

003815



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

**LA LIMNOLOGÍA DEL LAGO DE
PÁTZCUARO:
UNA VISIÓN ALTERNATIVA A
CONCEPTOS FUNDAMENTALES**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE

DOCTOR EN CIENCIAS (BIOLOGÍA)

P R E S E N T A

FERNANDO WALTER BERNAL BROOKS

2002

DIRECTOR DE TESIS: DR. JAVIER ALCOGER DURAND

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

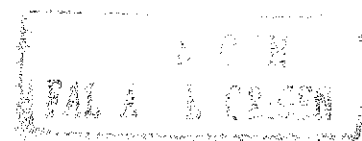
Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



La princesa pasaba la mayor parte de su tiempo libre contemplando el lago y platicando con cada una de sus olas, trato familiar que tal parece le era correspondido por el inmenso espejo de plata, que según la hora del día cambiaba su tono por otro de semejante e incomparable belleza. La reciprocidad de simpatías fue sellado uno de esos aireados días por la señora, quien juró a aquel manto acuífero, rey y centro de pueblos y de culturas, no separarse nunca de él; jurado también, si era preciso, respetar el secreto pacto con su vida.

Leyenda de Pátzcuaro



LA LIMNOLOGIA DEL LAGO DE PÁTZCUARO: UNA VISION ALTERNATIVA A CONCEPTOS FUNDAMENTALES

F. W. Bernal Brooks, Tesis de Doctorado en Ciencias (Biología)

INDICE

RESUMEN.....	i
PREFACIO.....	ii
AGRADECIMIENTOS.....	viii
INTRODUCCIÓN.....	1
HIPÓTESIS DE TRABAJO.....	9
OBJETIVOS.....	12
ÁREA DE ESTUDIO.....	15
ESTRATEGIA DE TRABAJO.....	19
 Artículo 1: Bernal-Brooks, F.W., 1998. The lakes of Michoacan: a brief history and alternative point of view. Freshwater Forum: 10	21
 Artículo 2: Bernal-Brooks, F.W., Gomez-Tagle Rojas, A., y Alcocer-Durand, J. (en prensa). Lake Pátzcuaro (México): a controversy about the ecosystem water regime approached by field references, climatic variables and GIS. Hydrobiologia.....	41
 Artículo 3: Gomez-Tagle Chavez, A., Bernal-Brooks, F.W. y Alcocer-Durand, J. (en prensa). Sensitivity of Mexican water bodies to regional climatic change: three study alternatives applied to remote sensed data of Lake Pátzcuaro. Hydrobiologia.....	65
 Artículo 4: Bernal-Brooks, F.W. y Alcocer-Durand, J. Seasonal and temporal heterogeneity of physical and chemical variables for an endorheic, shallow water body: Lake Pátzcuaro, México. Archiv für Hydrobiologie.....	78

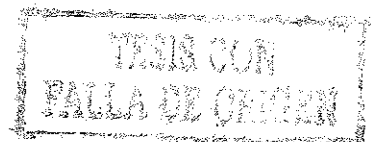
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Artículo 5: Bernal-Brooks, F.W., Davalos-Lind, L., y Lind, O.T. Seasonal and spatial variation in algal growth potential and growth-limiting nutrients in a shallow endorheic lake: Lake Patzcuaro (Mexico). Lakes and Reservoirs: Research and Management.....	107
DISCUSIÓN.....	127
Marco conceptual.....	128
Balance Hidrológico y Sensibilidad Climática.....	133
a) Verificación de bancos de nivel.....	133
b) Relación entre variables climáticas y fluctuaciones de nivel en el lago.....	134
c) Escorrentías en la cuenca terrestre.....	135
d) Imágenes del lago incorporadas a un SIG.....	135
e) Sensibilidad climática.....	137
Homogeneidad vs. Heterogeneidad del medio acuático.....	139
Régimen Térmico.....	142
Información existente sobre Fitoplancton, Estado Trófico y Contaminación del lago.....	143
Experimentos de laboratorio.....	146
Consideraciones Suplementarias sobre Indices de Estado Trófico.....	147
CONCLUSIONES.....	149
REFERENCIAS.....	153
ANEXOS.....	159



"Al fin y al cabo en la ciencia no tratamos de hacer propaganda de nada, ni de sostener nada desde cualquier punto de vista que no sea uno y único: la verdad. Tu obligación como hombre de ciencia, es decir la verdad, sin que te importen ni los prejuicios religiosos, ni los prejuicios políticos, ni los prejuicios sentimentales. Deja para el santo la santidad, para el político la oportunidad, para el comerciante el lucro, para el predicador la fe y para el propagandista la habilidad para revestir con alegres colores una idea. No eres ni un héroe, ni un santo, ni un político, eres un hombre de ciencia, y tu obligación es decir la verdad siempre. No la verdad objetiva, porque ésta ni tu ni nadie esta seguro de conocerla, sino la verdad tal como tu la veas, con una absoluta sinceridad, con una profunda honradez para ti mismo"

Alfonso Caso (1896-1970)
A un joven arqueólogo Mexicano



LA LIMNOLOGÍA DEL LAGO DE PÁTZCUARO: UNA VISIÓN ALTERNATIVA

A CONCEPTOS FUNDAMENTALES

F.W. Bernal-Brooks, Tesis de Doctorado en Ciencias (Biología)

Facultad de Ciencias, UNAM

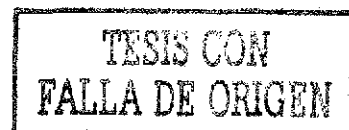
Resumen

La presente tesis trata sobre el lago de Pátzcuaro con un enfoque holístico a nivel del ecosistema.

El balance hídrico regional entre precipitación (P) y evaporación (E) genera cambios proporcionales en el nivel del agua y área del lago como una "sensibilidad climática" propia de cuencas lacustres cerradas. La información de soporte radica en la verificación del registro de niveles de agua del lago (1939-1943; 1950-2000) y el reconocimiento de fluctuaciones de nivel tanto estacionales como de largo plazo (décadas). Estas últimas muestran movimientos paralelos en el nivel de agua de otros lagos de la Mesa Central de México (Hutchinson et al. 1956 y trabajos paleolimnológicos subsecuentes; Bernal-Brooks y MacCrimmon 2000) como reflejo del efecto regional de P-E. Análisis adicionales en Pátzcuaro se suman en el mismo sentido: variables climáticas vs. cambios de nivel en el lago; imágenes históricas de la zona en un ambiente SIG; variables físicas y químicas del agua del lago, así como bioensayos algales (USEPA 1978) realizados bajo condiciones del agua del lago.

El marco conceptual de sensibilidad climática es alternativo a la teoría general de evolución-ecología lacustre (TGEL), paradigma de la limnología regional vigente desde su concepción por el Dr. Fernando De Buen hace seis décadas aproximadamente.

En conclusión, las evidencias aquí obtenidas destacan la importancia del clima en la dinámica limnológica del lago de Pátzcuaro y asocian la reducción de nivel (3.6 m) y área (2,116 ha) de los últimos 20 años a un proceso de desertificación regional progresivo.



PREFACIO

Durante la gestión del General Lázaro Cárdenas del Río como Presidente de la República (1934-1940), los doctores japoneses Yoshiichi Matsui y Toshie Yamashita fueron contratados con el propósito de apoyar el cumplimiento de los objetivos planteados en el Plan Sexenal sobre aguas interiores. Entre otras recomendaciones, señalaron la antigua Hacienda de Ibarra, en la orilla del Lago de Pátzcuaro, como un lugar sumamente apropiado para el establecimiento de una Estación Limnológica (Matsui y Yamashita 1936a). La propuesta de proyectos de trabajo (Matsui y Yamashita 1937) y la remodelación de las instalaciones concluida a finales de 1938, dio lugar a la fundación de la Estación Limnológica de Pátzcuaro en el mismo año (Zozaya 1940c). Así, el interés político se sumó al científico para procurar un conocimiento más profundo y una administración adecuada de los recursos acuáticos epicontinentales, no sólo en el ámbito local, sino con una proyección nacional.

A finales de la década de los 1930 y principios de los 1940 aparecen en México las primeras investigaciones sobre aguas epicontinentales. Éstas fueron las aportaciones pioneras de refugiados de la Guerra Civil Española, los doctores Fernando De Buen, Bibiano F. Osorio-Tafall y Enrique Rioja. Además de los trabajos realizados por el Dr. Fernando De Buen en la Estación Limnológica de Pátzcuaro, estas instalaciones de campo permitieron otorgar apoyo logístico para la realización de trabajos por parte del Instituto de Biología

de la UNAM (Ancona et al. 1940), la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas del Instituto Politécnico Nacional (Osorio-Tafall 1941, 1944; la colección de peces a cargo del Dr. José Álvarez del Villar), así como posteriormente a investigadores internacionales de la talla de G. E. Hutchinson, Ruth Patrick, E. S. Deevey, C. D. Barbour y J. P. Bradbury, entre otros.

En 1957, Edward S. Deevey Jr. presentó el resultado de 15 años de trabajo limnológico intermitente realizado entre México y El Salvador. Particularmente en 1941, una campaña de cinco semanas inició en Coahuila y finalizó en Michoacán con un trabajo de campo en el Lago de Pátzcuaro (Julio 9, 1941). A partir de los datos obtenidos sobre este lago y el análisis de publicaciones de la Estación Limnológica de Pátzcuaro (De Buen 1941b, 1944a, 1944b) y el Instituto de Biología (Ancona et al. 1940), el autor reconoció a Pátzcuaro como "el único lago en América Media (México-Panamá) estudiado en todos sus aspectos", así como "uno de los mejor conocidos en el continente".

Sin embargo, el progreso obtenido con las contribuciones pioneras en este campo se diluyó posteriormente, por carecer de un desarrollo continuado. "Desafortunadamente, parte de la tradición limnológica que empezó con Cuesta-Terrón, De Buen, Osorio-Tafall, Rioja y Álvarez, se ha perdido y ahora existen esfuerzos aislados" (Arredondo 1987). La atención en este campo del conocimiento se centró en los tres lagos naturales más importantes (Chapala, Pátzcuaro y Cuitzeo), así como un gran complejo lacustre (ahora desaparecido)

que se encontraba en la cuenca de México (Alcocer et al. 1993). No obstante, la importancia de los trabajos de campo de largo plazo implícita en los trabajos de De Buen (1941c) y Zozaya (1941), con observaciones sistemáticas y continuas en ciclos anuales, fue revalorado parcialmente cerca de cuarenta años después, a partir de las investigaciones de Ordóñez et al. (1982) en el Lago de Zirahuén, con datos obtenidos entre 1977 y 1978.

