1987	14.5	0.1
1964	13.9	-0.1	1988	14.1	-0.4
1965	13.5	-0.4	1989	13.8	-0.3
1966	13.7	0.2	1990	14.2	0.4
1967	13.1	-0.6	1991	15.0	0.8
1968	13.0	-0.1	1992	15.9	0.9
1969	13.8	0.8	1993	16.5	0.6
1970	13.5	-0.3	1994	16.6	0.1
1971	13.3	-0.2	1995	16.9	0.3
1972	13.6	0.3	1996	17.3	0.4
1973	13.8	0.2	1997	17.5	0.2
1974	12.4	-1.4	1998	18.2	0.7

evaluada ésta última a través de las manchas solares (Índice de Zürich). Para lo cual se emplearon los valores del Índice de Zürich proporcionados por el Solar Geophysical Data (1999), y los registros de ocurrencia e intensidad de El Niño durante el período 1763-1998, propuestos por Quinn *et al.* (1978); y para los registros de El Niño del período 1978-1996, se usaron los registros de la NOAA (2004).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las estimaciones anuales de las oscilaciones de la temperatura del aire en la Presa de Atlangatepec (Tabla 1, Figura 2), se agruparon en tres intervalos de acuerdo con su grado de oscilación; éstos se determinaron en valores absolutos, es decir, sin importar si el cambio era en el sentido del enfriamiento o por el contrario, si lo era hacia el calentamiento; ya que, lo que resulta más determinante dentro del ecosistema es la amplitud del cambio.

La intensidad de los intervalos fueron inversamente proporcionales al número de eventos, cuando la oscilación fue: a) máxima, de 1.4 a 1.0°C (4.2% de casos); b) media, de 0.9 a 0.5°C (21% de casos) y c) mínima, de 0.4 a 0.0°C (74% de casos), (Figura 2).

El sentido en el que se observan las oscilaciones térmicas entre un año y otro, es decir, la tendencia de enfriamiento o de calentamiento de los 47 años analizados, muestra que, en 27 de éstos (57%) la temperatura aumentó; en 17 años (36%) la temperatura descendió; mientras que, en 2 años (7%) la temperatura se mantuvo sin cambio. Los resultados mostrados en la Tabla 1 y en la Figura 2, indican una tendencia al incremento de la temperatura promedio anual, tal y como lo señalan Sánchez-Santillán & De la Lanza (2001); equivalente a 2°C para el período de 1951-1999. El resultado del calentamiento en promedio fue de 0.8°C; mientras que, la de enfriamiento fue de -0.4°C.

Se caracterizaron cinco tipos de patrones en el comportamiento de la oscilación de la temperatura del aire con respecto a la ocurrencia de El Niño (Figura 2):

1) En el 40% de los casos la temperatura se elevó durante El Niño para luego descender nuevamente (1953, 1969, 1972-73 y 1986-87).

2) En el 30% de los casos, la temperatura se incrementó durante El Niño y continuó elevándose después del mismo (1975-76, 1982-83 y 1992-93).

3) En el 10% de los casos, la temperatura aumentó durante El Niño pero no descendió a sus niveles originales (1957-58).

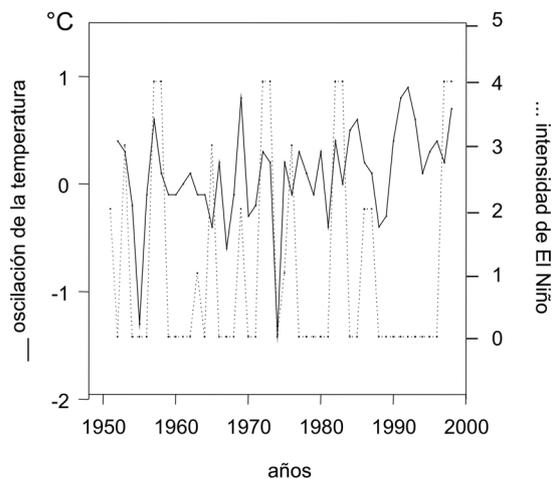


Figura 2. Intensidad de El Niño y Oscilación de la temperatura promedio anual del aire en la Presa de Atlangatepec, Tlaxcala durante el período 1951-1998.

4) En el 10% de los casos, la temperatura descendió durante El Niño y mantuvo esta tendencia después de El Niño (1963).

5) En el 10% de los casos, la temperatura bajó durante El Niño y luego ascendió después del mismo (1965).

Para El Niño de 1997-98, no se pudo hacer este análisis en virtud de que no se contó con los registros térmicos de 1999.

