

Tendencias recientes de las superficies ocupadas por el lago de Cuitzeo. Un enfoque basado en percepción remota, sistemas de información geográfica y análisis estadístico

Manuel E. Mendoza*
Gerardo Bocco*
Erna López Granados*
Miguel Bravo**

Recibido: 15 de diciembre de 2006
Aceptado en versión final: 17 de mayo de 2007

Resumen. Este trabajo describe y analiza la dinámica de cambio de las superficies ocupadas por el lago de Cuitzeo entre el periodo de 1974 al 2001. Los datos utilizados para el análisis de este periodo fueron imágenes de satélite de alta resolución, mientras que para el periodo comprendido entre 1997 y 2001 se utilizaron imágenes de satélite de baja resolución. El análisis se apoyó en el uso intensivo de técnicas de percepción remota (PR), sistemas de información geográfica (SIG) y análisis estadísticos. El análisis de largo plazo (1974-2000) sugiere que las superficies del vaso del lago de Cuitzeo varían con el tiempo y que estos cambios muestran relación con el comportamiento de la precipitación y la temperatura media mensual del año antecedente. Los cambios monitoreados en el corto plazo (1997-2001) muestran que la superficie del lago de Cuitzeo presenta una tendencia a la reducción de su cuerpo de agua. Las observaciones de campo desde 1998, indican una desecación anual recurrente, especialmente en la sección oeste del lago. Se asume que este comportamiento es resultado de la sequía que afecta a toda la cuenca desde mediados de los años noventa. Los modelos de regresión contruidos a partir de las series de largo plazo sugieren que la superficie del lago del Cuitzeo puede ser estimada a partir de los datos de precipitación y temperatura media mensual del año precedente.

Palabras clave: Manejo del lago, percepción remota, sistemas de información geográfica, Cuitzeo, México.

*Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México, Antigua Carretera a Pátzcuaro no. 8701, Col. Ex Hacienda de San José de la Huerta, 58190, Morelia, Michoacán, México. E-mail: mmendoza@ciga.unam.mx; gbocco@ciga.unam.mx; erna@oikos.unam.mx.

**Campo Experimental Uruapan, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Av. Latinoamericana No. 1101, CP 60500, Uruapan, Michoacán, México, E-mail: bravo.miguel@inifap.gob.mx

Recent trends in the extension of Cuitzeo Lake. An approach based on Remote Sensing, Geographic Information Systems and Statistical Analysis

Abstract. This research describes and analyzes the change in the surfaces occupied by Cuitzeo's lake during the period 1974-2001. This research is based on remote sensing and geographic information techniques, as well as statistical analysis. High resolution satellite image data were used to analyse the 1974-2000 period, and very low resolution satellite image data were used for the 1997-2001 period. The long term analysis (1974-2000) indicates that lake surfaces of Cuitzeo changes along the time and that these changes are associated to monthly mean precipitation and temperature data occurred in the previous year. Short term monitoring (1997-2001) indicates that Cuitzeo lake surfaces have a reduction trend in the water body. Field observations also pointed out that yearly desiccation are recurrent, particularly, in the west section of the lake. These results suggest that this behaviour is consequence of a drought period in the basin. This drought began in the middle of 1990's. The regression models constructed from long term series, suggest that the surfaces of the lake can be estimated by monthly mean precipitation and temperature data series of the year before.

Key words: Lake water management, remote sensing, geographical information systems, Cuitzeo, Mexico.

INTRODUCCIÓN

Las fluctuaciones de las superficies y niveles de agua de los lagos continentales han sido relacionados a dos procesos. El primero se asocia a cambios climáticos a nivel regional y global (Molnár *et al.*, 2002), como resultado del calentamiento global. En este sentido, los cambios pueden reflejarse en la variación de la precipitación y la evaporación sobre los cuerpos de agua y sus cuencas de alimentación (Mercier *et al.*, 2002). El segundo a la influencia antropogénica que permite la reducción de los cuerpos de agua por cambios en la cobertura y uso del suelo (deforestación, incremento de la actividad ganadera, urbanización) o que interfiere indirectamente en los cuerpos de agua por extracción de sedimentos y agua, ingeniería de ríos y construcción de presas (Molnár *et al.*, 2002). En ambos casos, pueden existir efectos adversos sobre la disponibilidad de agua, como en el Lago Chad (Birkett, 2000).

Un elemento importante de la investigación actual en cambio y variabilidad climática es el análisis de tendencias de variables hidrodinámicas realizado a partir de registros de datos (Molnár y Ramírez, 2001). La variabilidad de las superficies ocupadas por cuerpos de agua, tales como lagos y mares interiores, puede ser evalua-

da y monitoreada a partir del uso de imágenes aeroespaciales (fotografías aéreas convencionales y digitales, imágenes de satélite y mapas existentes; Schneider *et al.*, 1985; Mendoza *et al.*, 2002). Este tipo de análisis se apoya en el uso intensivo de técnicas de percepción remota (PR) y sistemas de información geográfica (SIG).

El análisis de series de tiempo es aplicable en muchos campos de la ciencia y se ha convertido en una herramienta esencial en hidrología (Salas, 1992); en general los procesos hidrológicos, tales como precipitación y escurrimiento, suponen una serie temporal continua. Los cambios en las superficies del lago pueden analizarse como una serie de tiempo que proporciona información acerca de la variabilidad climática de la región.

El lago de Cuitzeo es el segundo cuerpo de agua continental más grande en México; y debido a su profundidad, el humedal continental más importante del país. El lago ha sido fuertemente impactado por las actividades humanas que se desarrollan en la cuenca que lo alimenta, especialmente importante es el efecto del cambio de cobertura vegetal y uso del suelo (CCVUS), representado por la urbanización y la ganaderización de las cuencas (López *et al.*, 2002) y probablemente por los cambios climáticos regionales y globales.

Específicamente, el lago de Cuitzeo representa un cuerpo de agua con profundidades menores a un metro, consecuentemente las superficies medidas corresponden en buena medida a los volúmenes de agua presentes en la cubeta lacustre. Sin embargo, la Comisión Nacional del Agua en el estado de Michoacán no tiene un registro actualizado de los datos de nivel de agua; situación común en países con escasos recursos. Este lago atraviesa por periodos de contracción y desecación recurrente, que originalmente se asociaban a deforestación en la parte alta de la cuenca, la cual propiciaba la erosión de suelos, su posterior transporte y sedimentación en el vaso del lago. Aunado a este problema, la falta de vegetación puede colaborar en la reducción de la precipitación en la cuenca. Trabajos recientes indican que la deforestación no es el principal proceso de cambio de cobertura vegetal en la cuenca (*Ibid.*); en consecuencia, la erosión no es un problema generalizado en la cuenca; se puede concluir que el modelo teórico de deforestación-erosión-transporte-sedimentación está sobre-utilizado en la cuenca, para explicar los problemas de degradación (Mendoza, 2002).

Este trabajo tiene por objetivo describir y analizar la dinámica de cambio de las superficies ocupadas por el lago de Cuitzeo en el periodo comprendido entre 1974 y 2001, a partir de la interpretación de imágenes de alta resolución (20 x 20 m y 30 x 30 m, Landsat ETM y MSS, respectivamente), y de imágenes de baja resolución (1 km², NOAA AVHRR) durante el periodo 1997 al 2000. De esta manera es posible proyectar la situación por la que puede atravesar el lago si los patrones de precipitación y temperatura se comportan de la misma manera que los registros históricos.

ÁREA EN ESTUDIO

La cuenca del lago de Cuitzeo se ubica en la región hidrológica de Lerma-Chapala, dentro del Sistema Volcánico Transversal en el Centro

occidente de México, entre los 19°30' y 20°05' latitud Norte y 100°35' y 101°30' longitud Oeste. La cuenca tiene una superficie aproximada de 4000 km². El lago de Cuitzeo cubre aproximadamente 300 km² del fondo de la cuenca (Figura 1).

La precipitación en la cuenca es de 841.9 mm y muy variable para la zona en estudio (Dest. est. = 190.41 mm, CV = 22.6), mientras que la temperatura presenta menos variaciones alrededor de la media (17.3°C), (Dest. Est. 1.4°, CV = 8). La precipitación se incrementa desde el norte hacia el sur, mientras que la temperatura asciende desde el sur hacia el norte. La distribución espacial de estos parámetros indica que el área en estudio se ubica en una zona transicional, entre los climas templado seco a climas templado húmedo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se integraron los datos diarios de precipitación y temperatura de las ocho estaciones meteorológicas localizadas alrededor de lago y con los registros más amplios (Figura 2; Cuadro 1). Los datos de precipitación y temperatura se agregaron a medias mensuales y anuales, y se calculó el Índice de Severidad de la Sequía (PDSI). Con las series de tiempo se realizaron análisis de series de tiempo, frecuencia y tendencias (Figura 3).