Una primera revisión del conocimiento existente sobre la región de Pátzcuaro (Vega 1940) compiló 83 referencias entre escritos científicos y de gobierno, información geográfica y geológica, documentos históricos, notas sociales y religiosas, así como artículos de divulgación. Esta variabilidad en la información dio lugar al registro de 1521 citas bibliográficas cerca de cuarenta años después (Argueta 1979). No obstante, la aparición esporádica de trabajos de ecología acuática a partir de la década de los 1950 involucró iniciativas aisladas y desarticuladas, al margen de una orientación general. Además, la falta de continuidad en los estudios se sumó a la diversidad de criterios y metodologías aplicadas para restringir -aún más- la posibilidad de definir una evolución en las condiciones del lago.

A pesar de lo anterior, la participación creciente de mexicanos en la Limnología lleva implícito un proceso de aprendizaje que es palpable hacia mediados de los 1970, en la publicación de estudios en el ámbito nacional (Ej. Mendivil et al. 1980). Esta renovación de esfuerzos representa una acumulación de

conocimiento de relativo valor científico por su modesto estándar de calidad. Sin embargo, un análisis profundo de estos trabajos permitiría evitar a futuro la duplicidad inútil de esfuerzos en el mismo sentido y reivindicar aportaciones valiosas al conocimiento del lago. En el caso de estudio de Pátzcuaro, sorpresivamente, el típico aislamiento entre investigadores nacionales y la usual falta de revisión crítica de la información generada, permitió detectar la insospechada existencia de argumentos contradictorios, bases débiles y un vacío de conocimiento sobre la estructura y funcionamiento del ecosistema lacustre.

La necesidad del CRIP-Pátzcuaro (anteriormente Estación Limnológica de Pátzcuaro) de diagnosticar el estado del conocimiento de las cuencas lacustres regionales y sus recursos, constituye un imperativo actual hacia el ordenamiento y planificación racional, para sugerir y/o incentivar las formas de realizar investigación limnológica a futuro. En este sentido, el análisis profundo de las referencias bibliográficas disponibles representa la piedra angular para revalorar los estudios realizados anteriormente y definir además el rumbo de los esfuerzos a realizar tanto en el ámbito propio como inter-institucional.

En el presente documento confluyen intereses académicos como estudiante de doctorado de la UNAM e institucionales como investigador del Gobierno Federal en el CRIP-Pátzcuaro. En este sentido, el autor pone a consideración del lector una serie de puntos en controversia sobre la Limnología de Pátzcuaro, con

información de campo y laboratorio obtenida entre 1996 y 1999. Asimismo, la presente tesis pretende contribuir a la eliminación gradual de la dependencia existente sobre el conocimiento limnológico generado en otros países y ejemplos descritos en libros de texto ajenos a la realidad local y regional. Paralelamente al estudio descriptivo del lago, la incursión por primera vez en el caso de Pátzcuaro en la realización de bioensayos pretende aportar pruebas sobre el desarrollo de un organismo de prueba bajo las condiciones del agua del lago. Esto último llevado a efecto en coordinación con el Laboratorio de Limnología de la Universidad de Baylor en Waco, Texas, Estados Unidos.

La conveniencia de desechar la idea de otra investigación aislada en el tiempo contempla, mas allá de la expectativa del presente trabajo, convencer a los sectores académico y público sobre la necesidad de iniciar un programa limnológico sostenido a través de la generación de datos en series de tiempo. La actualización continua del conocimiento sobre el lago representa un punto de referencia necesario para justificar y/o orientar localmente no solo proyectos académicos a futuro, sino también acciones de gobierno donde se requiere la aplicación óptima de los fondos públicos en obras de beneficio social.

La necesidad de obtener bases de datos de largo plazo, confiables y comparables no es exclusiva de Pátzcuaro sino es esencial para dar seguimiento a las condiciones limnológicas de los lagos, presas y ríos a escala nacional. La falta de información en este sentido ha impuesto limitaciones para

definir claramente la estructura y funcionalidad de los ecosistemas acuáticos, así como su fragilidad o capacidad para asimilar impactos ecológicos (por ejemplo, los efectos del fenómeno “El Niño” 1997-1998 sobre el lago Alchichica; Alcocer y Lugo 2002). Por tanto, la multiplicación de esfuerzos en otras áreas del país a partir de la revisión y crítica constructiva de la información, podría conducir gradualmente a la conformación de un marco conceptual propio en la Limnología con base en un conocimiento profundo de los recursos acuáticos existentes en el territorio nacional. La posibilidad de un plan global de investigación científica con objetivos precisos en el corto, mediano y largo plazo, no sólo exclusivo del ámbito local sino en todo el país, podría traducirse en la utilización racional de recursos materiales, humanos y financieros disponibles para este fin. El presente estudio representa un primer paso en este sentido emprendido desde la perspectiva particular de Pátzcuaro.

AGRADECIMIENTOS

Durante el desarrollo de mi carrera conté con el apoyo de innumerables personas e instituciones, entre las que me permitiré mencionar a los siguientes:

Dr. Javier Alcocer Durand, de la FES Iztacala, UNAM, por su atinada supervisión en el Doctorado y su invaluable amistad

Dr. Hugh MacCrimmon, de la Universidad de Guelph, Canada; mi supervisor en el desarrollo de la Maestría en Ciencias en Canadá, quién me impulsó a continuar hacia la obtención del Doctorado

Drs. Laura Dávalos-Lind y Owen Lind, de la Universidad de Baylor, en Waco, Texas, por su supervisión y apoyo en la realización de bioensayos en la Estación Ecológica Chapala y el laboratorio de Limnología en Waco, Texas; así como su hospitalidad en Estados Unidos y su ejemplo a seguir.

Dra. Gloria Vilaclara Fatjó, Dra. María del Rosario Sánchez Rodríguez, Dr. Alfonso Lugo Vázquez, Dr. Miroslav Macek, de la FES Iztacala; y Dr. Gerardo Pérez Ponce de León, del Instituto de Biología, UNAM; por sus atinados comentarios y sugerencias sobre el presente documento de tesis.

La familia Gómez-Tagle Chávez, del INIFAP, Campo Experimental en Morelia, por los trabajos conjuntos desarrollados en relación con Pátzcuaro

Al Instituto Nacional de la Pesca, sede de la presente investigación.

Felicitas Sosa Lima, Patricia Carrillo Orea y Jorge Galindo Villegas por su apoyo en las actividades de campo y laboratorio

Mis padres, Juan Bernal Fuentes y Kathleen Brooks; mi esposa, María Guadalupe López Altamirano; mi hermana Diana y su esposo Arturo; Mrs Elva Loker, Mr. y Mrs Prince (Brantford, Ontario); por su apoyo incondicional a lo largo de mi vida.

El Sr. Juan Pizá Marquez, trabajador de la Estación Limnológica de Pátzcuaro desde 1938 y al Capitán Enrique Galván Vela, por compartir con el autor sus experiencias en el lago de Pátzcuaro.

El CONACyT (proyecto 3626P-B9608) y la UNAM (programas PAEP 1999 y 2000), por el apoyo financiero otorgado para la realización de las investigaciones sobre Pátzcuaro.



INTRODUCCIÓN

La revisión de antecedentes limnológicos sobre el ecosistema lacustre de Pátzcuaro condujo a la identificación de contradicciones, bases de conocimiento débiles, vacíos en el conocimiento y/o imprecisiones en la información, como se expresa en los siguientes párrafos.

- **Niveles de Agua del Lago.** El registro para el periodo 1939-42 (De Buen 1944b) incluye posiciones comparativamente menores (2,035.4 m s.n.m.) a las que se registraron cerca de cincuenta años después (2036.45 m s.n.m.; 1971-89). Este hecho refleja un movimiento neto de ascenso en el nivel (1.05 m) a lo largo de las últimas seis décadas (Chacón 1993b). De manera paralela, la profundidad máxima del cuerpo de agua varió de la siguiente forma:

Profundidad (m)	Año	Referencia
17	1930	Fernández 1936
14.4	1936	Matsui y Yamashita 1936b
15	1941	De Buen 1941a
10	1975	Téllez y Motte 1980
12	1982	SARH 1984
12	1986	Chacón 1989
11	1988	Ceballos 1994

La interpretación de esta información conduce necesariamente a la concepción de un proceso de azolvamiento en la cuenca lacustre descrito por Chacón (1989, 1992, 1993a, 1993b) como consecuencia de la deforestación de áreas circundantes, transporte de sedimentos y depósito de materiales en las partes bajas de la cuenca. En sus propias palabras (1992): "La profundidad máxima es de 12 m, pero De Buen (1944b) reporta una profundidad máxima de 15 m en la misma zona; es claro, sin embargo, que el valor tiende a disminuir con el tiempo y que la reducción de profundidad máxima es el resultado de la sedimentación en el vaso lacustre".

No obstante, en contradicción con el registro de niveles de agua, existen evidencias de campo, fotografías aéreas y fotografías antiguas de la zona (ver anexos), que muestran un nivel de agua a finales de la década de los '30s superior en varios metros al actual. Estas evidencias reflejan, de manera contraria a lo que indica el registro de niveles, la existencia de una disminución drástica en el nivel del agua estimada en varios metros de pérdida.

- ***Balance Hidrológico Regional.*** La importancia del aporte de agua a través de escorrentías periféricas al lago difiere entre autores. Chacón (1993a) señala que "los escurrimientos y la precipitación sobre el espejo del lago no tienen efectos significantes sobre los niveles de agua. Por lo tanto, es de esperar que la entrada de agua por medio de la infiltración

sería la principal entrada neta para el lago". Este autor elaboró además un modelo hidrológico sin escorrentías superficiales mediante el cual justifica la afectación al balance hidrológico del lago por una reducción en infiltraciones subterráneas. Por otra parte (1992), "considerado el desbalance hidráulico superficial (en el lago) se asume que la mayor parte de las escorrentías periféricas se pierden a causa de las altas tasas de evaporación".

Planas y Moreau (1990) se suman al mismo punto de vista para sugerir que la parte de agua que se infiltra en el subsuelo incursiona vía subterránea hasta la cuenca lacustre en el curso de una misma temporada de lluvias y genera efectos en la producción primaria del vaso lacustre como se detalla más adelante.

Paralelamente, el planteamiento de un proceso de azolvamiento ocurrido a partir de 1939-42 (ver inciso anterior) resulta incongruente con un modelo de balance hidráulico donde las escorrentías no participan como agente de erosión, transportación de partículas y acumulación de depósitos en las zonas bajas de la cuenca de captación o en el lago mismo.