Los resultados anteriores constituyen una evidencia de la compleja variabilidad de las oscilaciones térmicas que se registran en la Presa de Atlangatepec, algunos de los estudios desarrollados en esta misma región, señalan una tendencia de incremento de la temperatura de 2°C para el período de 1951-1999 (Sánchez-Santillán & De la Lanza, 2001); por su parte Conde *et al.* (1999), para el periodo de 1961-1998 estiman un incremento de 1.5°C para Apizaco, Tlaxcala; la diferencia entre ambas estimaciones podría explicarse por el tipo de datos empleados, en el primer caso se emplearon datos anuales y locales, mientras que, en el segundo, fueron promedios decadales.

Ritter *et al.* (1998), analizan el comportamiento de varios parámetros climatológicos (precipitación, temperatura, evaporación, evapotranspiración e índice de aridez) durante el período 1948-1987, para el estado de Tlaxcala y regionalizan de acuerdo a un índice a partir de la precipitación, la estabilidad del ecosistema. La Presa de Atlangatepec se ubica dentro de la zona inestable, cerca de los límites con la porción estable. Ellos también señalan que la temperatura es la variable que registra la menor variabilidad respecto a los otros parámetros. Esto se explicaría por el efecto amortiguador que la

capacidad térmica del agua le brinda a la presa (Fig. 1c); sin embargo, dicho efecto se ve disminuido por la gran frecuencia de heladas que se reportan en la localidad, posiblemente como consecuencia de la amplia deforestación que existe alrededor de la zona de estudio, en donde las áreas boscosas han sido sustituidas por tierras de cultivo.

El impacto que la oscilación de la temperatura ejerce sobre el ecosistema de la presa, se observa de manera puntual a través de diversos estudios desarrollados acerca de la biología de algunas de las especies estudiadas; cabe señalar que en éstos, no se establece una relación cuantitativa de la abundancia de individuos con respecto al comportamiento de la temperatura del aire, no obstante, se puede apreciar un cambio en la abundancia, que es directamente proporcional a la amplitud de la oscilación.

En el caso de las aves acuáticas, el 33.85% de las especies son residentes y el 66.15% son migratorias (Pérez-Rodríguez & Badillo-Solís, 1996), se observa un notable aumento en el número de individuos de las especies más abundantes, durante las temporadas invernales de 1990 y 1991, que corresponden a: *Anas acuta* (Linnaeus), pato golondrino (de 5 a 85 individuos), *Anas platyrhynchos diazy* (Linnaeus), pato de collar (de 33 a 243 individuos), *Anas clypeata* (Linnaeus), pato cucharón (de 20 a 374 individuos) y *Fulica americana* (Gmelin), gallareta americana (de 113 a 475 individuos), esto se debió al aumento de la temperatura promedio anual que pasó de 14.2 a 15°C, correspondiente a una oscilación intermedia (0.8°C). Pérez-Rodríguez & Badillo-Solís (1996), consideran que el nicho ecológico de las aves, desde el punto de vista trófico, determina la existencia de hábitos alimentarios diversificados, y le atribuyen al grupo una gran capacidad de regulación en su densidad poblacional. Aquí se establece que son las oscilaciones climáticas las que determinan dichos patrones de abundancia en las poblaciones ornitológicas migratorias y residentes y no los factores de autorregulación denso-dependientes.

Para el caso de *Cambarellus montezumae* (Saussure), acocil (Crustacea, Decapoda) y *Ambystoma tigrinum* (Green), salamandra tigre (Amphibia, Caudata), pertenecientes a la fauna bentónica de la presa, Pérez-Rodríguez *et al.* (1989) observan que la variabilidad de los ascensos y descensos de la temperatura a lo largo del año y a través de diferentes años, constituye el factor que influye directamente en la diferenciación de las etapas de los ciclos biológicos de varios de los organismos estudiados, ya sea inhibiendo o activando los ciclos reproductores y migratorios o hábitos alimentarios, de tal modo que se refleja en la densidad y estructura de las poblaciones tanto de acociles como de ajolotes.

La abundancia de moluscos de las clases Gastropoda: *Physella* sp. (Haldeman), *Planorbella trivolvis* (Say), *Gyraulus* sp. (Agassiz), *Hebetoncyclus excentricus* (Morelet), *Fossaria cubensis* (Pfeiffer) y *Fossaria humilis* (Say); y Pelecypoda: *Musculium transversum* (Say), estudiada por Pérez-Rodríguez (1995), le permite afirmar que la temperatura es fundamental en los procesos de reproducción, durante el período de incubación de los desoves, la eclosión, el tiempo de desarrollo y el reclutamiento de los nuevos individuos a las poblaciones hasta la talla de madurez sexual. Al analizar sus datos se encontró una influencia directa de los intervalos de oscilación de la temperatura para el 66% de las poblaciones con una merma significativa en el número de individuos, a pesar de que el intervalo de oscilación de la temperatura fue bajo durante el periodo de estudio, donde las temperaturas medias fueron de 14.1°C (1988), 13.8°C (1989) y 14.2°C (1990), (Tabla 1).