El PDSI se define como la cantidad de precipitación requerida para la operación normal de un ecosistema, ciudad o zona agrícola durante un periodo, depende del clima promedio de área y de las condiciones prevalecientes antes y durante el periodo en cuestión (Alcántara, 2002). La diferencia entre la precipitación real y la precipitación climáticamente apropiada para las condiciones existentes representa una medida directa de la influencia que tiene la humedad a lo largo del tiempo con respecto a la normal. La ponderación de las diferencias genera un índice que es razonablemente comparable tanto en el tiempo como en el espacio (Palmer 1965).

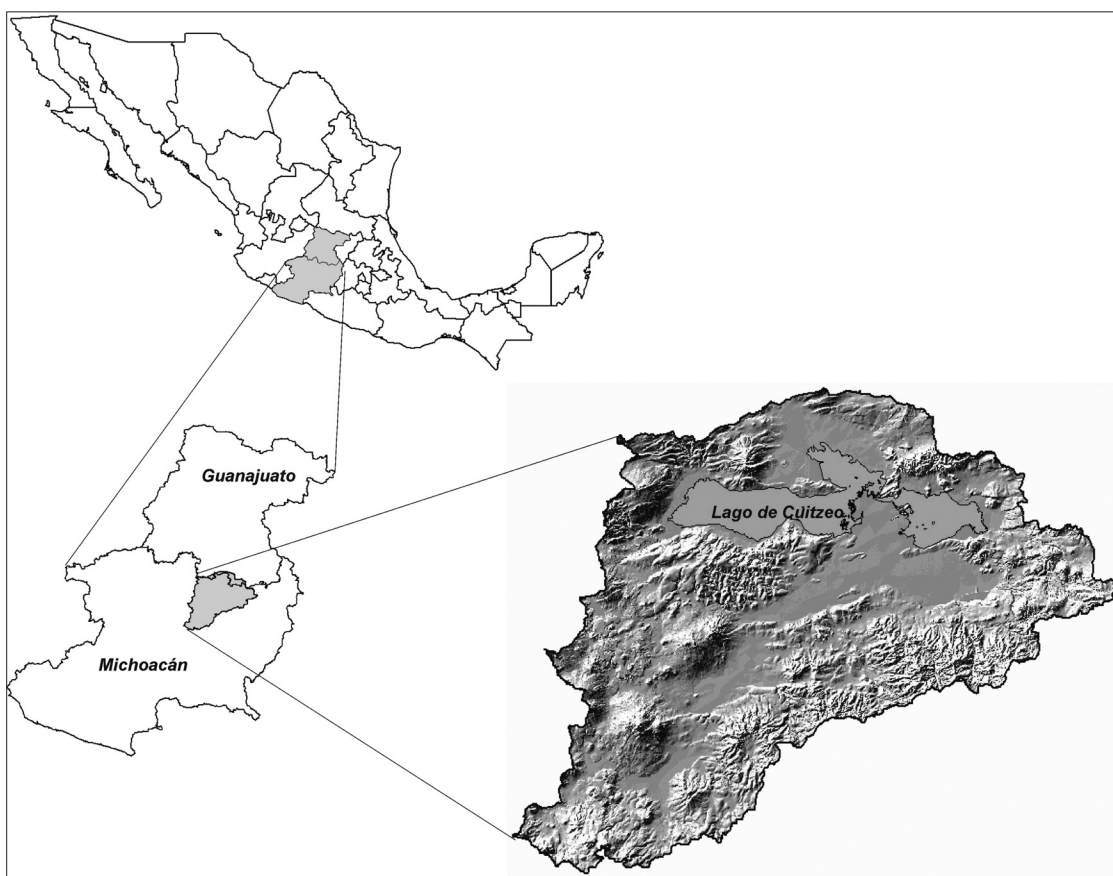


Figura 1. Área en estudio.

Cuadro 1. Estaciones meteorológicas utilizadas en los análisis estadísticos de la cuenca del lago de Cuitzeo

Nombre	Clave	Años de registro de temperatura	Años de registro de precipitación
Carrillo Puerto	16016	31	32
Cuitzeo	16027	72	74
Chucándiro	16034	20	22
Huingo	16052	57	57
Morelia	16081	52	49
Zinzimeo	16091	30	33
Copándaro de Jiménez	16155	29	26
Cointzio	16022	57	61

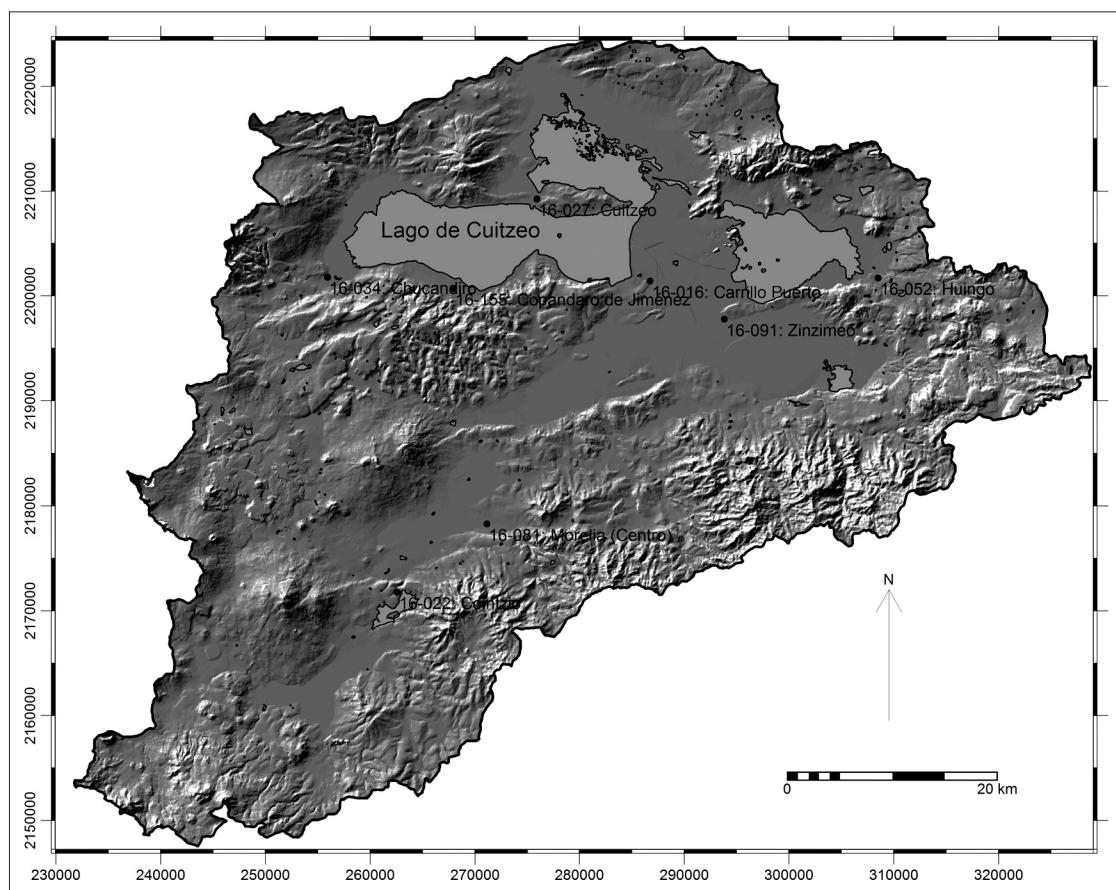


Figura 2. Modelo digital de terreno sombreado con la distribución de estaciones meteorológicas utilizadas en el análisis.

EL PDSI está basado en un balance hídrico que considera la variación del agua disponible para la vegetación. Los datos climáticos utilizados en el índice son: precipitación mensual y temperatura media mensual. El PDSI realiza una normalización de las condiciones climáticas para cada zona; estos cálculos hacen comparable dos o más sitios entre sí (Palmer, 1965). Una descripción detallada del algoritmo utilizado para el cálculo del PDSI se encuentra en Alcántara (2002).

El trabajo requirió la interpretación visual de fotografías aéreas con estereoscopios de espejos e interpretación visual en pantalla

de imágenes de satélite (Cuadro 2) y la digitalización de la línea de costa de la cartografía topográfica de INEGI (1990), la cual fue elaborada con fotografías a escala 1:50 000 de 1974 (Figura 3). La base de datos geográfica utilizada integra todas la imágenes de satélite, fotografías aéreas y mapas disponibles.