Por su parte, De Buen (1944b), Barrera (1992) y Gómez-Tagle (1997) estiman escurrimientos de hasta un 27% de la captación de lluvia en la cuenca terrestre. Asimismo, el estudio paleolimnológico más reciente (Bradbury 2000) registra un nivel de ingreso de sedimentos del orden de 0.34 mm/año en la cuenca lacustre de manera general, en contraste con

la apreciación de Chacón (1989, 1992, 1993a, 1993b; ver inciso anterior) de 66.6 mm/año al considerar del orden de tres metros de acumulación en el curso de cuarenta y cinco años aproximadamente.

- **Variabilidad Ambiental del Medio Acuático.** Barbour (1973) contempla de manera implícita en su trabajo sobre aterínidos de la Mesa Central de México, la existencia de condiciones ambientales homogéneas para los lagos de la región, debido a su escasa profundidad y deja implícito un régimen de circulación polimíctico. La coexistencia de especies de una misma familia de peces (Atherinidae) con una morfología bucal similar evoca una sobreposición en los requerimientos de hábitat. El autor considera que la falta de exclusión competitiva entre especies radica en su alimentación selectiva sobre presas de diferente tamaño. Lo anterior justifica, además, el proceso mismo de especiación en el grupo de aterínidos fuera de cualquier consideración sobre una posible segregación espacial entre las diferentes poblaciones de peces por heterogeneidad del hábitat. Asimismo, el análisis de variables físicas y químicas sobre las aguas del lago involucra la concepción de un medio acuático homogéneo, como es implícito en la presentación de tablas sinópticas que no reflejan variabilidad (Herrera 1979, Chacón 1993b).

En contraste, los puntos de vista de De Buen (1939), Rosas (1976) y Lara (1980) contemplan un mosaico ambiental al interior del lago donde la preferencia de hábitat podría dar lugar a una distribución espacial

diferenciada entre las diferentes especies ícticas que habitan el lago. Téllez y Motte (1980), además, definen dos zonas en la región lacustre, litoral del sur y limnética del norte, que se diferencian por el grado de variabilidad o estabilidad de condiciones físicas y químicas respectivamente. En años posteriores, no existen mayores consideraciones sobre posibles diferencias espaciales, o temporales en función del clima.

- ***Reducción en la Transparencia del Agua del Lago.*** De acuerdo con Planas y Moreau (1990), la reducción en la transparencia del agua -de 2.0-2.4 m a mediados de la década de los 1930, a 0.27-0.62 m en 1986-, sugiere un deterioro progresivo de la calidad del agua en 50 años aproximadamente. En opinión de estos autores, la pérdida de transparencia es una consecuencia de la deforestación, erosión y transporte de partículas hacia el vaso lacustre. No obstante, el argumento resulta especulativo por una falta de identificación del origen de los terrígenos y su distribución posterior a lo interno del cuerpo de agua. Asimismo, la falta de datos en series de tiempo sobre sólidos suspendidos limita la posibilidad de una relación clara de causa-efecto.
- ***Eutroficación.*** Planas y Moreau (1990) plantearon una teoría de "eutroficación natural" en el lago de Pátzcuaro que contempla la infiltración como aporte principal de agua hacia el vaso lacustre. La

información de soporte radica en la postulación de un manantial subacuático en el seno Erongarícuaro inferido por datos de temperatura (De Buen 1941a), lo que a su vez presupone la existencia de flujos subterráneos originados de la incorporación estacional de agua de lluvia a través del subsuelo. El acarreo consecuente de nutrientes por disolución hídrica del substrato geológico es el argumento principal y desde esta perspectiva, después de dos o tres meses de lluvia en la región, necesariamente debe producirse un incremento significativo en la biomasa del fitoplancton en el lago. Lo anterior fue deducido por los autores citados con base en el efecto de concentración de nutrientes en el cuerpo de agua registrado al final de la temporada de lluvias de 1986. Asimismo, los autores de la citada teoría desechan la posibilidad de una relación causa-efecto por vertimiento de aguas residuales (contaminación puntual y no puntual) y descartan la resuspensión de materiales por acción del viento como factor interno de liberación de nutrientes, a pesar de haber calculado una profundidad de mezcla (10 m) equivalente a la profundidad máxima del lago.

En contraste, Ancona et al. (1940), Téllez y Motte (1980) y Rosas et al. (1993) coinciden en señalar la aparición de florecimientos algales en la parte final de la época de sequía (Abril-Mayo) como un evento recurrente año con año y no como un fenómeno reciente en el lago. La falta de análisis continuados en series de tiempo sobre la estructura de la

comunidad fitoplanctónica o índices de biomasa algal limita asimismo el análisis retrospectivo de dicha situación y su posible relación con el clima.

- **Estado Trófico.** Las evaluaciones realizadas sobre el estado trófico del lago involucran esencialmente dos posiciones. La primera divide al cuerpo de agua en áreas de diferente estado trófico desde oligotrófica hasta hipereutrófica (Chacón 1989, 1992, 1993a, 1993b), con un esquema que sugiere una condición estable en dicho contraste. La segunda, más dinámica, contempla una heterogeneidad espacial y temporal en la estructura del fitoplancton, a tal grado que resulta difícil la designación de una categoría de estado trófico (Rosas et al. 1993). En este último caso, la consideración final de "lago mesotrófico" contempla una amplia variabilidad en la estructura de la comunidad fitoplanctónica.
- **Nutriente Limitante.** El elemento limitante de la productividad acuática en el lago de Pátzcuaro ha sido inferido a partir de la relación N:P (Planas y Moreau, 1990; Chacón, 1989, 1993a, 1993b), con un punto de vista favorable para el nitrógeno. Sin embargo, la confirmación definitiva sobre el papel del N y el P en la productividad acuática requiere datos experimentales que confirmen o desechen el valor informativo de la citada relación.

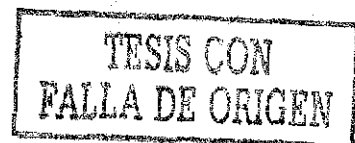
- **Contaminación del Lago de Pátzcuaro.** El vertimiento de aguas residuales municipales y/o la utilización de agroquímicos en la parte terrestre de la cuenca han sido consideradas fuentes de contaminación, aunque el efecto causado en el lago requiere aún de esclarecimiento. Hasta el momento no existen estimaciones sobre volúmenes de aguas residuales y carga de nutrientes y/o contaminantes al lago, ni estudios sobre la estabilidad, persistencia o degradación de las sustancias tóxicas motivo de sospecha. La existencia de vertimientos de aguas de desecho por sí misma ha dado lugar a la suposición de un lago contaminado por el "flujo excesivo de aguas negras y de desechos agroquímicos que se vierten", según se expresa en artículos de divulgación científica.

HIPOTESIS DE TRABAJO

1. Las evidencias que se presentan al final del presente documento en anexos (evidencias de campo y fotografías del lago tomadas en la década de los 30s) representan pruebas históricas irrefutables sobre el cambio de nivel del agua de la cuenca lacustre desde hace seis décadas aproximadamente. Por tal motivo, el registro de niveles de agua en cinco series de tiempo (De Buen 1944b; SARH 1949-1970; SARH 1950-1987; SCT 1986-90; SDAF 1989-) carece de valor informativo en su presente forma y requiere de una verificación de las referencias de campo utilizadas en cuanto a su altitud sobre el nivel del mar. Entonces, la disminución de profundidad máxima en el lago de Pátzcuaro se asocia a dos posibles hipótesis (H_0 . el decremento en el nivel del agua es causado por "azolvamiento" vs. H_1 . el desbalance hídrico es el factor principal).
2. Las variaciones de nivel de largo plazo (décadas) en varios lagos de la Mesa Central de México sugieren un papel preponderante de las condiciones climáticas en el balance hidrológico regional (Bernal-Brooks y MacCrimmon 2000), por lo que deben existir pruebas adicionales en el caso particular de Pátzcuaro sobre la importancia de la lluvia (directa sobre el cuerpo de agua e indirecta a través de escorrentías) en el balance hidrológico del vaso lacustre (H_0 . La lluvia no juega un papel

- preponderante en las fluctuaciones de nivel del lago de Pátzcuaro vs. H_1 . la lluvia juega un papel importante en el balance hídrico).
3. Los estudios realizados sobre variables físicas y químicas del agua del lago sugieren una condición homogénea al reportar datos sin intervalos (Herrera 1979; Chacón 1993b). Sin embargo, la apariencia del lago sugiere un mosaico de condiciones diversas, así como una respuesta temporal en función de las fluctuaciones de nivel, que llevan a sospechar sobre posibles sesgos metodológicos o de interpretación al respecto (H_0 . Las condiciones físicas y químicas del agua del lago son homogéneas vs. H_1 . heterogéneas)
 4. La evaluación de estado trófico en lagos ha dependido de índices desarrollados esencialmente para lagos templados, mismos que asumen una profundidad suficiente para considerar al fitoplancton como la fuente principal de atenuación de luz en la columna de agua. Entonces, el caso de "lagos moderadamente turbios" (sensu Lind 1994) de la Mesa Central de México podría enfrentar dificultades de interpretación trófica por su condición somera y la resuspensión continua de sedimentos (H_0 . El estado trófico del lago de Pátzcuaro puede ser deducido a través de índices generales de estado trófico vs. H_1 . el lago de Pátzcuaro es una excepción a la regla general que no puede ser interpretado a través del marco de conocimiento general).

5. El estudio de la eutroficación del lago de Pátzcuaro, además de los estudios de campo respectivos, requiere de pruebas experimentales que permitan identificar el nutriente limitante de la productividad y determinar el potencial de crecimiento algal tanto en el sentido espacial y temporal. Estos resultados, a su vez, permitirían confirmar o rechazar las hipótesis que vinculan la llegada de nutrientes al lago y su incorporación al ecosistema a través de a) los sedimentos arrastrados desde la cuenca terrestre por acción de la lluvia, b) la consecuencia de una "eutroficación natural" que lleva nutrientes al vaso lacustre por medio de la infiltración de agua por el subsuelo y c) el efecto climático de alternancia de épocas de lluvias y secas.