De los grupos analizados se encuentra que la variabilidad climática es uno de los elementos que influencia la estructura de las poblaciones, la diversidad de las comunidades y sus interrelaciones con los factores abióticos.

De los análisis espectrales de la oscilación de la temperatura del aire, se aprecian ciclos que concuerdan con diver-

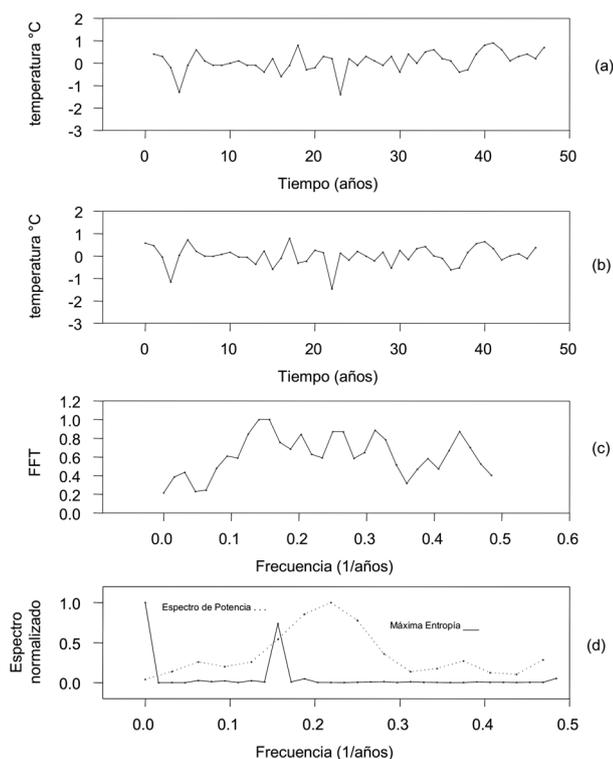


Figura 3. Series de tiempo de la oscilación de la temperatura promedio anual del aire en la Presa de Atlangatepec, Tlaxcala. (a) serie original, (b) serie sin tendencia, (c) transformada de Fourier y (d) espectro de potencia y máxima entropía.

sos periodos de la actividad solar (10.6, 7.1, 4.9 y 2.5-2.6 años), y uno con la oscilación cuasi-bienal (2.2 años), (Fig. 3, Tabla 2).

La influencia directa entre los ciclos solares y el cambio de la temperatura, es una relación que ha sido empleada por diversos autores para explicar la variabilidad climática terrestre (Mendoza *et al.*, 1989, 1990, 1991; Mendoza & Pérez-Enríquez, 1992, 1996). A partir de cambios básicos en la circulación atmosférica que ocasionan incrementos en la troposfera de entre 2°C y 5°C, aunados a las alteraciones barotrópicas al nivel de los 500 mb pueden constituir un disparador en el mecanismo de las alteraciones climáticas (Herman & Goldberg, 1978; Heath, 1980; Mustel *et al.*, 1980; Wu *et al.*, 1984; Labitzake & van Loon, 1989; Sánchez-Santillán *et al.*, 2000 y Sánchez-Santillán *et al.*, 2002). Se ha sugerido que, durante las etapas de mayor actividad solar, se desencadenan incrementos en la temperatura terrestre y, cuando esta actividad disminuye, la temperatura de nuestro planeta decrece (Eddy, 1976; Herman & Goldberg, 1978; Otaola *et al.*, 1993).

Se han reportado estrechos vínculos entre la actividad solar, los eventos El Niño y la temperatura del aire en diversas partes del mundo, sobre diversas escalas espacio-temporales (Cane *et al.*, 1986; Crooker & Siscoe, 1986; Bucha, 1988; Mendoza *et al.*, 1989, 1990 y 1991; Labitzake & van Loon, 1989 y 1990), determinan una correlación entre el ciclo de actividad solar de 11 años y la Oscilación cuasi-bienal (Fig. 4).

La estimación del tiempo de retardo observado entre la oscilación de la temperatura del aire con respecto a la actividad solar (Fig. 4), por un lado, y la ocurrencia de El Niño, por otro (Fig. 5), registra un incremento paulatino de la correlación que inicia para el caso de la actividad solar en el año uno, y culmina en el año cuatro ($r = -0.281$), después descende nuevamente hasta formar otro ciclo, patrón que se repite a lo largo del periodo estudiado. En lo que respecta a la oscilación de la temperatura cuando se presenta El Niño, se registra una correlación importante en el mismo año que inicia el evento ($r = 0.311$) posteriormente, decrece ($r = 0.182$), y en el segundo año, el coeficiente se incrementa nuevamente ($r = -0.283$) continuando la inestabilidad térmica; en todos los casos el nivel de significancia fue de $p \leq 0.05$.