Con las imágenes NOAA AVHRR se estimaron las superficies mensuales de los cuerpos de agua de Chapala y Cuitzeo para el periodo de 1997 al 2001, a través de interpretación visual en pantalla. La resolución espacial y la respuesta espectral de estas imágenes permiten que la interpretación de la superficie de agua

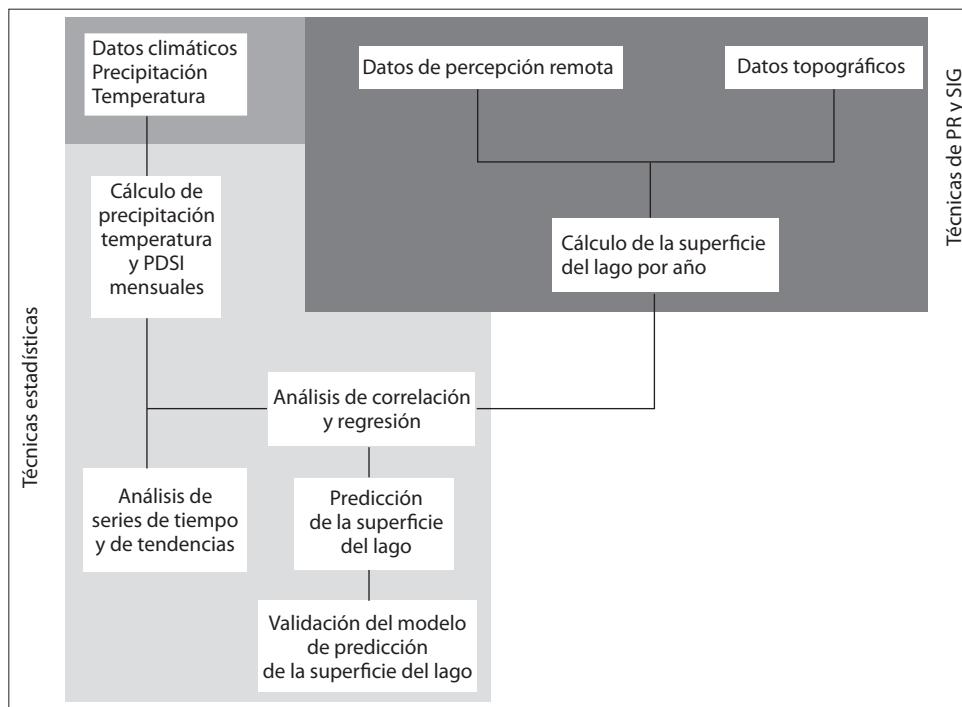


Figura 3. Diagrama de flujo del método de la investigación.

tenga errores de alrededor de 1 km². Con las imágenes de mayor resolución se estimaron las superficies del lago de Cuitzeo para la época de secas de los años 1974, 1976, 1986, 1992, 1993, 1996 y 2000. Por la resolución espacial y el contraste entre la respuesta espectral del agua y la tierra en este tipo de documentos, se logra que la interpretación de la distribución del cuerpo de agua del lago de Cuitzeo presente un mínimo de errores de interpretación. La interpretación en pantalla, la construcción y manejo de la base de datos geográfica se realizó en ILWIS (Integrated Land and Water Information System, 2002).

ANÁLISIS ESTADÍSTICOS

Análisis de series de tiempo

Una serie de tiempo es un conjunto temporal de observaciones de las principales variables

que intervienen en el ciclo hidrológico, colectadas de manera secuencial, cuyos valores ocurrieron durante un intervalo de tiempo (Δt). El análisis de series de tiempo puede realizarse seleccionando valores de la variable X a intervalos de tiempo igualmente espaciados (cada mes, cada año) o a intervalos irregulares (puntos de inflexión).

Una característica de las series de tiempo de variables hidrológicas es su variabilidad determinística, estocástica o ambas. En ocasiones se observan tendencias, ciclos o saltos en dichas series producto de la influencia humana o de la naturaleza. Estas componentes determinísticas se aprecian mejor cuando se construyen gráficos de dispersión de valores, que muestren su distribución y el promedio de la serie completa de observaciones. La media móvil se obtiene:

$$\frac{X_1 + X_2 + \dots + X_N}{N}, \quad \frac{X_2 + X_3 + \dots + X_{N+1}}{N}, \quad \frac{X_3 + X_4 + \dots + X_{N+2}}{N} \quad (1)$$

Cuadro 2. Documentos aeroespaciales interpretados visualmente en este trabajo

Documento aeroespacial	Tipo	Año
Compuesto mensual del NDVI	NOA-AVHRR	1997 a 2001
Compuesto falso color	Landsat MSS	1976, 1986, 1979 y 1992
Compuesto falso color	SPOT	1996
Espaciomapa (representación del compuesto en falso color)	Landsat TM	1993
Fotografías aéreas	pancromáticas B/N, escala 1:50 000	1974
Fotografías aéreas	pancromáticas B/N, escala 1:37 000	2000

La suma de cada grupo se llama suma móvil de orden N . El orden, N , puede ser cualquier valor, pero si es pequeño, entonces, puede ser poco efectivo para minimizar la variabilidad aleatoria. Por el contrario, si N es grande, algunos componentes como los cíclicos pueden enmascarse. Las series de tiempo anuales a menudo son analizadas con promedios móviles de cinco años.

Si la determinación de N es correcta, se pueden visualizar los efectos de largo plazo de ciclos húmedos y ciclos de sequía. Los periodos húmedos se reconocen comparando la línea de los promedios móviles de cinco años con la línea de la media de la serie completa o media única. Durante un periodo húmedo, la línea de los promedios móviles siempre se ubicará arriba de la línea de la media única. Durante periodos de sequía, la línea de las medias móviles siempre estará debajo de la línea de la media única.

Análisis de frecuencia

La precipitación y la temperatura media mensual fueron ajustadas a las distribuciones normal y lognormal para determinar la probabilidad de ocurrencia de eventos mayores a la media. Basado en la distribución de los parámetros, un evento a su probabilidad (Hann, 1994; ecuación 2):

$$x = \bar{x} + K_T \sigma \quad \text{y} \quad \log x = \overline{\log x} + K_T \sigma_{\log x} \quad (2)$$

El periodo de retorno, el cual expresa la probabilidad de un evento, p , fue determinado utilizando:

$$TP = \frac{1}{p} \quad (3)$$

Análisis de tendencia

La evaluación de las tendencias de las series de precipitación, temperatura y PDSI se realizó con la prueba no paramétrica de Mann-Kendall (Kendall, 1938). La prueba utiliza un procedimiento basado en rangos y es adecuada para datos sin distribución normal, datos censados, datos con valores extremos y tendencia no lineal. La hipótesis nula H_0 es que los datos $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ son una muestra independiente e idénticamente distribuida (iid) de variables aleatorias. La hipótesis alterna H_1 es que la distribución de x_k y x_j no es idéntica para todos los $k, j \leq n$ con $k \approx j$. El análisis estadístico de la tendencia S se define como (Hirsch *et al.*, 1993; ecuación 4):

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad (4)$$

donde $\text{sgn}()$ es la función de signo.

De acuerdo con H_0 la distribución S es normal en el límite como $n \rightarrow \infty$. La media de la varianza de S , considerando que puede haber nodos en las series x , son:

$$E[S] = 0 \quad \text{y}$$

$$\text{var}[S] = \left[n(n-2n+5) - \sum_t t(t-1)(2t+5) \right] \div 18 \quad (5)$$

donde t es la longitud de alguna cola y denota a la sumatoria sobre todos los nodos con longitud t . La asunción de normalidad para S se encuentra aún para una n pequeña ($n \approx 10$) con una correlación de ± 1 y la variación estándar típica es utilizada para probar la hipótesis (Hirsch *et al.*, 1993; ecuación 6):

$$Z = \begin{cases} \frac{[S-1]}{\sqrt{\text{var}(S)}} & \text{si } S > 0 \\ 0 & \text{si } S = 0 \\ \frac{[S+1]}{\sqrt{\text{var}(S)}} & \text{si } S < 0 \end{cases} \quad (6)$$

En una prueba de dos lados para tendencias, la hipótesis nula es rechazada en un nivel de significancia de α si $|Z| > Z_{(1-\alpha/2)}$, donde $Z_{(1-\alpha/2)}$ es el valor de la distribución normal que excede $\alpha/2$. Un valor positivo de Z indica una tendencia ascendente; un valor negativo indica una tendencia descendente en la serie de tiempo evaluada. En este trabajo las tendencias son identificadas a un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$. La prueba estadística de tendencias Z es utilizada para indicar la tendencia significativa, pero no es una cuantificación de la magnitud de la tendencia (Molnár y Ramírez, 2001). En este trabajo se aplicó la prueba de Mann-Kendall para evaluar únicamente datos no estacionales e independientes (precipitación, temperatura y PDSI anuales) y por lo tanto ajustes que consideran estacionalidad y correlación serial en el examen de los datos que no fueron incluidos (Helsel and Hirsch, 1992).