OBJETIVOS

1) Generales

- 1.1 Analizar los cambios en la morfometría del lago a lo largo de las seis décadas anteriores y su relación con el balance hídrico regional y el nivel de sedimentación en la cuenca lacustre
- 1.2 Mostrar gráficamente el cambio morfométrico ocurrido en el lago durante los últimos 30 años a través de la incorporación de fotomosaicos del lago e imágenes de satélite a un Sistema de Información Geográfica
- 1.3 Definir el grado de homogeneidad o heterogeneidad espacial y temporal existente en el medio acuático mediante el estudio de variables físicas y químicas de las aguas del lago
- 1.4 Verificar la aplicabilidad de los índices de estado trófico convencionales para el caso particular del lago de Pátzcuaro
- 1.5 Realizar bioensayos algales con agua del lago para definir el potencial de crecimiento algal así como el nutriente limitante de la productividad acuática

2) Particulares

- 2.1. Verificar en el campo la altitud (m s.n.m.) de los bancos de nivel correspondientes a las cinco series históricas de datos sobre niveles del lago (De Buen 1944b; SARH 1949-1970; SARH 1950-1987; SCT 1986-90; SDAF 1989-) mediante un levantamiento con Nivel que permita determinar las diferencias existentes en altitud entre un punto geodésico establecido en la basílica de Pátzcuaro por el CETENAL (1974) y los bancos referidos anteriormente
- 2.2. Revisar minuciosamente los datos básicos sobre los niveles del lago y las variables climáticas, debido a su generación a través de fuentes anónimas
- 2.3. Analizar la relación entre variables climáticas (SMN 1922-86) en cuanto al balance entre precipitación y evaporación y su efecto en los niveles del lago
- 2.4. Establecer una base metodológica para la incorporación de fotomosaicos del lago a un Sistema de Información Geográfica, lo que incluye imágenes obtenidas en diversas épocas, a diferentes escalas y resoluciones

- 2.5. Definir el grado de variabilidad ambiental en el medio acuático mediante el análisis de variables físicas y químicas en diversas zonas del lago (10 estaciones de muestreo) y un ciclo anual (muestreos mensuales).

- 2.6. Efectuar bioensayos de crecimiento algal (*Selenastrum capricornutum*) de acuerdo con el protocolo establecido por la USEPA (1978) con muestras obtenidas en las épocas de secas y lluvias como contrapartes climáticas

ÁREA DE ESTUDIO

El lago de Pátzcuaro (Fig. 1) forma parte de una cuenca endorreica del Altiplano Mexicano localizada sobre el Eje Neovolcánico Transversal, entre $19^{\circ} 32'N$ - $19^{\circ} 42'N$ y $101^{\circ} 32'W$ - $101^{\circ} 42'W$ a 2,035 m s.n.m., aproximadamente. La ocurrencia de procesos volcánicos y tectónicos en la región a finales del Terciario y durante el Cuaternario (Demant 1975) dió origen a la segmentación de un afluente ancestral al Río Lerma en la cuenca endorreica de Pátzcuaro (Tamayo y West 1964).

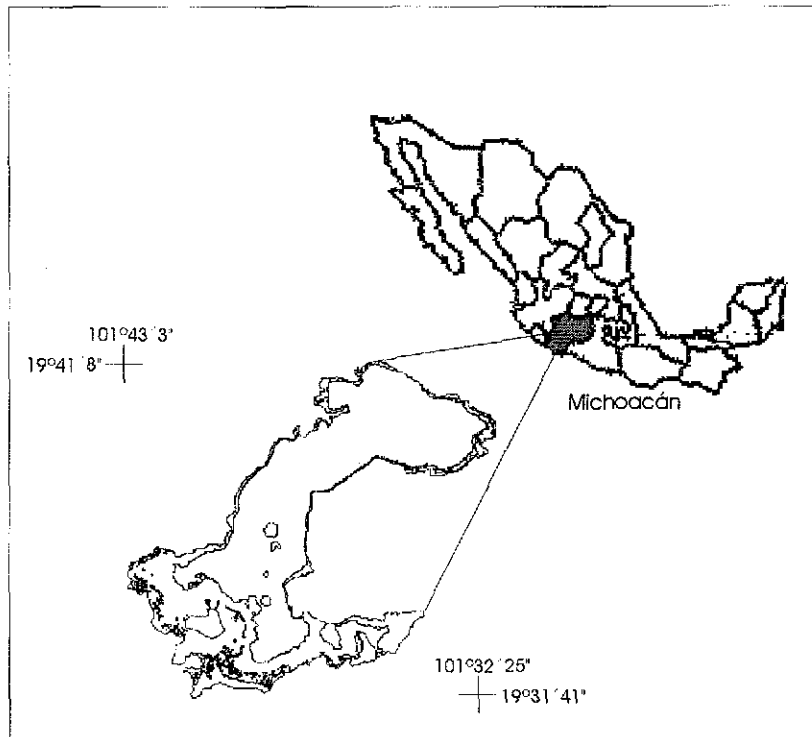


Figura 1. El Lago de Pátzcuaro: ubicación geográfica

La información disponible sobre la presunta conexión pasada entre el Lago de Pátzcuaro y otras cuencas lacustres relacionadas con el Río Lerma es aún imprecisa (Bernal-Brooks 1998) e involucra al momento dos teorías basadas en la ictiofauna. La primera (De Buen 1943) sostiene una conexión ancestral entre los lagos de Zirahuen, Pátzcuaro y Cuitzeo, con el Río Lerma; mientras la segunda (Álvarez 1972) contempla una relación más estrecha entre Pátzcuaro y Zacapu.

Desde la década de los '40s, el Lago de Pátzcuaro se clasificó como un lago tropical con base en su régimen de temperatura (De Buen 1941c, 1944b; Osorio-Tafall 1941, 1944; Deevey 1957). La estratificación térmica es temporal (Planas y Moreau 1990) y se reduce al calentamiento de las capas superficiales de agua en las horas de la mañana, en tanto la acción del viento mezcla completamente el lago el resto del día. Otros detalles descriptivos del lago son objeto de estudio en la presente investigación y se tratan más adelante en el presente documento.

El clima regional Cb (w2) (w) (e) (i')g, corresponde a un templado subhúmedo con estación de lluvia durante el verano y la parte más cálida del año antes del solsticio de verano (García 1988). El Servicio Meteorológico Nacional (1922-1986) presenta información climática de la región de Pátzcuaro con base en la Estación Meteorológica 16087. El registro disponible, sin embargo, presenta frecuentemente faltantes de datos o información contradictoria. Esto último resulta evidente en los datos de evaporación, cuando se compara la base original de datos y la información contenida en el disco compacto denominado

ERIC publicado por la CNA (1995). Los valores medios se expresan a continuación:

Temperatura (°C)	15.8 (1922-30)	16.7 (1931-40)	16.3 (1973-79)
Precipitación (mm)	1060 (1922-30)	1049 (1931-40)	922 (1971-79)
Evaporación (mm)	1810 (1939-40)	1351 (1941-43)	1438 (1973-75) 1556 (1984-85)

El clima templado subhúmedo típico del Eje Neovolcánico está ampliamente representado en la zona de influencia del lago, y se caracteriza por una temperatura entre 12 y 18 °C y un cociente P/T superior a 55.

De acuerdo con Díaz-Barriga y Bello-González (1993), la vegetación presenta una porción muy reducida de *Abies*, predominan los bosques de *Pinus-Quercus*; existen diferentes tipos de matorrales y pastizales secundarios así como vegetación acuática y subacuática. El número total de especies registradas asciende a 1050, de las cuales 56 corresponden a la vegetación acuática y 994 a la vegetación terrestre.

Gómez-Tagle Rojas (1997) estudió diferentes aspectos de la cuenca terrestre del lago, la cual dividió en ocho subcuencas (Zurumútaro, Pátzcuaro, Ajuno, Erongarícuaro, Napízaro, San Andrés Ziróndaro, Quiroga e Ihuatzio). El muestreo integrado de la productividad de suelos forestales, cobertura vegetal, riesgo de incendio, erosión, productividad natural del bosque, condiciones de hábitat de la fauna y formas de uso del suelo en la cuenca, permitió determinar áreas, ubicación de problemas y orientar las acciones de recuperación y conservación. Del estudio anterior se presenta la siguiente información:

Los suelos (SPP 1979), en su mayoría andosoles y luvisoles, han desarrollado un proceso de desaturación de bases que empobrece y limita su productividad. En general, por arriba de los 2,150 m s.n.m., la cartografía de la zona marca la distribución de los andosoles, sus horizontes presentan características de estructura friable, microangular y tixotípica, son ricos en raíces gruesas, medias y finas, con baja compactación (0.5 a 1.5 kg/cm²). Los espesores son variables oscilando entre 60 cm y dos metros como promedio. Conforme se desciende en el gradiente altimétrico el efecto de la pendiente, deforestación y erosión dejan al descubierto los horizontes posiblemente argílicos con una productividad forestal en general más baja. Los luvisoles principalmente y los acrisoles señalados en la cartografía, se caracterizan por presentar horizontes con capas de arcilla de gran espesor; en la mayoría de los casos, estos suelos se encontraron debajo de la cota 2,150 m s.n.m. Sus propiedades muestran desde los primeros centímetros un migajón arcilloso que inmediatamente se convierte en arcilla enrojecida, con pequeñas grietas poco profundas en la condición de secas. El uso del suelo incluye superficies agrícolas (40.8%), forestales (30.0%), matorral/ganadería (14.7%) y otros (14.5%).

ESTRATEGIA DE TRABAJO

La presente tesis contempló la realización de los cinco artículos internacionales enlistados a continuación:

- (1) Bernal-Brooks, F.W., 1998. The lakes of Michoacan: a brief history and alternative point of view. *Freshwater Forum* **10**: 20-34

El marco conceptual en la limnología regional es objeto de discusión y, en específico, la relación propuesta por Fernando De Buen entre evolución y ecología lacustre (referida en la Discusión como teoría general e evolución lacustre o TGEL). La interpretación de fenómenos que ocurren en el entorno lacustre de los lagos Michoacanos presenta una influencia determinante de este paradigma. Por ende, el presente artículo pone a consideración del lector los puntos de vista emitidos por el referido autor cerca de seis décadas atrás así como su continuidad hasta el presente por diversos autores.

- (2) Bernal-Brooks, F.W., Gómez-Tagle Rojas, A. y Alcocer-Durand, J. (en prensa). Lake Patzcuaro (Mexico): a controversy about the ecosystem water regime approached by field references, climatic variables and GIS. *Hydrobiologia*.

El balance hidrológico de Pátzcuaro es el tema central con el propósito de cubrir el objetivo general 1.1 y los particulares 2.1 a 2.3.

- (3) Gómez-Tagle Chávez, A., Bernal-Brooks, F.W. y Alcocer-Durand, J. (en prensa). Sensitivity of Mexican water bodies to regional climatic change: three study alternatives applied to remote sensed data of Lake Patzcuaro. *Hydrobiologia*.

La base metodológica para el manejo de las imágenes del lago disponibles (1969, 1974, 1986, 1991, 2000) es el tema principal a abordar por la diferencia de escalas y resoluciones, lo cual cubre el objetivo general 1.2 y el particular 2.4.

- (4) Bernal-Brooks, F.W. y Alcocer-Durand, J. Physical and chemical variability of a shallow tropical water body, Lake Patzcuaro (Mexico). *Limnologica*.