Una de las consecuencias del movimiento de translación de la Tierra, es la cantidad de radiación solar que recibe y está acorde, además con los ciclos de actividad de este último, por lo que algunas veces, la radiación que recibe la Tierra es menor, lo que provoca, en ciertas ocasiones que los monzones asiáticos aumenten, las celdas de alta presión subtropicales se debiliten y el contraste de la presión barométrica superficial entre las estaciones de verano e invierno se incrementa. Por otro lado, la circulación general de la atmós-

Tabla 2. Frecuencias de la oscilación de la temperatura promedio anual del aire en la Presa de Atlangatepec, Tlaxcala durante el período 1951-1998.

Máxima Entropía	Transformada rápida de Fourier (FFT)	Espectro de Potencia
$Fr_1 = 6.4$ años	$Fr_1 = 32$ años	$Fr_1 = 4.5$ años
$Fr_2 = 2.0$ años	$Fr_2 = 10.6$ años	$Fr_2 = 2.6$ años
	$Fr_3 = 7.1$ años	
	$Fr_4 = 4.9$ años	
	$Fr_5 = 4.0$ años	
	$Fr_6 = 3.2$ años	
	$Fr_7 = 2.5$ años	
	$Fr_8 = 2.2$ años	

fera se incrementa en un intervalo de 2.5-4.5 años, lo que ocasiona el reforzamiento de las celdas de alta presión, sobre el océano, entre el verano y el invierno, mientras que las de baja presión, sobre los continentes disminuyen, al igual que la tendencia de inviernos severos y de aparición de intensas oscilaciones del Atlántico Norte.

Los elementos meteorológicos pueden perturbar a los ecosistemas siendo más susceptibles cuando éstos son estables o maduros; es decir, existen pequeños mecanismos disparadores que generan inestabilidad en los mismos, mientras que en los inestables, se requieren grandes perturbaciones ambientales para generar la misma inestabilidad. Uno de es-

tos mecanismos disparadores son las pequeñas cantidades de energía provenientes del viento solar que pueden afectar la atmósfera terrestre a través de un incremento de los protones que transportan, lo que da como resultado la producción de vapor de agua en la estratosfera, que modifica posiblemente, el balance de la temperatura en la troposfera baja, especialmente en la región polar, donde la actividad magnética es mayor (Roberts & Olson, 1973), y esto a su vez afecta al ecosistema.

Existe una teleconexión, entre la respuesta de la temperatura del aire local y los eventos a escala global como son El Niño y la actividad solar. Esto se debe a que las oscilaciones de la temperatura del aire, presentan un factor de retraso con respecto a la respuesta de la atmósfera como un todo (Figs. 4 y 5). Éste retraso está relacionado con el tiempo de restauración del sistema. Según Philander (1990), el principal elemento que envuelve al ENSO a gran escala, es la redistribución de masa, calor y *momentum* dentro del sistema océano-atmósfera, lo cual se expresa en grandes desviaciones en el comportamiento de la temperatura y la lluvia en escala mensual, estacional y anual. En la figura 2 se refleja este comportamiento, donde a mayor intensidad de El Niño mayor es la oscilación de la temperatura.

En el 80% de los años en que se registró El Niño, se incrementó la oscilación de la temperatura del aire y de acuerdo a Díaz & Kiladis (1992), este incremento está asociado a El Niño/Oscilación del Sur (ENSO), particularmente en los trópicos, donde el calor almacenado en el oeste del Pacífico Tropical se transfiere directa e indirectamente, a otras partes de los océanos tropicales, éstos pierden una cantidad de calor