Análisis de regresión y correlación

Con los datos de precipitación y temperatura mensual del año antecedente a la superficie calculada para el lago, se realizaron análisis de correlación con objeto de encontrar aquellas variables independientes que mejor se asociaban a la distribución de la superficie del lago. El análisis de correlación también fue utilizado para evaluar multicolinearidad. Posteriormente se corrió un análisis de regresión lineal múltiple, con el cual se construyeron modelos de regresión y se desarrolló una relación explicatoria de la variación observada en la variable de respuesta (superficie del lago).

RESULTADOS

Serie de tiempo

El análisis indicó que las estaciones Cuitzeo, Huingo y Cointzio, presentan un comportamiento cíclico, principalmente para la serie de precipitación. La precipitación y valores de PDSI entre 1940 y 1960 presentan un descenso en sus valores; este comportamiento se presenta en las Figuras 4 y 5 correspondientes a la estación Cuitzeo, la cual se considera representativa de las ocho estaciones. Sin embargo, en 1958 todas las estaciones registraron un incremento considerable de la precipitación debido a la presencia de un fuerte evento de "El Niño" (Null, 2004). La precipitación en ese año fue cercana al doble de la media anual de cada estación; comportamiento similar al del resto de las estaciones del centro del país (García y Vidal, 1981). Este incremento ocasiona que en varias estaciones el periodo de precipitación por debajo de la media termine y empiece un nuevo ciclo más húmedo.

La reducción en la precipitación empieza nuevamente a finales de los años setenta y termina al principio de la década de 1990; este periodo es seguido por un periodo húmedo, relativamente corto (aproximadamente cinco

años). A mediados de la década de los noventa se aprecia nuevamente una reducción de las precipitaciones medias anuales y un aumento en la presencia de índices de sequía en las estaciones de la cuenca.

En síntesis, la serie de precipitación muestra tres periodos relativamente secos: a) 1940 a 1960, b) 1980 a 1990 y c) 1995 a 2000. Estos periodos corresponden con la reducción registrada de la superficie del lago (1942, 1946 y 1962; Alvarado-Díaz *et al.*, 1994; Corona, 1979), y los años 1942 y 1962 corresponden a la época de total desecación del cuerpo de agua (Alvarado-Díaz *et al.*, 1994). Estas fechas se localizan dentro del periodo de sequía más importante. La amplitud del lago se redujo para 1986 a 250.8 km², esta reducción corresponde al segundo periodo de sequía importante, el cual fue evaluado con la imagen de satélite Landsat

MSS. Por último, de 1995 a la fecha, el lago también presenta niveles bajos y corresponden al tercer periodo de sequía en la zona para las últimas décadas.

El análisis visual de las gráficas de series de tiempo de datos de precipitación de la estación Cuitzeo muestra evidencias de ciclos recurrentes con una duración aproximada de 20 años. El primer ciclo es seco, éste empieza en 1934 y termina en 1957, con una duración de 23 años. El segundo corresponde a un ciclo húmedo con una duración de 21 años, los cuales inician en 1957 y culminan en 1978, el último ciclo es seco y tiene una duración de 20 años, que inició en 1978 y termina en el 2000 (año en que termina la serie de datos; Figura 4).

En la Figura 6 se muestran las superficies del lago durante la época de secas en los distintos documentos aeroespaciales (Landsat MSS

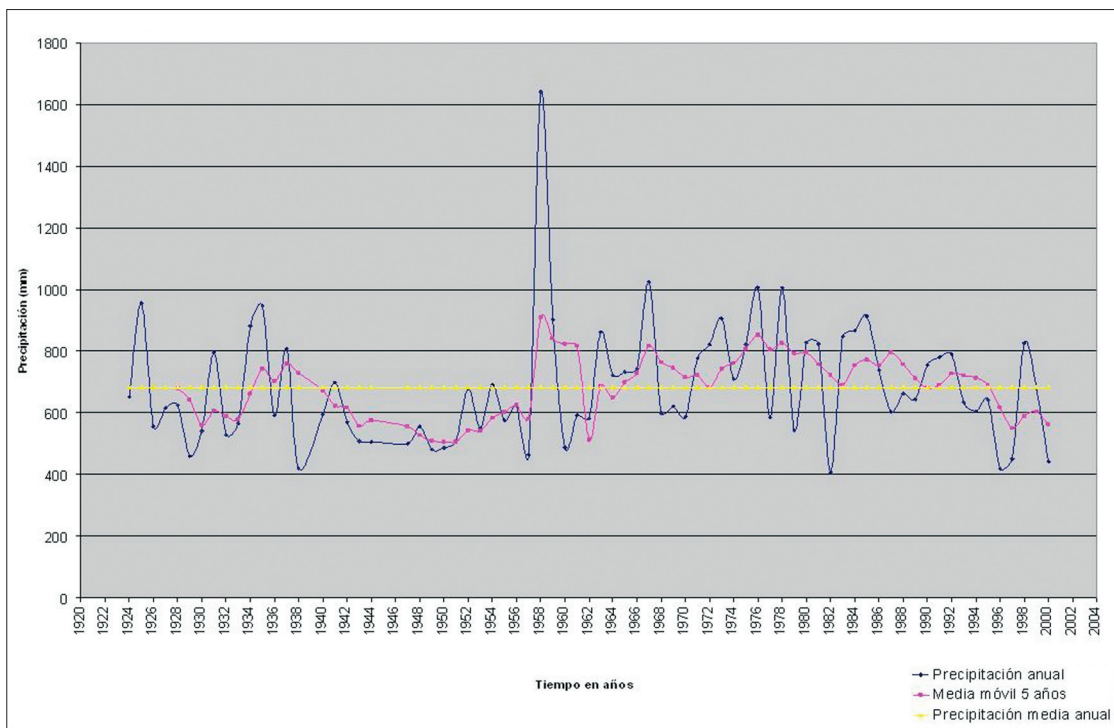


Figura 4. Serie de tiempo de precipitación de la estación Cuitzeo.

y TM, SPOT, fotografías aéreas y mapas topográficos). Aunque es una serie corta, en ella se observan variaciones a lo largo del tiempo. La mayor superficie se calculó para 1994 (350 km²; fuera de los periodos relativamente secos), la menor superficie se presentó en 1986 (250 km²; localizada en el segundo periodo relativamente seco); es decir, la superficie del lago varía de acuerdo con los cambios de precipitación y periodos de sequía en la cuenca (Figura 6). En la Figura 7 se muestra la distribución del lago en 1976, 1986, 1992 y 1996.

La dinámica de las superficies cubiertas del lago de Cuitzeo es fuertemente estacional a lo largo de un año (entre meses) y a lo largo de los años (cíclica). En la Figura 8 se observa la variación de las superficies de los lagos de Chapala y Cuitzeo. Las superficies fueron calculadas a partir de la interpretación de las imágenes de NOAA AVHRR. En la figura anterior se aprecia un comportamiento estacional, fuertemente

perturbado por la sequía en la cuenca. Tanto el lago de Chapala como el de Cuitzeo, presentan tendencias a la reducción de la superficie ocupada por agua. Cabe mencionar que el de Cuitzeo se desecó temporalmente durante varios meses en 2000 y 2001.