La variabilidad física y química del lago de Pátzcuaro se trata en el presente artículo a fin de cubrir los objetivos generales 1.3 y 1.4 y el particular 2.5.

- (5) Bernal-Brooks, F.W., Dávalos-Lind, L., y Lind, O.T. (en proceso de publicación). Seasonal and spatial variation in algal growth potential and growth-limiting nutrients in a shallow endorheic Mexican lake: Lake Pátzcuaro. *Lakes and Reservoirs: Research and Management*.

La parte de bioensayos es cubierta en el presente artículo y responde a los objetivos 1.5 y 2.6.

THE LAKES OF MICHOACAN (MEXICO): A BRIEF HISTORY AND ALTERNATIVE POINT OF VIEW

FERNANDO BERNAL-BROOKS

*(F.W. Bernal-Brooks, Centro Regional de Investigación Pesquera/Estación
Limnológica de Pátzcuaro, Calzada Ibarra 28, Colonia Ibarra, Pátzcuaro, Mich.
61600 México.)*

[E-mail: bbrooks@jupiter.ccu.umich.mx]

Introduction

In agreement with Limón et al (1989): We know very little about the limnology of the waters of Central America and Mexico. Only two pages in the Lakes of the Warm Belt, by Serruya & Pollinger (1983), are given to Mexico". In the absence of a strong theoretical background, fundamental concepts of limnological science appeared in this country mainly from textbooks and studies made at temperate northern latitudes, as well as on-site research performed decades ago. Thus, Alcocer-Durand & Escobar-Briones (1991) describe: "The great impetus acquired by limnology in Europe and America in the first half of the 20th century stimulated foreign researchers to come and work in Mexico". From the latter, surprisingly, some out-of-date viewpoints still remain as an intellectual influence for most Mexican limnologists, even to the extent of representing undebatable dogmas. This article is intended to open a discussion about the historical development of lakes Zirahuén, Pátzcuaro and Cuitzeo in the State of Michoacán (México), and the postulated relationships between lake ecology and evolution.

The background of limnological concepts in Mexico

Aztec limnology (Deevey 1957), although an outstanding pre-hispanic achievement contained in codexes concerning the aquatic resources of the ancient Lake Tenochtitlán, is not related to the main topic of this paper. Cornerstones traced back in time to explain lake ecology and evolution for the Michoacán case are identified more recently, as outlined below.

The terms “eutrophic”, “mesotrophic” and “oligotrophic” in their German forms –“nährstoffreichere (eutrophe) den mittelreiche (mesotrophe) und zuletzt nährstoffarme (oligotrophe)”– were introduced into science by Weber (1907), to describe the general nutrient conditions determined by the chemical nature of the soil solution in German bogs. The introduction of Weber’s terms into limnology was due primarily to Einar Naumann (1919), who combined an extraordinary eye for lakes with a passion for succinct, classificatory style of presentation (Hutchinson 1969).

“Naumann and Thienemann laid the foundation stones of Seetypenlehre, the ecological classification of lakes, just as they jointly initiated the foundation of the International Association of Theoretical and Applied Limnology in 1922”... “Contemporarily with Naumann and Thienemann, E.A. Birge and C. Juday collected an unprecedented amount of qualified data from more than 500 Wisconsin lakes. The difference between their lines of action was almost as vast as the ocean that separated the two teams of scientists. On one side, a synthetic attitude and the endeavor to construct, as far as possible, a framework with



general applicability; on the other side, an analytical approach and the tedious task of bringing together single bricks for a future structure” (Rodhe 1969).

Drs Yoshiichi Matsui and Toshie Yamashita, both from Japan, were hired as inland fisheries consultants by the Mexican federal government in 1936. Their proposal to the President of Mexico (Gral. Lazaro Cárdenas del Río), for establishing a research facility at the Hacienda de Ibarra besides Lake Pátzcuaro lead to the foundation of the Pátzcuaro Limnological Station in 1938 (Zozaya 1940).

Dr Fernando De Buen, the first man ever dedicated to limnology in Mexico, came to this country late in the 1930s as a refugee from the civil war in Spain. He was adviser at the Estación Limnológica de Pátzcuaro from 1939 to 1944 and wrote outstanding papers dealing with Mexican lakes which, in an elegant style of writing, implicitly bear the influence of European limnology (although formerly in Spain he had been an oceanographer). Some of his papers frequently relate lake ecology and evolution for the Mexican State of Michoacán, as is later explained in detail.

The lakes of Michoacán

The region of the so-called Lakes of Michoacán includes the three largest natural lakes, although these are not the only ones. The region is situated (approximately) between 19°15' and 20°00' N, and 101°30' to 102°00' W, ca. 350 km west of Mexico City. The three lakes have closed watersheds (=catchment)

basins (Figs 1 and 2); some geographical and morphometric data are given in Table 1.

The lake basins lie on volcanic bedrocks formed in the late Tertiary and Quaternary periods. A radiological measurement (K/Ar) for the bedrock of Lake Cuitzeo gives a date of 8.0 ± 0.4 million years BP (CFE 1986). Lake Pátzcuaro is surrounded by late Cenozoic lava flows and volcanic cones that are predominantly basaltic in type (DETENAL 1977), but the region is still volcanically active – the newly-formed (1943) Parícutin volcano lies 50 km west of Pátzcuaro.

The upper catchments contain remnants of natural forest, comprised mainly of pine (*Pinus*), oak (*Quercus*) and fir (*Abies*); lower ground is generally cultivated. The lakes probably were formed in the late Pliocene or Holocene. In 1973, a core taken at 620 cm depth of water in Lake Pátzcuaro penetrated brown organic muds and occasional layers of volcanic ash until it bottomed at a depth of 2140 cm from the lake surface; the core represents sediments that have accumulated during a period of ca. 44,000 years (Watts & Bradbury 1982).

Morelia, the capital city of Michoacán State, has 428,486 inhabitants, and lies in the catchment of the largest lake, Cuitzeo

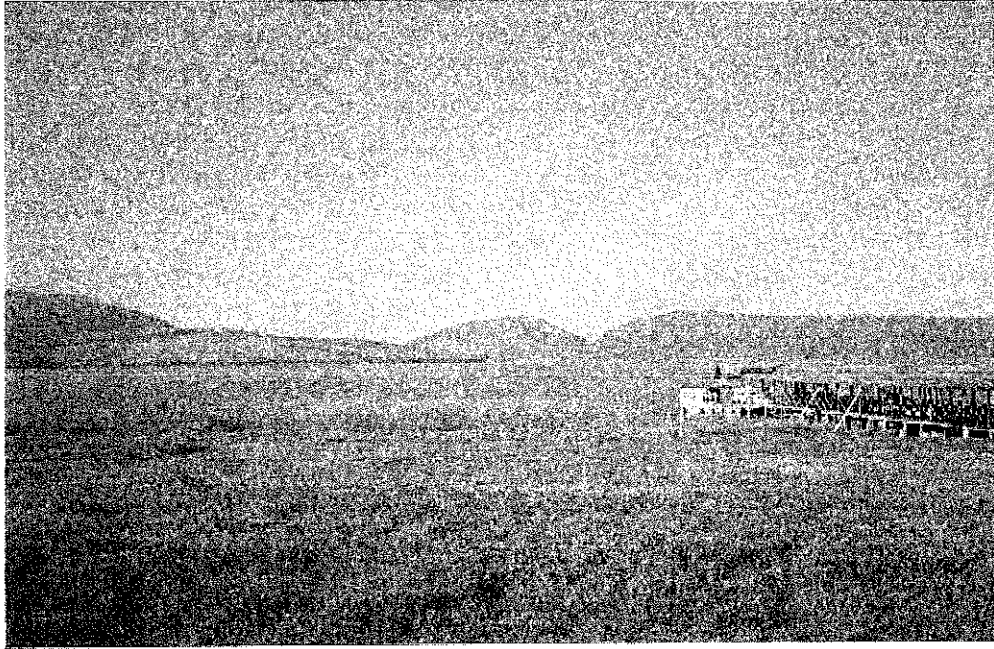


FIG. 1. Views of the three Michoacán lakes. Above: Zirahuén. Below: Pátzcuaro. Above next page: Cuitzeo.



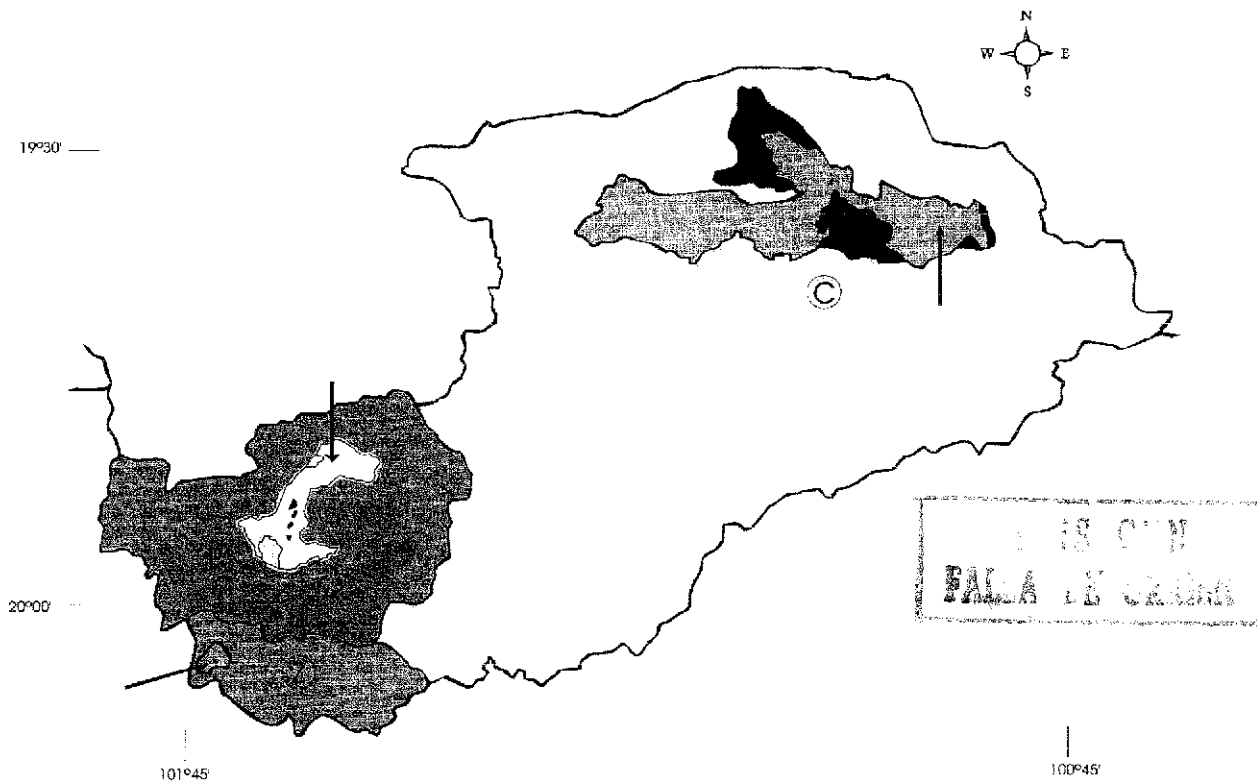


Fig. 2 Map showing boundaries of the catchments and basins of Lake Zirahuén (Z), Pátzcuaro (P) and Cuitzeo (C, solid areas indicate wetlands). Arrows shows the points of maximum lake depths (see Table 1).