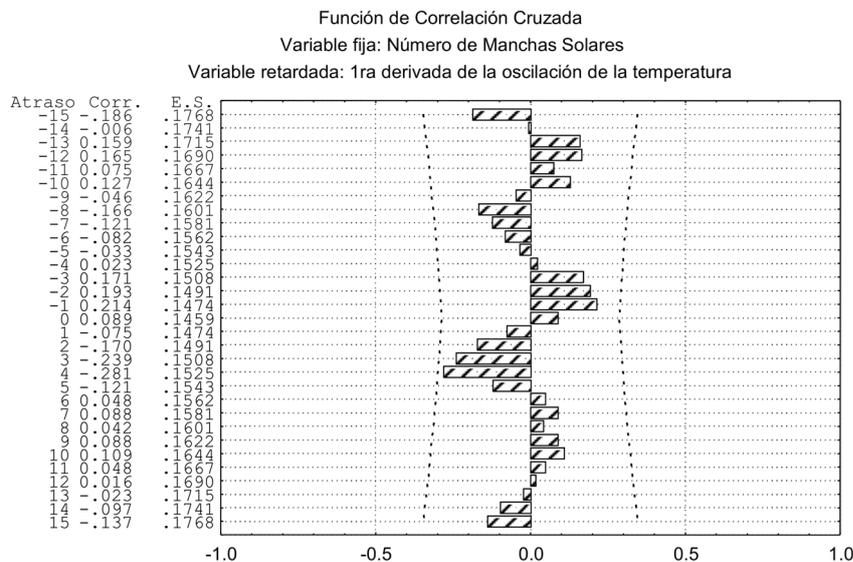


Figura 4. Correlación cruzada de series de tiempo entre el número de manchas solares y la oscilación de la temperatura promedio anual del aire (1ª derivada), en la Presa de Atlangatepec, Tlaxcala durante el período de 1951-1998.

superior a lo normal, lo que a su vez ocasiona, un breve período de calentamiento en numerosas partes de la atmósfera mundial, tal y como se confirma en la figura 2.

En la dinámica de la atmósfera, cuando se presenta el ENSO, Trenberth & Shea (1987), y Elliott & Angell (1988) sugieren que las variaciones temporales del Índice de Oscilación del Sur (SOI), generan cambios no estacionarios en diversas estructuras espacio-temporales y afirman que cuando ocurren eventos El Niño, aunque sean de la misma intensidad, no se presenta la misma respuesta. Ritter *et al.* (2002), señalan que un comportamiento típico de los ecosistemas no lineales es que a perturbaciones iguales la respuesta es diferente. En las figuras 3, 4 y 5 se notan estos patrones, y además destacan sus ciclos como consecuencia de haber empleado herramientas matemáticas no lineales.

El empleo de estadística no lineal y particularmente, de análisis espectrales, permite contrastar los registros de las temperaturas superficiales de la atmósfera en diversas localidades del mundo durante un período prolongado (1856-1989), y determinar marcadas diferencias estacionales entre los Hemisferios Norte y Sur, como resultado de las diferencias en la insolación y no por el calentamiento global del planeta (Gordon, 1992). Este mismo autor sugiere que la oscilación cuasi-bienal en el Hemisferio Norte esta asociada a la ocurrencia de los eventos ENSO. En la figura 3 y en la Tabla 2 se determinan los ciclos de oscilación cuasi-bienal, una de las cuales esta relacionada con el ENSO.

Se concluye que la forma en que responde a una perturbación un ecosistema cuando se considera como complejo y

no lineal, es de manera directamente proporcional a la intensidad de dicha perturbación, en algunos casos y en otros con un retraso.

Los resultados hasta aquí expuestos evidencian que los cambios en la actividad solar y El Niño, son un factor determinante en la variabilidad climática, expresada como la amplitud de la oscilación de la temperatura del aire, en la Presa de Atlangatepec, Tlaxcala, y queda el campo abierto para determinar el impacto sobre la estructura a nivel comunitario del ecosistema local

REFERENCIAS

BLOOMFIELD, P. 1976. *Fourier analysis of time series: An introduction*. Edit. Wiley & Sons. New York, 270p.

BROWN, D. & P. ROTHERY. 1993. *Models in Biology: mathematics, statistics and computing*. Edit. John Wiley & Sons. Toronto Canada, 688p.

BUCHA, V. 1988. Influence of solar activity on atmospheric circulation types. *Annales Geophysicae* 6: 513-524.

CALDEIRA, K. & M. R. RAMPIRO. 1991. The Mid-Cretaceous superplume, carbon dioxide, and global warming. *Geophysical Research Letters* 18(6): 987-990.

CANE, M. A., S. E. ZEBIAK & S. C. DOLAN. 1986. Experimental forecast of El Niño. *Nature* 321: 827-831.

CNA. 1993. *Presas de México*. SARH. Vol. VI, pp. 1737-1745.

CNA. 1951-1998. *Tarjetas de información climatológica*.