Probabilidad de eventos y periodos de retorno

Si se considera la precipitación y temperatura registrada durante los años con la menor superficie cubierta por agua en el lago, en general estos parámetros meteorológicos indican que corresponden a años con probabilidad de ocurrencia de al menos 37%, con periodos de retorno mayores a tres años. Al analizar la frecuencia de eventos con precipitaciones menores a la media, así como de temperaturas mayores a la media, se observa que la frecuencia de ocurrencia de años secos y cálidos es

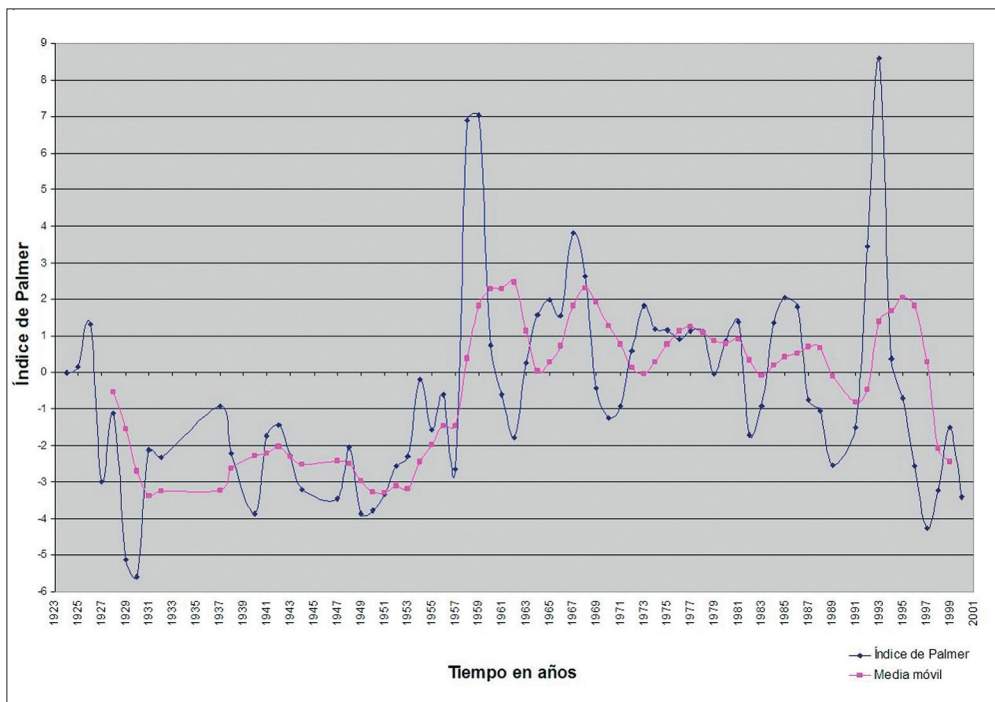


Figura 5. Serie de tiempo del índice de Palmer de la estación Cuitzeo.

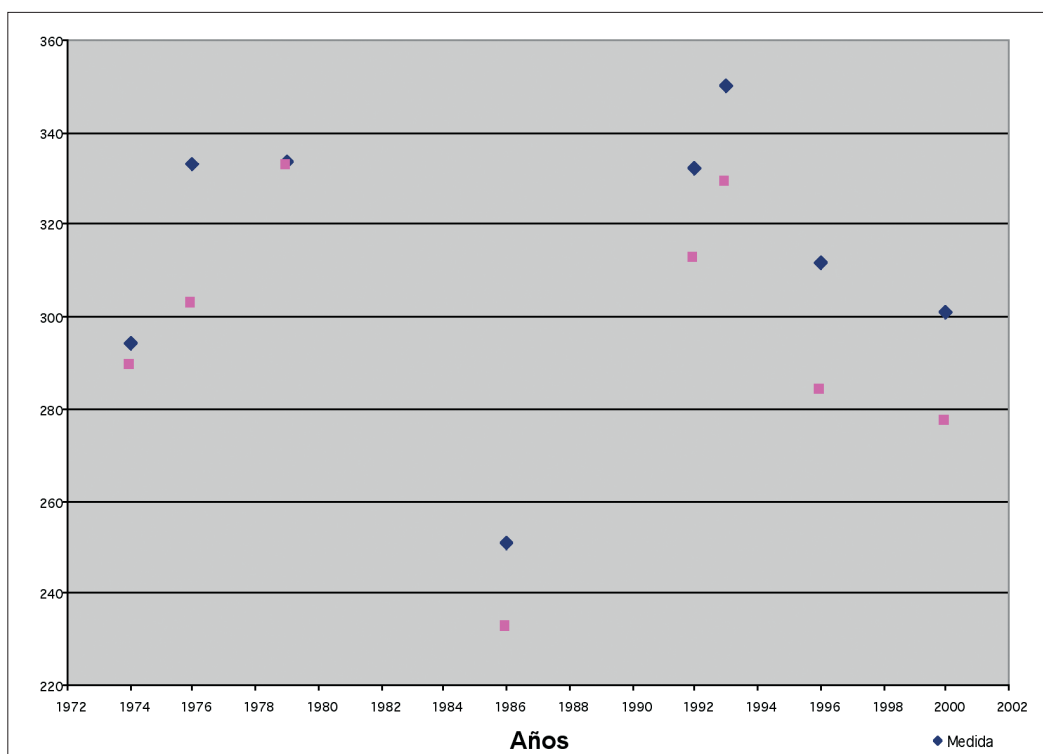


Figura 6. Superficie del lago de Cuitzeo desde 1974 hasta el 2000.

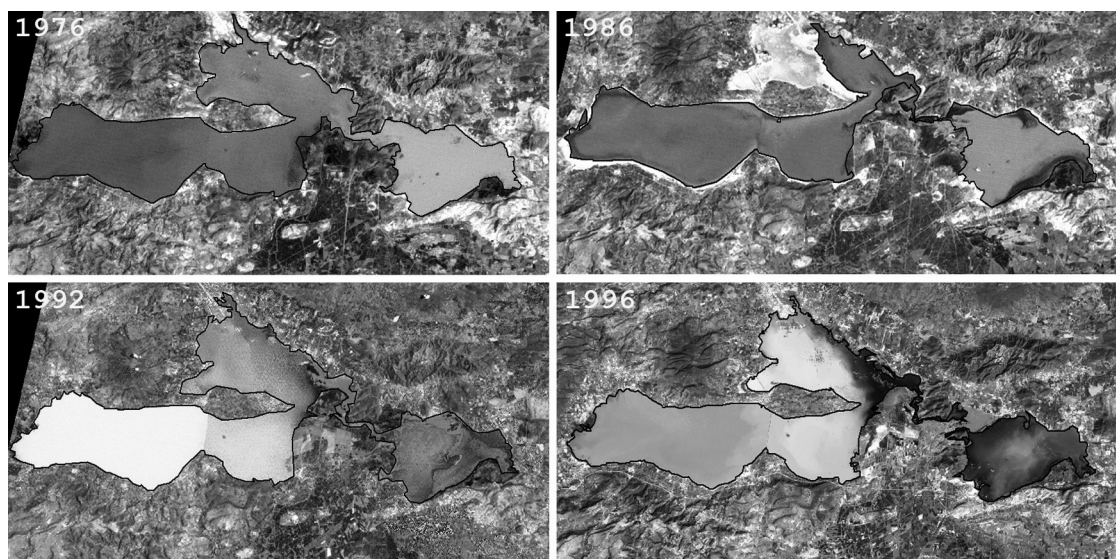


Figura 7. Interpretación de la distribución de la superficie del lago para los años 1976, 1986, 1992 y 1996. Se aprecia claramente el contraste de la respuesta espectral entre el agua y la tierra.

mayor en las últimas dos décadas del siglo pasado (Cuadros 3 y 4).

Cuadro 3. Años con precipitación media anual menor a la media total por estación meteorológica

Década	Cuitzeo	Morelia	Zinzimeo
1990-2000	7	8	5
1980-1989	4	7	7
1970-1979	3	9	5
1960-1969	5	1	
1950-1959	7	5	
1940-1949	7	4	
1930-1939	5	4	
1920-1929	5	6	

Cuadro 4. Años con temperatura media anual mayor a la media total por estación meteorológica

Década	Cuitzeo	Morelia	Zinzimeo
1990-2000	8	8	10
1980-1989	7	7	9
1970-1979	9	9	2
1960-1969	1	1	
1950-1959	5	1	
1940-1949	4		
1930-1939	4		
1920-1929	6		

En 1998 el lago prácticamente se colmató de agua 322 (km²). La precipitación durante ese año fue de 827.2 mm, la probabilidad de ocurrencia de una precipitación similar o mayor es de 20%; la cual corresponde a una precipitación con un periodo de retorno de cinco años a una probabilidad ($X > x$) de 0.20.

Análisis de tendencia

El análisis de tendencia indica que sólo la estación Zinzimeo presenta un incremento

en la temperatura y una reducción en la precipitación PDSI estadísticamente significativa ($p=0.05$; Cuadro 5). El resto de las estaciones analizadas no presentan tendencias significativas. Esto coincide con el comportamiento cíclico de los registros de precipitación y temperatura. Probablemente la estación Zinzimeo presenta las tendencias descritas porque sólo tiene registrado un periodo de tiempo relativamente corto (alrededor de 30 años), y la precipitación registrada es relativamente baja en relación con el resto de las estaciones.