Table 1. Basic lake morphometry [Sources: 1-3], trophic status [Sources: 4-6], surrounding human settlements [Source 7] and land use [Sources: 4, 8, 9] in the watersheds (catchments) of lakes Zirahuén, Pátzcuaro and Cuitzeo. *The population of the Cuitzeo catchment includes the Capital city of Morelia (population 428,486).

Sources of information: 1, Ordoñez et al. 1982; 2, Orbe & Acevedo 1995; 3, Mendivil et al. 1980; 4, Bernal-Brooks 1988; 5, Chacón 1993; 6, Alvarado et al. 1985; 7, INEGI 1990; 8, Chavez 1992; 9, DETENAL 1970], †specific conductivity measured at 25°C, by Bernal-Brooks; ‡east-west gradient.

Variables	Zirahuén	Pátzcuaro	Cuitzeo
Altitude (m.a.s.l.)	2075	2035	1820
Catchment area (km ²)	260	1096	3757
Lake area (km ²)	10.5	90	420
Volume (10 ⁶ m ³)	216	500	485
Mean depth (m)	20.5	4.7	0.9
Maximum depth (m)	40	12	2.3
Conductivity (µS cm ⁻¹) [†]	110	880-990	700-18000 [‡]
Trophic status	Oligo- mesotrophic	Eutrophic	Hyper- Eutrophic
[Sources]	[4]	[5]	[6]
Human populations	24516	78455	733511*
Human settlements	32	100	519
[Source]	[7]	[7]	[7]
Major land uses:			
Agriculture	60%	41%	45%
Forest	20%	30%	17%
[Sources]	[4]	[8]	[9]

De Buen's theory on the formation of the lakes

Important components of the final theory are identified in De Buen's own words [my translation from Spanish] as follows: "The geographical distribution, the altitudes in a stairway fashion and the ichthyological fauna; lead us to assume that lakes Zirahuén, Pátzcuaro and Cuitzeo were part of a tributary to the Lerma

River, which became isolated by successive volcanic barriers to form the actual lake basins" (De Buen 1943b).

Statements relating lake ecology and evolution for the three lakes are included in a series of papers by De Buen (1943a,b 1944a,b), although the best explanation integrating the component ideas into a single theory is given by De Buen (1943b): "The lakes of Michoacán are evolving, since their origin, to final demise, changing their original flooded basins for valleys with thick layers of sediments, forming almost level ground and surrounded by hills that previously belonged to the catchment area. We have in the Michoacán lakes different types of evolution, Zirahuén the youngest, Pátzcuaro already old, Cuitzeo in senescence, and Lagunillas is a valley of lacustrine origin".

Barbour (1973) remarked: "Little is known of the geological relationships of the interior basins occupied by the [three] lakes. De Buen (1943) considered them to be successive compartmentalizations of a tributary of the Rio Lerma, formed by lava flows or other volcanic disturbances. He considered Zirahuén, the highest in altitude and the deepest lake, to be the most youthful, Pátzcuaro is mature or old and Cuitzeo is decadent. The presumed fluvial connection extended north from Zirahuén to Pátzcuaro and then north-east through the valley that is currently followed by the Pátzcuaro-Morelia railroad as far as the Rio Grande de Morelia. This river [which exists today] drains into the south side of Lake Cuitzeo which in turn separated the basin of the River Lerma by a low rise".

Reviewing the case of Zirahuén, lake evolution and ecology mingles in the statement [my translation]: “*Young Zirahuén, with its clear, blue, transparent and deep waters, will undergo rapid ageing; the stages of its geological life-cycle will be shortened by the woodcutter’s axe, with unmerciful deforestation and suicidal destruction of the forest by the action of fire (De Buen 1943b).*”

Similarly, for Pátzcuaro, De Buen wrote in the lake ecology-evolutionary sense: “*Lake depths decreased, the bottom became smoother, waters became green or yellow because of silting, losing their ancient transparency and blue colour. Pátzcuaro, now with less water, left flat plainland in Chapultepec (southeastern portion) and Quiroga suitable for agriculture, so being in a regression stage (shrinking of the water surface by declining water levels) and therefore in plain oldness*”. These concepts are repeated in the paragraphs under “Lake Origin and Evolution” in the account of De Buen (1944b).

For Lake Cuitzeo, De Buen states that: “In spite of possessing a larger watershed relative to those of lakes Zirahuén and Pátzcuaro, Cuitzeo *dried up* in the winter of 1941. This process was hastened by the impoundment of the headwaters at Cointzio dam, which cuts off the Grande de Morelia river inputs. Nevertheless, Lake Cuitzeo is in an *advanced stage of regression* (a concept that is explained in the previous paragraph).

Further enthusiastic support for De Buen’s ideas has been produced over the last 40 years by Solórzano-Preciado (1955), Deevey (1957), Mendivil et al. (1980), López (1982), Alvarado et al. (1985), Chacón & Muzquiz (1991), Chacón et al. (1991), Chacón (1993a,b) and Cruz (1995).

Alternative points of consideration

Limnological studies in Mexico lack continuity of development and have been focused mainly on three large natural lakes (Chapala, Pátzcuaro and Cuitzeo) and the extinct lacustrine basin now occupied by Mexico City (Alcocer et al. 1993). Moreover, apart from the papers by De Buen (1941) and De Buen & Zozaya (1942), research based on observations covering at least one year did not appear again until Ordoñez et al (1982) published work on Lake Zirahuén, including data from 1977-1978. "Unfortunately, part of the limnological tradition that began with Cuesta Terrón, De Buen, Osorio-Tafall, Rioja and Alvarez, has been lost and there are now only isolated efforts (Arredondo 1983). As a consequence of the lack of a solid limnological background, the analysis of information relies heavily on relatively old references or on North American textbooks, even to the point of not questioning general theories in relation to local cases, such as a one-way evolution of lakes from water-filled basins to dry land. Wetzel (1983) actually identified that "the famous successional scheme put forth by Lindeman for Cedar Bog Lake, Minnesota, has been more than once proposed in general ecology texts as the universal situation (of lake evolution). In this way, the erroneous concept that all lakes become bogs and then land may become widely accepted. While some lakes do progress through this sequence, it is far from the rule".

Dr Fernando De Buen brought over from Europe the kind of thinking oriented to generalizations, as recognized at that time for European limnology. A similarity was observed by Hutchinson (1969) as follows: "Naumann's contribution was to

provide a theoretical classificatory scheme that enabled a large number of casual observations to be coordinated, although parts of this scheme are probably of limited application". Thus, "generalized ideas may be extremely stimulating, but they do not offer a shortcut to truth if they are based on premature premises (Rodhe 1969).

Dr Osorio-Tafall (1941) was another Spanish scientist who came to Mexico in the late 1930s. He also studied the biology of freshwaters and claimed that "the lakes of the temperate zone of Europe and North America can be regarded, in general, as a limited number of types with regard to their outstanding features of morphometry, physicochemistry and biology, on the basis of classifications given by Naumann (1929) and Thienemann (1931). But, as long as limnological studies progress and modern methods are applied to the study of lake basins, then disagreements appear with the prescribed types".

As a counterpart to European limnology, in North America "Birge and Juday achievements... rest on the extent, frequency and detail of their observations, which enabled them to arrive at more penetrating and balanced interpretations than more superficial studies would have done. They were not summer-vacation limnologists; their approach was the opposite of dilettante. They were by no means averse to speculation, but first of all they assiduously collected the facts" (Mortimer 1956). Limnological studies in this manner are still urgently required for Mexican lakes and, because of insufficient data and too-rigid theories, modern supporters of De Buen frequently struggle to provide explanations reconciling

field evidence with De Buen's ideas. Some drawbacks and gaps of knowledge in these old concepts are considered below.

Regional geography and fish fauna

At an altitude of 2,080 meters above sea-level, Lake Zirahuén was believed to lie at the top of a "staircase" of waterbodies, close to the headwaters of a hypothetical stream flowing northeast into Lake Pátzcuaro, before finally reaching the Lerma River. However, a lake-to-lake connection between Zirahuén and Pátzcuaro does not fit a modern map (unavailable to De Buen) of the three watersheds (SPP 1982). Bearing in mind that Lake Zirahuén was formed by blockage of "La Palma" stream as a natural impoundment, a close examination of contours and gradients reveals that the "La Palma" flow, interrupted thus on its way downriver, would not go northeastwards to the Lerma River but instead it would flow southwards into the Balsas River. Therefore, no geographical pathways can be identified for a straight-forward link to Lake Pátzcuaro.

Lake Pátzcuaro was also created by a supposed compartmentalization of an ancient stream through damming by volcanic processes. In this case, the headwaters in the southeastern portion of the watershed (Chapultepec) do not fit a possible connection between Pátzcuaro and Lake Cuitzeo or, at least, a more profound explanation is required since the lake's maximum depth (in the part of the lake basin which resembles a levee-like structure) is in the northern basin of the lake, on the opposite side from that of the headwater. Inspection of a map of the area (SPP 1982) suggest that the logical pathway for a hypothetical stream

would be to flow from the south towards the north, and not flow southwards. Actually, Alvarez (1972) provides insights for a more logical relationship with the Zacapu basin 25 km to the northwest.

The fact of a geographical relationship between lakes Pátzcuaro and Zirahuén is based on their very similar ichthyofaunas (De Buen 1943b; Miller & Smith 1986), but past geographical links between both lakes require an alternative explanation to one of a simple lake-to-lake connection. The indices of average faunal resemblance for the two native families of fish in the region (Atherinidae and Goodeidae) are 0.8 for Pátzcuaro-Zirahuén (which have six shared species of fish), 0.25 for Pátzcuaro-Morelia (including Cuitzeo; with three shared species), and 0.24 for Zirahuén-Morelia (including Cuitzeo; with two shared species) (Miller & Smith 1986).