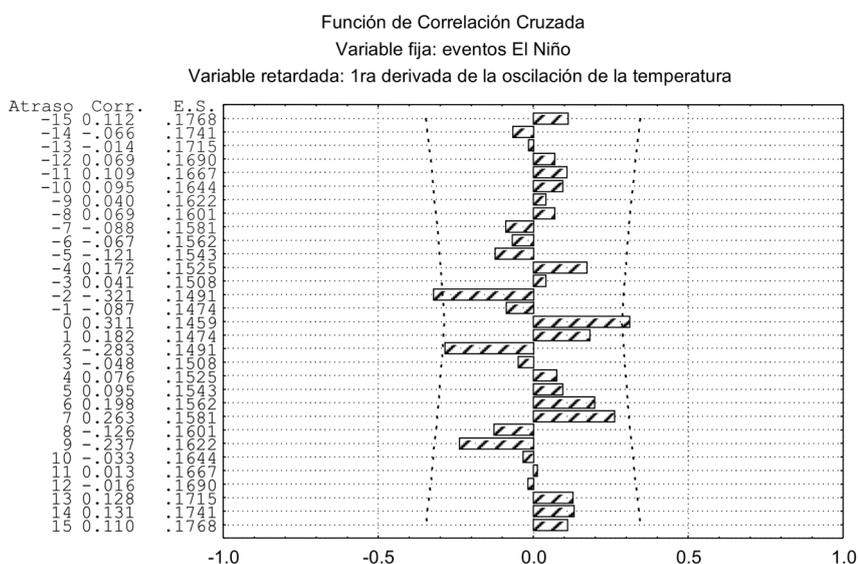


Figura 5. Correlación cruzada de series de tiempo entre los eventos El Niño y la oscilación de la temperatura promedio anual del aire en la Presa de Atlangatepec, Tlaxcala durante el período 1951-1998

- CONDE, C., R. M. FERRER, R. ARAUJO, C. GAY, V. MAGAÑA, J. L. PÉREZ, T. MORALES & S. OROZCO. 1999. El Niño y la Agricultura. In: Magaña, V. (Ed.), *Los impactos de El Niño en México*. UNAM, UABCS, UAG, CICESE, INE, UA, Tlaxcala. México, 229p.
- CROOKER, N. V. & L. SISCOE. 1986. The effect of the solar wind on the terrestrial environments. In: Sturrok, P. A. (Ed.), *Physics of the Sun. III. Astrophysics and solar terrestrial relations*. Reidel, Dordrecht, Holland, Cap. 21: 192-249.
- CUSHING, D. H. 1982. *Climatic change relevant to fisheries. Climate and Fisheries*. Edit. Academic Press. London, pp. 97-121.
- DE LA LANZA, E. G. 1993. Importancia ecológica de los ciclos biogeoquímicos en los sistemas lagunares costeros. Físicoquímica y Biología de las Lagunas Costeras Mexicanas. In: Figueroa, G., S. Alvarez, H. Esquivel, & Ponce Márquez (Eds.), Serie: *Grandes Temas de la Hidrobiología I*. Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, pp. 7-15.
- DÍAZ, H. F. & G. KILADIS. 1992. Atmospheric teleconnections associated with the extreme phase of the Southern oscillation. In: Díaz, H. F. & V. Markgraf (Eds.), pp. 7-28. *El Niño. Historical and paleoclimatic aspects of the southern oscillation*. Edit. Cambridge, University Press. England, 476p.
- EDDY, J. A. 1976. The Maunder minimum. *Science* 192, 11.
- ELLIOTT, W. P. & J. K. ANGELL. 1988. Evidence for changes in Southern Oscillation relationships during the last 100 years. *Journal of Climate* 1: 729-737.
- FOHN, P. M. 1989. Climate Change, Snowcover, and Avalanches. In: Rupke J. & M. M. Boer (Eds.), *Landscape Ecological Impact of Climatic Change on Alpine Regions*. Discussion report prepared for the European Conference on Landscape Ecological Impacts of Climatic Change held in Lunteren, The Netherlands, December 1989, pp. 27-33.
- GARCÍA, E. 1984. *Apuntes de Climatología de Posgrado*. Instituto de Geografía, UNAM, México, D.F.
- GARCÍA, E. & Z. FALCÓN. 1980. *Nuevo Atlas Porrúa de la República Mexicana*, Edit. Porrúa. México, 197p.
- GATES, L. 1977. The Physical Basis of Climate. In: *Proceedings of the World Climate Conference*. 12 al 16 de febrero, Génova, Italia, pp. 112-131.
- GEHRELS, T. & M. MATTHEWS. 1995. *Hazards due to Comets and Asteroids*, University of Arizona Press, 278p. In: *Permafrost, 5th International Conf. on Permafrost in Trondheim, Norway, August 1988*, 3: 27-34.
- GORDON, A. H. 1992. Interhemispheric contrasts of mean global temperature anomalies. *International Journal of Climatology* 12(1): 1-19.