Análisis de correlación y de regresión

Considerando que las series de precipitación, temperatura y PDSI son cíclicas y la superficie del cuerpo de agua presenta el mismo comportamiento; se realizó un análisis de correlación entre la superficie del lago (y) y las variables antes mencionadas (x_1 , x_2 , x_3). El análisis indica que, en general, el tamaño del cuerpo de agua se relaciona con la precipitación antecedente; las correlaciones más altas se obtuvieron con los meses de febrero, marzo, abril, mayo y junio. En todos los casos la precipitación de enero tiene una correlación positiva, pero nunca fue mayor de ± 0.7 , por lo que nunca se utilizó este mes para la generación de modelos de regresión múltiple. El umbral mínimo seleccionado en la construcción de modelos fue ± 0.7 . El valor crítico para una correlación con $n=7$ es 0.58 con una $p=0.1$ (Zar, 1996).

Empíricamente no se esperaba que las precipitaciones antecedentes fueran correlacionables negativamente con la superficie del lago; sin embargo, sólo en cuatro de las correlaciones el coeficiente de correlación fue positivo. En seis casos el coeficiente fue negativo (Cuadro 6). De la misma forma, se consideraba *a priori* que el coeficiente de correlación de la superficie del lago con la temperatura de los meses anteriores sería negativo. Sin embargo, en tres casos éste fue positivo y en un caso negativo (Cuadro 6). Los resultados sugieren que la

Cuadro 5. Resultados del análisis de tendencia

Estación	Temperatura media anual	Precipitación media anual	Índice de Palmer
Morelia	4.17482	0.107606	-1.80427
Cuitzeo	0.704936	1.61002	2.31006
Huingo	-2.82926	1.24598	0.743456
Carrillo Puerto	-0.679857	0.178381	0.135971
Zinzimeo	3.8715	-2.95943	-3.92503
Copándaro de Jiménez	1.70698	-0.116775	-0.677294
Chucándiro	-0.0324443	-2.19944	-0.811107
Contzio	0.561277	0.433699	-0.323541

precipitación invernal es significativa para mantener el sistema hidrológico del lago de Cuitzeo. La escasa precipitación durante los meses de marzo y abril, anterior al inicio de la temporada de lluvias, genera coeficientes de correlación negativos porque el balance precipitación-evaporación es negativo. Los coeficientes al final de la época de lluvias son positivos porque el balance entre precipitación- evaporación es positivo y permite que el sistema hidrológico se abastezca.

Los modelos de regresión de las estaciones seleccionadas se presentan en los Cuadros 7 y 8. Todos los modelos presentaron un nivel de una $p < 0.1$ y una $F > 4$; a excepción del construido con los datos de la estación Huingo. El mejor de los modelos de regresión corresponde al elaborado con la estación Cuitzeo (Cuadro 7).

Estos modelos permiten predecir la superficie del cuerpo de agua del lago de Cuitzeo para la época de secas, basados sólo en datos de precipitación y temperatura mensual antecedente. Debido a la falta de datos actualizados de precipitación y temperatura, se realizó la validación de los modelos apoyado en un análisis de sensibilidad, construyendo nuevos modelos y utilizando seis observaciones, con objeto de predecir la superficie del año

no incluido en el modelo. En el Cuadro 8 se aprecia el modelo de regresión para la estación Cuitzeo en el 2000.

Para evaluar de manera cuantitativa la predicción basada en los modelos de regresión, se realizó una prueba de χ^2 (Statistica for Windows®, ver. 4.5). Las hipótesis probadas fueron las siguientes:

H0: No existen diferencias significativas entre las superficies observadas (por medio de interpretación visual) y las superficies predichas (a partir de los modelos de regresión).

H1: Las diferencias entre las superficies observadas y predichas son significativas a un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$.

Los resultados muestran un valor de χ^2 de 1.28, por debajo del valor crítico de 14.067; por lo tanto, la hipótesis nula fue aceptada, sugiriendo que el modelo de regresión lineal fue exitoso para predecir la superficie del lago. Por ejemplo, en 1992, la superficie calculada para el lago de Cuitzeo en 1992 fue de 332.6 km²; mientras que la superficie medida sobre la imagen de satélite fue de 333.7 km², la diferencia entre el valor estimado y el medido es despreciable (<3%); en 1996, la superficie estimada fue de 284 km² y la superficie calculada sobre la imagen de satélite fue de 311.6 km², una diferencia menor a 9%.

Cuadro 6. Matriz de correlación entre las precipitaciones antecedentes con la superficie del lago

	PENE	PFEB	PMAR	PABR	PMAY	PJUN	PJUL	PAGO	PSEP	PDIC	PMA	TENE	TABR	TJUN	TJUL	TAGO	TSEP	TOCT	TNOV	TDIC	TMA
Zinzimeo	0.584	0.468	-0.306	-0.221	0.225	-0.764	-0.547	-0.144	0.266	-0.420	-0.277	0.614	0.726	0.011	-0.340	-0.389	-0.311	-0.360	-0.442	-0.235	0.011
Cuitzeo	0.560	0.743	0.083	-0.847	-0.206	-0.837	-0.206	-0.807	0.357	0.029	-0.507	0.228	0.355	0.214	0.689	0.534	-0.112	0.444	0.434	0.790	0.603
Morelia	0.581	0.462	-0.839	-0.071	0.322	-0.415	-0.057	0.775	0.657	-0.651	0.553	0.151	0.027	-0.728	-0.329	-0.273	-0.517	-0.471	-0.206	0.007	-0.434
Huingo	0.668	0.532	0.020	-0.605	0.361	0.145	0.022	-0.357	0.197	-0.095	0.305	0.059	-0.503	0.833	0.680	0.238	0.260	-0.579	-0.196	0.030	-0.066
Copándaro	0.570	0.944	0.663	0.156	0.282	-0.910	0.260	0.475	0.541	0.397	0.663	-0.025	0.302	0.663	0.040	0.171	0.139	-0.442	0.412	0.338	0.142
Carrillo P.	0.623	0.617	0.411	-0.780	0.334	-0.054	0.342	-0.396	0.056	-0.044	0.169	-0.137	0.191	0.616	0.354	-0.012	0.049	-0.520	0.355	0.028	0.206
Chucándiro	0.532	0.401	-0.841	-0.486	0.734	-0.550	0.378	0.093	0.631	-0.238	0.477	0.340	-0.160	0.095	0.562	0.458	-0.556	-0.633	-0.695	-0.679	-0.333
Cointzio	0.446	0.102	-0.435	-0.943	-0.649	-0.332	0.0375	0.467	0.442	0.0301	-0.027	0.512	0.096	0.765	0.439	0.335	0.343	-0.023	0.135	0.291	0.223

PENE-Precipitación media mensual de enero; PFEB-Precipitación media mensual de febrero; PMAR-Precipitación media mensual de marzo; PABR-Precipitación media mensual de abril; PMAY-Precipitación media mensual de mayo; PJUN-Precipitación media mensual de junio; PJUL-Precipitación media mensual de julio; PAGO-Precipitación media mensual de agosto; PSEP-Precipitación media mensual de septiembre; PDIC-Precipitación media mensual de diciembre; PMA-Precipitación media anual.

TENE-Temperatura media mensual de enero; TFEB-Temperatura media mensual de febrero; TMAR-Temperatura media mensual de marzo; TABR-Temperatura media mensual de abril; TMAY-Temperatura media mensual de mayo; TJUN-Temperatura media mensual de junio; TJUL-Temperatura media mensual de julio; TAGO-Temperatura media mensual de agosto; TSEP-Temperatura media mensual de septiembre; TOCT-Temperatura media mensual de octubre; TNOV-Temperatura media mensual de noviembre; TDIC-Temperatura media mensual de diciembre TMA-temperatura media anual.