Based on ichthyological elements, Alvarez (1972) proposed an alternative explanation that seems to have been unnoticed by many Mexican limnologists, as a counterpart to De Buen's ideas. "Probably, around Zirahuén and Pátzcuaro there was a river flowing from Uruapan to Zacapu, and thereafter the waters reached the Lerma River. Because of tectonic phenomena, probably basaltic currents, the upper part became isolated from the hypothetical basin, and a small portion of small mountain rivulets then remained towards the Santa Catarina reservoir. Lake Zirahuén was formed by an event that separated it from Pátzcuaro and later the ecological barrier arose between the area of Lake Pátzcuaro... and the Zacapu basin marshland. These phenomena separated a wet, poorly drained upper region, and three lentic units with similar

ichthyofaunas, barely differentiated at the species or subspecies level. Lake Cuitzeo is a closed basin like Pátzcuaro and Zirahuén, but its separation from the main river-flow seems to be more recent; there are no endemic species and its ichthyofauna is practically the same as that of the Lerma River”.

Paleolimnological evidence

Watts & Bradbury (1982) and O'hara (1991), quoted by Metcalfe et al. (1994), pointed out that the level of Pátzcuaro has fluctuated considerably over both the long and the short term, but there is no evidence to suggest that the lake has ever desiccated completely or had a clear tendency to dry up in the 44,000 years of its known existence. References to Lake Pátzcuaro paleolimnology also include Deevey (1944), Hutchinson et al. (1956), Saporito (1975), Pollard (1982), Gorenstein & Pollard (1983), Metcalfe et al. (1989, 1994), Street-Perrot et al. (1989), O'hara (1991) and O'hara et al. (1993-1994).

A recent geological study on Lake Cuitzeo concludes that “the initial lacustrine phase was a shallow aquatic environment...” (Garduño & Israde 1997). This new standpoint, based on recent field studies, refutes the assumption of an initially deep lake which has been reduced (by sedimentation) to level ground in the course of time.

Gaps in current knowledge of ecosystem dynamics

Lake Zirahuén is a warm monomictic waterbody with unique water dynamics amongst the Michoacán lakes. Because it is relatively deep (maximum depth 40 m), seasonal patterns of alternating circulation and thermal stratification develop in the lake, a feature not shared by the other polymictic shallow lakes, Pátzcuaro and Cuitzeo. Furthermore, Zirahuén is an oligo-mesotrophic waterbody, dependent on density currents which continuously maintain aerobic conditions at the bottom of the lake in spite of a regular input of nutrients and organic materials from the watershed (=catchment) (Bernal-Brooks 1988), as occurs in some man-made reservoirs (Lind et al. 1993). This particular feature is also not shared with Pátzcuaro and Cuitzeo, preventing Zirahuén from self-fertilization (by circulating mineral nutrients from the sediments) and so there are no visual effects of eutrophication or 'deteriorated appearance'.

Lake Cuitzeo's recurrent dessication (the term "regression" was used by De Buen) has been analyzed simply in terms of local effects between atmospheric precipitation and evaporation from the lake, and not in terms of a wider geographical context, the watershed area (De Buen 1943a,b; Mendivil 1980; Alvarado 1985). In this sense the waterbody, at the lowest point in the watershed or catchment, acts as a sump for all surface and groundwaters in the region and shows variable fluctuations in the water level according to the amount of rainfall. Information obtained at the Chehuayito Station (for water-levels registration) indicates that the water surface at the lake reached low points of dessication in

1942, 1961 and 1982, but also reached the extremes of a water-filled basin in 1958, 1967, 1976, 1988 and 1991.

Traditionally, Mexican limnology has been descriptive, focusing on monitoring physical and chemical components. Recently there has been a gradual change emphasizing the integral functional of aquatic systems (Dávalos-Lind & Lind 1993), although this new approach has been developed mainly at the Chapala Ecology Station. The opportunity should now be taken to study the hydrology of catchments and the nutrient loads to lakes, in order to understand the factors involved in lake dynamics and productivity. Future management of Mexican lakes could then be based more firmly on a “functional” background rather than just a “descriptive” framework. Also, research is needed to discern the impacts of cultural eutrophication imposed as an acceleration to the natural process of ageing for the three lake basins of Michoacán.

Finally, an ongoing study by Israde & Garduño (1977) at the University of Michoacán, on the thickness and types of sediments in the lakes – including inorganic and organic horizons – may enhance our knowledge of the geology and paleolimnology of the region.

Acknowledgements

I wish to thank Dr Javier Alcocer-Durand for suggestions relative to this paper, Biól. Gustavo Barajas Mendoza at the computer (Multiservicios en Computación, Morelia, Mich.), and Dr. David Sutcliffe (FBA) for suggestions on improving the manuscript.

References

- Alcocer-Durand, J. & Escobar-Briones, E. (1991). Freshwater biological research in México: A Brief historical review. *Freshwater Forum* **1**, 109-114
- Alcocer-Durand, J., Chávez-Arteaga, M. & Escobar-Briones, E. (1993). La limnología en México (historia y perspectiva futura de las investigaciones limnológicas). *Ciencia* **44**, 441-453.
- Alvarado, J., Zubieta, T., Ortega, R., Chacón, A. & Espinoza, R. (1985). Hipertroficación en un lago tropical somero (Lago de Cuitzeo, Michoacán, México). *Boletín del Departamento de Biología. Universidad Michoacana* **1**, 1-22.
- Alvarez, J. (1972). Ictiología Michoacana. V. Origen y distribución de la ictiofauna dulceacuícola de Michoacán. *Anales de la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas* **19**, 155-161.
- Arredondo, J.L. (1983, published in 1987). Bosquejo histórico de las investigaciones limnológicas realizadas en lagos mexicanos, con especial énfasis en su ictiofauna. In *Contribuciones en Hidrobiología* (eds S. Gomez-Aguirre & V. Arenas-Fuentes), pp. 91-133, 1987. Proceedings of the meeting "Alejandro Villalobos" held at the University of Mexico, 24-26 October, 1983.
- Barbour, C.D. (1973). A biogeographical history of *Chirostoma* (Pisces: Atherinidae): a species flock from the Mexican plateau. *Copeia* **3**, 533-556.
- Bernal_brooks, F.W. (1988). *Limnology of Lake Zirahuén relative to cultural impacts*. MSc thesis. University of Guelph, 88 pp.
- Chacón, A. (1993a). *El Lago de Pátzcuaro, Michoacán, México. Bosquejo Limnológico de un Lago Amenazado*. University of Michoacán. 144 pp.
- Chacón, A. (1993b). Lake Pátzcuaro, México: watershed and water quality deterioration in a tropical high-altitude Latin American lake. *Lake and Reservoir Management* **8**, 37-47.
- Chacón, A. & Muzquiz, E. (1991). *El Lago de Zirahuén, Michoacán, México. Reconocimiento ambiental de una cuenca Michoacana*. University of Michoacán, 30 pp.
- Chacón, A., Pérez, R. & Muzquiz, E. (1991). *Síntesis Limnológica del Lago de Pátzcuaro, Michoacán, México*. University of Michoacán. 48 pp.
- Chávez, Y. (1992). *El uso del suelo en la cuenca del Lago de Pátzcuaro*. Proceedings of the 5th meeting of Forestry and Farming, Morelia, Michoacán.
- CFE (Comisión Federal de Electricidad) (1986). *Dataciones radiométricas en rocas del NW de Michoacán*. Report GG 10/86 of the Geology Office. 14 pp.
- Cruz, O. (1995). *Balance hídrico en la cuenca del Lago de Zirahuén*. BSc thesis, University of Michoacán. 78 pp.
- Dávalos-Lind, L. & Lind, O.T. (1993). The changing state of limnology in Mexico: Lake Chapala as an example. *Verhandlungen der Internationalen Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie* **25**, 427-430.
- De Buen, F. (1941). Las variaciones físicas y químicas de las aguas del Lago de Pátzcuaro, desde octubre de 1939 a marzo de 1941. *Investigaciones de la Estación Limnológica de Pátzcuaro* **7**, 1-25.

- De Buen, F. (1943a). La muerte de los lagos mexicanos. *Revista General de Marina* **3**, 30-33.
- De Buen, F. (1943b). Los lagos Michoacanos. I. Caracteres Generales. El Lago de Zirahuén. *Revista de la Sociedad Mexicana de Historia Natural* **4**, 211-232.
- De Buen, F. (1944a). La fauna del Lago de Pátzcuaro y el medio en que vive. *Revista México Forestal* **22**, 3-9.
- De Buen, F. (1944b). Los Lagos Michoacanos. II. Pátzcuaro. *Revista de la Sociedad Mexicana de Historia Natural* **5**, 99-125.
- De Buen, F. & Zozaya, M. (1942). Variaciones del nivel de la superficie del lago de Pátzcuaro durante los años 1939 a 1941. *Investigaciones de la Estación Limnológica de Pátzcuaro* **2**, 16 pp.
- Deevey, E.S. (1944). Pollen analysis and Mexican archaeology: an attempt to apply the method. *American Antiquary* **10**, 135-149.
- Deevey, E.S. (1957). Limnological studies in Middle America with a chapter on Aztec limnology. *Transactions of the Connecticut Academy of Arts and Sciences* **39**, 213-328.
- DETENAL (Departamento de Estudios del Territorio Nacional) (1970). *5º censo agrícola, ganadero y ejidal*.
- DETENAL (Departamento de Estudios del Territorio Nacional) (1970). *Geologic charts E14A12, 13, 14, 22, 23, 24, 32, 33 and 34*.
- Gorenstein, S. & Pollard, H.P. (1983). *The Tarascan Civilization. A Late Prehispanic Cultural System*. Publications in Anthropology No. 28. Vanderbilt University, Nashville.
- Hutchinson, G.E. (1969). Eutrophication, past and present. In *Eutrophication: Causes, Consequences, Correctives*, pp. 17-26. National Academy of Sciences. A symposium held at the University of Wisconsin, 11-15 June, 1967.
- Hutchinson, G.E., Patrick, R. & Deevey, E.S. (1956). Sediments of Lake Pátzcuaro, Michoacán, México. *Geological Society of America Bulletin* **67**, 1491-1504.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática) (1990). *Censo General de Población y Vivienda. Datos por Localidad*. 530 pp.
- Israde, I. & Garduño, V. H. (1997). Neogene diatoms of the central sector of the Mexican Volcanic Belt (Cuitzeo lake) and its relationship with the volcanictectonic evolution. *Quaternary International* (in press).
- Limón, J.G., Lind, O.T., Vodopich, D.S., Doyle, R. & Trotter, B.G. (1989). Long- and short-term variation in the physical and chemical limnology of a large, shallow, turbid tropical lake (Lake Chapala, México). *Archiv für Hydrobiologie, Supplement* **83**, 57-81.
- Lind, O.T., Terrell, T.T. & Kimmel, B.L. (1993). Problems in reservoir trophic-state classification and implications for reservoir management. In *Comparative Reservoir Limnology and Water Quality Management* (eds M. Straskraba, J.G. Tundisi & A. Duncan), pp. 57-67. Kluwer Academic Publishers.
- López, G. (1982). *Dinámica hidrológica del Lago de Zirahuén*. BSc thesis, Universidad Autónoma Metropolitana. 63 pp.