- HEATH, D. F. 1980. A review of observational evidence for short and long term ultraviolet flux variability of the sun. In: *International Conference on Sun and Climate*, Toulouse, France. Edit. CNES, pp. 163-178.
- HERMAN, J. R. & R. A. GOLBERG. 1978. *Sun, weather and climate*. National Aeronautics and Space Administration. USA, 360p.
- HUNTER, J. A. 1988. Permafrost aggradation and degradation on Arctic coasts of North America. In: *Permafrost, 5th International Conf. on Permafrost in Trondheim, Norway, August 1988*, 3: 42-47.
- KLEIN, W. H. 1982. Statistical weather forecasting on different time scales. *Bulletin American Meteorological Society* 63: 170-177.
- LABITZAKE, K. & H. VAN LOON. 1989. Recent work correlating the 11-year solar cycle atmospheric elements grouped according to the phase of quasi-biennial oscillation. *Space Science Review* 49: 239-258.
- LABITZAKE, K. & H. VAN LOON. 1990. Association between the 11-year solar cycle, the quasi-biennial oscillation and the atmosphere: a summary of recent work. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A330*: 577-589.
- LARSON, L. R. 1995. Superpluma del Cretácico Medio. *Investigación y Ciencia* Abril: 64-69.
- LEAL, A. 1978. *Agua y suelo en Tlaxcala*. Tesis Doctoral. Facultad de Filosofía y Letras. UNAM, 241p.
- LOWRY, W. P. 1970. *Weather and Life. An introduction to Biometeorology*. Edit. Academic Press. New York, 305p.
- MAGAÑA, V. 1999. *Los impactos de El Niño en México*. Edit. UNAM, UABCS, UAG, CICESE, INE, UA, Tlaxcala. México, 229p.
- MANN, K. H., & J. R. N. LAZIER. 1991. *Dynamics of Marine Ecosystems. Biological-Physical Interactions in the Oceans*. Edit. Blackwell Scientific Publications. Londres, 465p.
- MARGALEF, R. 1980. *Ecología*. Edit. Omega. Barcelona, España, 951p.
- MARTIN, D. 1992. *Climates of the World*. Edit. Elsevier. London, 435p.
- MCNAUGHTON, S. J. 1983. Serengety Grassland Ecology: The role composite environmental factors and contingency in community organization. *Ecological Monographs* 53: 291-320.
- MELILLO, J., T. V. CALLAGHAN, F. I. WOODWARD, E. SALATI & S. K. SINHA. 1992. *Efectos sobre los ecosistemas. El Cambio Climático. Evaluación Científica del IPCC*. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. OMM y PNUMA, pp. 313-336.
- MENDOZA, B. & R. PÉREZ-ENRÍQUEZ. 1992. Solar activity and "El Niño". *Geofísica Internacional* 31(1): 41-46.
- MENDOZA, B. & R. PÉREZ-ENRÍQUEZ. 1996. The occurrence rate of El Niño and its relation to solar activity. *Proceedings 4th COLAGE, Tucumán*, B-17.
- MENDOZA, B., R. PÉREZ-ENRÍQUEZ & M. ÁLVAREZ-MADRIGAL. 1989. Solar activity and El Niño: the auroral connection. *IL Nuovo Cimento* 12C: 223-230.