Cuadro 7. Modelo de regresión lineal simple de la superficie del lago *vs.* estación Cuitzeo

Variables predictoras	Coeficiente	Error estándar	T de Student	P	VIF
Constante	393.486	63.6937	6.18	0.0252	
PFEB	2.10031	0.58857	3.57	0.0703	2.5
PJUN	-0.39335	0.06883	-5.71	0.0293	1.8
PABR	-1.86813	0.28119	-6.64	0.0219	1.7
TDIC	-1.54543	4.01835	-0.38	0.7376	3.5
r ²	0.9616	0.9616	error medio cuadrático		89.0811
r ² ajustada		0.9105	desviación estándar		9.43828
Fuente	DF	SS	MS	F	P
Regresión	4	6699.39	1674.85	18.80	0.0184
Residual	3	267.243	89.0811		
Total	7	6966.63			
Casos incluidos		8	casos faltantes		0

Cuadro 8. Modelo de regresión lineal simple de la superficie del lago *vs.* estación Cuitzeo (excluyendo el año 2000)

Variables predictoras	Coeficiente	Error estándar	T de Student	P	VIF
Constante	394.149	91.5278	4.31	0.1453	
PFEB	2.07596	1.03190	2.01	0.2937	3.3
PJUN	-0.3945	0.10146	-3.89	0.1603	1.9
PAPR	-1.88009	0.49809	-3.77	0.1649	2.3
TDIC	-1.56169	5.69294	-0.27	0.8296	3.5
r ²		0.9933	error medio cuadrático		42.6035
r ² ajustada		0.9666	desviación estándar		6.52713
Fuente	DF	SS	MS	F	P
Regresión	4	6340.08	1585.02	37.20	0.1223
Residual	1	42.6035	42.6035		
Total	5	6382.69			
Casos incluidos		7	Casos faltantes		0

DISCUSIÓN

El análisis de largo plazo (1974-2000) indica que las superficies del lago de Cuitzeo son sensibles a las condiciones climáticas preexistentes; especialmente a la precipitación y a la temperatura media mensual del año anterior. Consecuentemente, los modelos de correlación construidos a partir de las series de largo plazo presentan posibilidades para pronosticar la superficie del lago de Cuitzeo, la cual fue estimada a partir de los datos de precipitación y temperatura media mensual del año anterior.

Los cambios monitoreados en el corto plazo (1997-2001) indican que la superficie del lago de Cuitzeo presenta una tendencia a la reducción de su cuerpo de agua. Tendencias similares fueron encontradas en el lago de Chapala. Las observaciones de campo desde 1998, muestran que la desecación anual es recurrente, especialmente en la sección oeste del lago. Este comportamiento es coherente con la reducción de las precipitaciones y ascenso de las temperaturas, así como con los valores de PSDI calculados para los últimos años del siglo pasado. Sin embargo, el análisis de tendencia indica que no existen cambios significativos en la precipitación, en el PDSI, y en la temperatura en los últimos 75 años. La reducción del lago en los últimos diez años también puede ser mayor debido a un incremento en el uso de agua urbano y rural de la cuenca (Lopez *et al.*, 2002; Acosta, 2002). La ciudad de Morelia ha incrementado su población en 218% entre 1975 y 2000, mientras que su superficie tiene una tasa anual de crecimiento de 142 ha. El suministro de agua para riego cambió entre 1970 y 2000 de 3311 a 5333 m³/ha; mientras que el consumo de agua para ganado bovino se incrementó en un 20% aproximadamente en el mismo periodo.

Los procesos de urbanización y ganaderización, así como la actividad agrícola desencadenan o incrementan las tasas de procesos de contaminación y extracción de agua superficial y subterránea (Tóth 2000; Carrillo *et al.*, 1997).

Los cambios en estos procesos deben estar modificando los volúmenes de almacenamiento de agua en los distintos componentes del ciclo hidrológico.

Los resultados obtenidos también fueron analizados en función de la información geológica de la cuenca. Los registros sedimentarios del sistema lacustre abarcan del Mioceno Tardío al Cuaternario, y caracterizan un ambiente de depósito somero, que ocasionalmente ha presentado eventos de desecación total (Israde, 1995; Velázquez, 1998; Israde y Garduño 1999); además, se han encontrado depósitos piroclásticos y epiclásticos a lo largo de la secuencia de terrígenos y biogénicos, los cuales indican intensa actividad volcánica simultánea (*Ibid.*). Las secuencias resultantes de la depositación son superiores a 40 m de espesor y registran cuatro estadios evolutivos principales, relacionados a eventos tectónicos y volcánicos específicos (*Ibid.*).

El estudio polínico realizado en la cuenca de Cuitzeo por Velázquez (1998), registra la vegetación existente en el lago para los últimos 35000 A.P., lo que pone en evidencia diferentes fluctuaciones climáticas en la cuenca y en el lago de Cuitzeo, el cual, durante los últimos 35000 años A.P., ha presentado periodos de bajo nivel de agua, y uno de aguas más diluidas (es importante recordar que el lago es salobre), e incremento en el espejo de agua; en síntesis, este sistema lacustre ha sido muy fluctuante a lo largo del tiempo geológico (Velázquez 1998; Israde y Garduño, 1999, Israde *et al.*, 2002; Figura 9). Las fluctuaciones en el lago representan cambios en el clima, principalmente en la precipitación y la temperatura a lo largo del tiempo geológico. Este comportamiento paleoambiental descrito para el lago y la cuenca se ha encontrado en varios cuerpos lacustres de la región (Metcalf, 1997; Metcalf *et al.*, 1994; Bradbury, 1997).

La información geológica y la falta de significancia estadística en relación con las tendencias de incremento del PDSI, de la temperatura, así como de la reducción en la

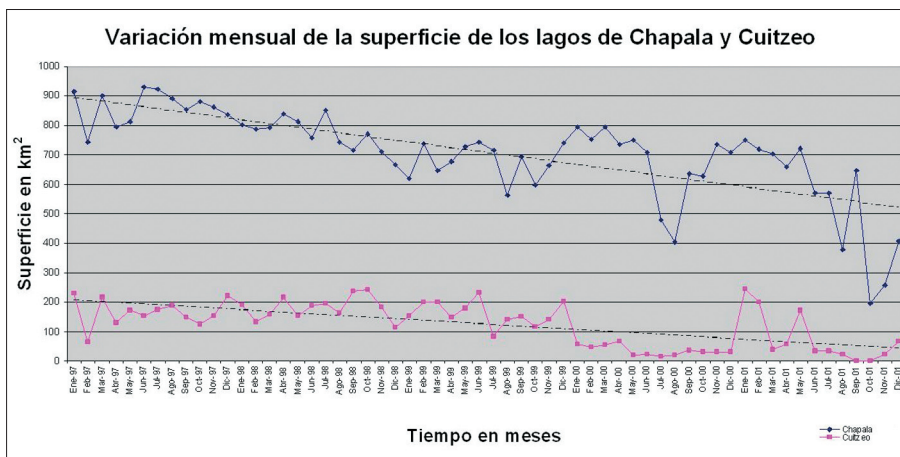


Figura 8. Superficies de los lagos de Cuitzeo y Chapala en 1997-2001.

precipitación, puede apoyar la interpretación de que el comportamiento encontrado entre las variables climáticas y la superficie/nivel del lago en el último siglo, son similares al comportamiento climático de largo plazo (historia geológica reciente), y que actualmente estamos en un periodo que presenta un muy bajo nivel del lago.

CONCLUSIONES

Este trabajo describe y analiza la dinámica de cambio de las superficies ocupadas por el lago de Cuitzeo entre el periodo de 1974 al 2001, basado en el uso de técnicas de percepción remota, sistemas de información geográfica y análisis estadístico. Los productos aeroespaciales utilizados en esta investigación son baratos o gratis, y pueden ser obtenidos a través de la Internet o por cesión de datos, lo cual hace posible que el método propuesto sea replicable en la mayoría de los países en desarrollo.

La serie de precipitación muestra tres periodos relativamente secos: *a)* 1940 a 1960, *b)* 1980 a 1990 y *c)* 1995 a 2000; además de tres ciclos de duración aproximada de 20 años: *i)* 1934-1957, *ii)* 1957-1978 y *iii)* 1978-2000. Estos periodos y

ciclos se asocian con la reducción de la superficie del lago a lo largo del tiempo.

Los resultados sugieren que los cambios en el lago no son producto de tendencias regionales ocasionados por patrones del cambio climático global causado por las actividades humanas. Los cambios parecen estar más relacionados a las condiciones climáticas, especialmente a la precipitación precedente. Este patrón ha sido reconocido en el vecino lago de Zirahuén utilizando sistemas de medición convencional del nivel del agua (Bernal y MacCrimmons, 2000). En consecuencia, el método utilizado permite pronosticar la superficie y los niveles del lago con anticipación, a fin de apoyar la toma de decisiones en relación con el manejo de agua en lagos.

Aunado a lo anterior, el lago desde el Mioceno tardío ha sido somero o muy somero, y sólo se registran un par de periodos con importante trasgresión lacustre. Sin embargo, las actividades humanas en la cuenca han estado afectando los niveles lacustres por el incremento en la extracción y uso de aguas superficiales y subterráneas en áreas urbanas y agrícolas (López *et al.*, 2002; Israde *et al.*, 2002).