- MENDOZA, B., R. PÉREZ-ENRÍQUEZ, & M. ÁLVAREZ-MADRIGAL. 1990. The intense solar activity of March 1989 as a precursor for the occurrence of an ENSO by the end of 1989. *Solar Physics* 126: 195-199.
- MENDOZA, B., R. PÉREZ-ENRÍQUEZ & M. ÁLVAREZ-MADRIGAL. 1991. Analysis of solar activity conditions during periods of El Niño events. *Anales Geophysicae* 9: 195-199.
- MOSIÑO, P. A. 1988. *Dos tipos de "norte" en el Golfo de México*. In: Memoria del III Congreso Interamericano de Meteorología del 14 al 18 de octubre, pp. 119-123.
- MUSTEL, E. R., V. E. CHERTOPRUD & N. B. MOULUKOVA. 1980. The reality of the solar-atmospheric relation and the changes of atmospheric circulation of the solar origin. In: *International Conference on Sun and Climate*, Toulouse, France. Edit. CNES, pp. 151-162.
- NAEEM, S. L., J. THOMPSON, S. P. LAWER, J. H. LAWSTON & R. M. WOODFIN. 1994. Declining biodiversity can alter the performance of ecosystem. *Nature* 368: 734-737.
- NOAA. 2004. <http://www.noaa.gov/>
- ORLEMANS, J. & C. J. VAN DER VEEN. 1984. *Ice Sheets and Climate*. D. Reidel Publishing Company, Dordrecht. The Netherlands, 237p.
- OROZCO, F. S. 2000. *Cambio Climático Regional en Tlaxcala*. Tesis de Maestría (Geografía). Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, 113p.
- OTAOLA, J., B. MENDOZA & R. PÉREZ. 1993. *El Sol y la Tierra: una relación tormentosa*. Colección: La ciencia desde México, No. 114. Edit. SEP, Fondo de Cultura Económica y CONACyT. México, 120p.
- PÉREZ-RODRÍGUEZ, R. 1995. Moluscos dulceacuícolas de la Presa de Atlangatepec, Tlaxcala, México. *Revista de la Sociedad Mexicana de Historia Natural* 46: 97-112.
- PÉREZ-RODRÍGUEZ, R. & A. BADILLO-SOLÍS. 1996. *Aves acuáticas y su entorno limnológico*. Serie Académicos CBS. Edit. Universidad Autónoma Metropolitana. Unidad Xochimilco, 168p.
- PÉREZ-RODRÍGUEZ, R., A. MALPICA-SÁNCHEZ & J. BALDERAS-CORTÉZ. 1989. *Sedimentología y fauna béntica en la Presa de Atlangatepec, Tlaxcala*. Cuadernos CBS. No. 21. Edit. Universidad Autónoma Metropolitana. Unidad Xochimilco, 51p.
- PERRY, A. H. & J. M. WALKER. 1977. *The ocean-atmosphere system*. Edit. Longman. London, 160p.
- PHILANDER, G. S. 1990. *El Niño, La Niña and the Southern Oscillation*. Edit. International Geophysics Series. New York, 293p.
- QUINN, W., D. ZOPF, K. SHORTS & R. KUOYANG. 1978. Historical trends and statistics of the Southern Oscillation, El Niño, and Indonesian droughts. *Fishery Bulletin* 76: 663-678.
- RITTER, W., S. GUZMÁN R. & A. ESTRADA. 1998. Un método gráfico para la regionalización agroecológica de recursos naturales. *Investigaciones Geográficas* 38: 57-68.
- RITTER, W., S. GUZMÁN R., N. SÁNCHEZ-SANTILLÁN, J. SUÁREZ S., C. CORONA V., H. MUÑOZ N., A. RAMOS V., R. RODRÍGUEZ M. & T. PÉREZ. 2002. El clima como sistema complejo adaptativo en coevolución. *Ciencia y Mar* VI(17): 23-35.
- ROBERTS, W. O. & R. H. OLSON. 1973. New evidences for effects of variable solar corpuscular emission on the weather. *Review of Geophysics and Space Physics* 11(3): 731-740.
- SÁNCHEZ-SANTILLÁN, N. & G. DE LA LANZA. 2001. Análisis sobre el cambio climático bajo la clasificación de climas de Köppen modificado en la Presa de Atlangatepec dentro de la Cuenca Central de México. *Geofísica* 55: 5-31.
- SÁNCHEZ-SANTILLÁN, N., A. ESQUIVEL & R. SÁNCHEZ-TREJO. 2002. Evidences for a shift in barometric pressure, air temperature and rainfall patterns circa 1920, and its possible relations to solar activity. *Hidrobiológica* 12(1): 29-36.
- SÁNCHEZ-SANTILLÁN, N., P. MOSIÑO, A. ESQUIVEL, MA. E. ZAMUDIO & R. SÁNCHEZ-TREJO. 2000. Some relationships among the ENSO, North Atlantic temperature See-Saw and the Zürich Index. *Oceánides* 15(2): 67-89.
- SOLAR GEOPHYSICAL DATA. 1999. *Comprehensive Reports*. pp. 2-4.
- TIELMAN, D. & J. A. DOWNING. 1994. Biodiversity and stability in grasslands. *Nature* 367: 363-365.
- TRENBERTH, K. 1997. The use and abuse of climate models. *Nature* 386: 131-133.
- TRENBERTH, K. & D. J. SHEA. 1987. On the evolution of the Southern Oscillation. *Monthly Weather Review* 115: 3078-3096.
- WEGENER, A. 1976. *Continents Adrift and Continents Aground*. Edit. Scientific American. USA, 230p.
- WEI, W. W. 1990. *Time Series Analysis: Univariate and multivariate methods*, Edit. Addison-Wesley publishing Co. New York, 476p.
- WILKIS, D. S. 1995. *Statistical Methods in the Atmospheric Science* Academic Press. New York, 375p.
- WILLETT, H. C. 1974. Do recent climatic trends portend an imminent ice age?. *Geophysical International* 14: 265-302.
- WU, J. T., L. C. KAN, E. TANDBERG-HANSEN & M. DRYER. 1984. Energy deposition in the Earth's atmosphere due to impact of solar activity-generated disturbances. *Solar Terrestrial Influences on Weather and Climate* 34: 119-124.

Recibido: 13 de octubre de 2004.

Aceptado: 15 de marzo de 2004.