Los actores locales y tomadores de decisiones deben considerar la información geológica

Figura 9. Estratigrafía del núcleo extraído y los niveles inferidos con base en diatomeas, comparación con el registro obtenido en los lagos de Pátzcuaro (Bradbury, 2000) y Zacapu (Metcalfe, 1992; Fritz *et al.*, 2001). Tomada de Israde *et al.*, 2002.

y los comportamientos climáticos de corto y largo plazo en los procesos de toma de decisiones relacionados con el manejo sustentable del agua de lago y de la cuenca en general, con intención de preservar el segundo humedal continental más grande de México.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por el Programa SIMORELOS (CONACyT), dentro del proyecto de investigación *Regionalización ecológica, conservación de recursos y ordenamiento territorial de la cuenca de Cuitzeo*. Se agradece la colaboración en la construcción y edición de bases de datos a Vicente Salinas, Alejandra Acosta, Teodoro Carlón y Hugo Zavala, así como a Camilo Alcántara y Peter Molnár por la elaboración de programas de cómputo. Los autores manifiestan su agradecimiento a los doctores Israde (UMSNH) y Osterkamp (USGS) por la documentación y comentarios proporcionados al escrito. Se agradece la cesión de imágenes de satélite al Instituto de Geografía de la UNAM. El primer autor agradece los apoyos económicos proporcionados por el CONACyT y la UNAM, a través de las becas de doctorado recibidas.

REFERENCIAS

Acosta, A. (2002), *Crecimiento de los asentamientos urbanos en la cuenca del lago de Cuitzeo y su consumo de agua, 1975, 2000*, tesis de Licenciatura en Biología, Facultad de Biología, UMSNH, Michoacán.

Alcántara, C. (2002), *Ajustes para México del Índice de Severidad de la Sequía de Palmer (PDSI)*, tesis de Licenciatura en Biología, Facultad de Ciencias, UNAM, México.

Alvarado-Díaz, J., T. Zubieta-Rojas, R. Ortega-Murillo, A. Chacón-Torres y R. Espinoza-Gómez (1994), "Hipertroficación en un lago tropical somero (lago de Cuitzeo, Michoacán, México)", en Comisión de Ecología del H. Congreso de Michoacán LXVI Legislatura, *El deterioro ambiental, de la cuenca del lago de Cuitzeo*, H. Congreso del Estado de Michoacán.

Bernal-Brooks, F. W. and H. R. MacCrimmons (2000), "Lake Zirahuén (Mexico): an assessment of morphometry change based on evidence of water level fluctuation and sediment inputs", in Manawar, M., S. G. Lawrence, L. F. Manawar and D. F. Mallev (eds.), *Aquatic Ecosystems of Mexico*, Bakhuy's Publishers, The Netherlands, pp. 61-76.

Birkett, C. M. (2000), "Synergistic remote sensing of lake Chad: variability of basin inundation", *Remote Sensing of Environment*, no. 72, pp. 218-236.

Bradbury, J. P. (1997), "Sources of glacial moisture in Mesoamerica", *Quaternary Internacional*, no. 43-44, pp. 97-110.

Bradbury, J. P. (2000), "Limnologic history of lake of Pátzcuaro, Michoacán, Mexico, for the past 48000 years: impacts of climate and man", *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleocology*, no. 148, pp. 117-131.

Carrillo-Rivera, J. J., A. Cardona and R. Margain (1997), "Groundwater flow and environmental impact in Mexico", *Geografía y Desarrollo*, núm. 15, pp. 17-26.

Corona, N. T. (1979), *Cuitzeo (estudio atropogeográfico)*, Basal, Morelia, Michoacán, México.

Fritz, C. S., S. Metcalfe and W. Dean (2001), "Holocene climate patterns in the Ameritas inferred from pelolimnological records", in Markgraf, V. (ed.), *Interhemispheric climate linkages*, Academic Press, pp. 241-263.

García E. y R. Vidal (1981), "La tendencia de las precipitaciones en la parte central de México en los últimos 50 años", *Biótica* 6, núm. 1, pp. 103-115.

Hann, C.T. (1994), *Statistical methods in hydrology*, Affiliated East-West Press Pvt. Ltd., New Delhi.

Helsel, D. R. and R. M. Hirsch (1992), *Statistical methods in water resources*, Elsevier Amsterdam.

Hirsch, R.M., Helsel, D.R., Cohn T.A., and Gilroy, E.J. (1993), "Statistical analysis of hydrologic data", in Maidment (ed.), *Handbook of Hydrology*, McGraw Hill, New York, pp. 17.1-17.55

- ILWIS 3.1, *Integrated Land and Water Management Information System* (2002), International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation (ITC), Enschede, The Netherlands.
- INEGI (1990). Carta topográfica. Cuitzeo E14A13, Zinapécuaro E14A14, escala 1:50 000.
- Israde-Alcántara, I. (1995), *Bacini lacustrini del settore centrale dell'Arco Vulcanico Messicano: Stratigrafia ed evolucionesedimentaria basata sulle diatomee*, PhD Thesis, Università Degli Studi di Milano.
- Israde-Alcántara, I. and V. H. Garduño (1999), "Lacustrine record in a volcanic intra-arc setting: the evolution of the Late Neogene Cuitzeo basin system (central-western Mexico, Michoacán)", *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*, no. 151, pp. 209-227.
- Israde-Alcántara, I., V. H. Garduño y R. Ortega-Murillo (2002), "Paleoambiente lacustre del Cuaternario Tardío en el centro del lago de Cuitzeo", *Hidrobiológica*, 12(1), pp. 61-78.
- Kendall, M. G. (1938), "A new measure of rank correlation", *Biométrica*, no. 30, pp. 81-93.
- López E., M. E. Mendoza y A. Acosta (2002), "Cambio de cobertura vegetal y uso de la tierra. El caso de la cuenca endorreica del lago de Cuitzeo, Michoacán", *Gaceta Ecológica*, núm. 63, pp. 19-34.
- Mendoza, M. E. (2002), *Implicaciones del cambio de cobertura vegetal y uso del suelo en el balance hídrico a nivel regional. El caso de la cuenca del lago de Cuitzeo*, tesis de Doctorado en Ciencias de la Tierra, UNAM, México.
- Mendoza, M. E., G. Bocco and M. Bravo (2002), "Spatial prediction in hydrology: status and implications in the estimation of hydrological processes for applied research", *Progress in Physical Geography*, 26(3), pp. 319-338.
- Mercier, F. A. Cazenave and C. Maheu (2002), "Interannual lake level fluctuations (1993-1999) in Africa from Topex/Poseidon: connections with ocean-atmosphere interactions over the Indian Ocean", *Global and Planetary Changes*, no. 32, pp. 141-163.
- Metcalf, S. E. (1997), "Paleolimnological records of climate change in Mexico -Frustrating past, promising future?", *Quaternary International*, (43-44), pp. 111-116.
- Metcalf, S. E., F. A. Street-Perrot, S. L. O'Hara, P. E. Hales and R. A. Perrot (1994), "The paleolimnological record of environmental change: examples from the arid frontier of Mesoamerica", in Mallington A.C. and K. Pye (eds.), *Environmental change in drylands: biogeographical and geomorphological perspectives*, John Wiley and Sons, Chichester.
- Molnár, P. and J. Ramírez (2001), "Recent trends in precipitation and streamflow in the river Puerco Basin", *Journal of Climate*, 14(10), pp. 2317-2328.
- Molnár, P., P. Burlando and W. Ruf (2002), "Integrated catchment assessment of riverine landscape dynamics", *Aquatic Science*, no. 64, pp. 129-140.
- Null, J. (2004), *An analysis of El Niño, La Niña and California Rainfall*, <http://ggweather.com/enso/calenso.htm>.
- Palmer, W. C. (1965), *Meteorological Drought, Research Paper No. 45*, Department of Commerce, Weather Bureau, Washington, D. C., USA.
- Salas, J. D. (1992), "Analysis and modeling of hydrological time series", in Maidment (ed.), *Handbook of Hydrology*, McGraw Hill, New York.
- Schneider, S. R., D. F. McGinnis and G. Stephens (1985), "Monitoring Africa's Lake Chad Basin with Landsat and NOAA satellite data", *International Journal of Remote Sensing*, no. 6, pp. 59-73.
- Tóth, J. (2000), "Las aguas subterráneas como agente geológico, causas procesos y manifestaciones", *Boletín Geológico y Minero*, 111(4), pp. 9-26.
- Velázquez Durán, R. (1998), *Palinología en relación a paleoambientes de los últimos 35,000 años en la cuenca del lago de Cuitzeo, Mich., México*, tesis de Biología, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México.
- Zar, J. H. (1996), *Biostatistical Analysis*, Prentice May, New Jersey.