- Mendivil, O., Cortés, R., Cuevas, C. & García, J.L. (1980). Algunos aspectos fisicoquímicos y consideraciones sobre la pesca en el Lago de Cuitzeo, Mich. (estudio trimestral 1976-1977). In *Proceedings of the 2nd Latin American Symposium on Aquaculture*, pp. 1745-1782.
- Metcalf, S., Street-Perrot, F.A., Brown, R.B., Hales, P.E. Perrot, R.A. & Steininger, F.M. (1989). Late Holocene human impact on a lake basin in Central Mexico. *Geoarchaeology* 4, 119-141.
- Metcalf, S., Street-Perrot, F.A., O'hara, S. & Hales, P.E. (1994). The paleolimnological record of environmental change: examples from the arid frontier of Mesoamerica. In *Environmental Change in Drylands: Biogeographical and Geomorphological Perspectives* (eds C. Millington & K. Pye), pp. 131-145. John Wiley & Sons.
- Miller, R.R. & Smith, M.L. (1986). Origin and geography of the fishes of Central Mexico. In *The Zoogeography of North American Freshwater Fishes* (eds C.H. Hocutt & E.O. Wiley), pp. 487-517. John Wiley & Sons.
- Mortimer, C.H. (1956). E.A. Birge, an explorer of lakes. In *E.A. Birge: A Memoir* (ed G.C. Sellery), pp. 165-212. The University of Wisconsin Press.
- Naumann, E. (1919). Einige neue Gesichtspunkte zur Systematik der Gewässertypen. *Archiv für Hydrobiologie* 20, p. 191.
- O'hara, S.L. (1991). *Late holocene environmental change in the basin of Lake Pátzcuaro, Michoacán, México*. Unpublished PhD thesis, Oxford University.
- O'hara, S.L., Street-Perrot, F.A. & Burt, T.P. (1993). Accelerated soil erosion around a Mexican highland lake caused by prehispanic agriculture. *Nature* 362, 48-51.
- O'hara, S.L., Metcalfe, S.E. & Street-Perrot, F.A. (1994). On the arid margin: the relationship between climate, humans and environment. A review of evidence from the highlands of Central Mexico. *Chemosphere* 29, 965-981.
- Orbe, A. & Acevedo, J. (1995). El Lago de Pátzcuaro. In *Lagos y Presas de México* (eds G. De la Lanza & J.L. García), pp. 89-106. Centro de Ecología y Desarrollo, A.C. 320 pp.
- Ordóñez, P., Perez, A., Traconis, S. & Rojas, A. (1982). Características limnológicas y clasificación trófica del Lago de Zirahuén, Mich. In *Proceedings of the 3rd National Congress on Environmental and Sanitary Engineering*, 22-24 September 1982. Acapulco, Gro. 17 pp.
- Osorio-Tafall, B.F. (1941). Materiales para el estudio del microplancton del lago de Pátzcuaro. *Anales de la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas* 2, 331-382.
- Pollard, H. (1982). Ecological variation and economic exchange in the Tarascan State, 9. *American Ethnologist* 9, 250-268.
- Rodhe, W. (1969). Crystallization of eutrophication concepts in northern Europe. In *Eutrophication: Causes, Consequences, Correctives*, pp. 50-64. National Academy of Sciences. A symposium held at the University of Wisconsin, 11-15 June, 1967.
- Saporito, M.S. (1975). *Chemical and mineral studies of a core from Lake Pátzcuaro, México*. MSc thesis, University of Minnesota. 49 pp.

- Serruya, C. & Pollinger, U. (1983). *Lakes of the Warm Belt*. Cambridge University Press, Cambridge. 569 pp.
- Solórzano-Preciado, A. (1955). *La pesca en el Lago de Pátzcuaro, Mich. y su importancia económica regional*. Secretaría de Marina, Dir. Gral. De Pesca, México. 58 pp.
- SPP (Secretaría de Programación y Presupuesto) (1982). Hydrology of surface waters. Chart E14-1 (1:250,000).
- Street-Perrot, F.A., Perrot, R.A. & Harkness, D.D. (1989). Anthropogenic soil erosion around Lake Pátzcuaro, Michoacán, México, during the Preclassic and late Postclassic-Hispanic periods. *American Antiquity* **54**, 759-765.
- Tamayo, J.L. & West, R.C. (1964). The hydrography of Middle America. In *Handbook of Middle America Indians, Volume I* (eds R. Wauchope & R.C. West), pp. 84-121. University of Texas Press, Austin.
- Thienemann, A. (1931). Tropische Seen un Seetypenlehre. *Archiv für Hydrobiologie, Plankton Supplement* **9**, 205.
- Watts, W. & Bradbury, J.P. (1982). Paleoecological studies at Lake Pátzcuaro on the west-central Mexican plateau and at Chalco in the basin of Mexico. *Quaternary Research* **17**, 56-70.
- Weber, C.A. (1907). Aufbau und Vegetation der Moore Norddeutschlands. *Beiblatt zu den Botanischen Jahrbuchern* **90**, 19-34.
- Wetzel, R. (1983). *Limnology*. 2nd edition. Saunders College Publishing. 762 pp.
- Zozaya, M. (1940). *La Estación Limnológica de Pátzcuaro*. Departamento de la Marina Nacional. 18 pp.

LAKE PATZCUARO (MEXICO): A CONTROVERSY ABOUT THE ECOSYSTEM WATER REGIME APPROACHED BY FIELD REFERENCES, CLIMATIC VARIABLES AND GIS

Bernal-Brooks, F.W.,¹ A. Gomez-Tagle Rojas² & J. Alcocer-Durand³

¹ Estacion Limnologica de Patzcuaro, Centro Regional de Investigacion Pesquera de Patzcuaro. Calzada Ibarra 28, Colonia Ibarra, Patzcuaro, Michoacan. 61609. E-mail: bbrooks@jupiter.ccu.umich.mx

² Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias, Campo Experimental en Morelia. E-mail: yolalber@mail.giga.com

³ Limnology Lab., Environmental Conservation and Improvement Project, UIICSE, UNAM Campus Iztacala. Av. de los Barrios s/n, Los Reyes Iztacala, Tlalnepantla, Edo. de Mex. 54090. E-mail: jalcocer@servidor.unam.mx

Abstract

In this paper a basic question is asked for a well-documented case study in Mexico: how well do we really know Lake Patzcuaro? We address water balance as fundamental to the question. Past studies provide ambiguous explanations about the role of either underground infiltration and/or runoff, relative to the lake level fluctuation. Thus, our suspicions over the database reliability led us to inspect historic records on water levels and climatic variables; check out the altitude of ground references and analyze traces of runoff watercourses over the terrestrial basin by means of GIS. By making data re-arrangement and corrections, it became evident that the lake is subject to long-term cycles with ca. 40-year peaks, including short-term seasonal cycles within. Sensitivity to climatic conditions was determined, as well as the active influence of runoff as an important hydrologic component that contributes to cause serious damage to the land surface by erosion. Re-arrangement of raw data highlights the occurrence of past misinterpretations founded on biased information.

Keywords: climatic change, lake levels, Central Mexico, closed lakes, Patzcuaro

Introduction

E.S. Deevey (1957) considered Lake Patzcuaro as "the only lake in Middle America that has been studied at all comprehensively" and also "one of the best known lakes in the continent". These conclusions acknowledge the pioneer limnological work made in Mexico by the Estación Limnológica de Patzcuaro (summarized in De Buen, 1941b; 1944a and 1944b) and the Instituto de Biología (Ancona *et al.* 1940) along with the analysis of supplementary data obtained by himself on July 9, 1941. Thereafter, Limnology remained dormant for many years in this country before colleagues recommenced studies some 25 years ago, and today, after so many years, a question is put forth relative to this case study: to what extent the lake is really known, now at the end of the century? This paper focuses on one fundamental topic: the lake water balance, including viewpoints without unanimous conclusions.

Planas & Moreau (1990) developed a theory on natural eutrophication, assuming the importance of nutrient loadings released from the terrestrial substrate into the lake. To these authors, the postulation of internal springs at the Erongarícuaro basin (De Buen, 1941a, 1944b) explains "that the lake's phosphorus levels could be naturally high by way of underground water inflow". A carriage of nutrients produced by infiltration of rainwater presumes a direct relationship to chlorophyll *a* peaks in the water body. Besides, a reduction in Secchi disc transparency since the mid '30s was identified in the sediment transportation via runoff rather than a continuous progress of eutrophication signs.

Chacón (1989, 1992, 1993a, 1993b) independently stated that the negative water balance between precipitation and evaporation at the lake surface has to be necessarily offset by the influx of underground waters to the lake basin. Registered data show a slight increase in water level (2,035.4 m.a.s.l. for 1939-1942; 2,036.45 m.a.s.l. for 1971-1989) coupled to a reduction in maximum depth from 15 m (De Buen, 1944b) to 12 m (Chacon *et al.*, 1989). Thus, an explanation arose that extensive sediment loads has been incorporated into the water body as a consequence of deforestation, land erosion and downhill transportation of particles. Strangely, runoff became a negligible component in the corresponding model of water balance to demerit the importance of water as sediment carryover.

In contrast, Barrera (1992) estimated a significant runoff component not ever considered: "the whole watershed received a water input of some 1,000 million m³... three fourths of it return to the atmosphere as evaporation... [and] 300 million m³ drain at the watershed grounds as surface runoff (200) or infiltration (100)". Additionally, out of the scientific arena, photographic and pictorial evidences, as well as personal communications of people living in the area nearby Lake Patzcuaro for more than 60 years, reveal an exceptional high water level in the '30s which was never reached again during the present century. These images in particular discredit the available information on water levels and leave suspicions about the veracity of available databases. Hence, this research target a revision of basic information and the analysis of the watershed hydrology by means of GIS.

Background

Lake Patzcuaro water levels has been registered through time on the basis of different ground references:

1st time-series (De Buen, 1944b). Measurements made approximately every 15-days from April 15, 1939, to August 31, 1943; on a reference altitude of 2,044 m.a.s.l. at the railroad tracks of the train Station in Patzcuaro.

2nd time-series (SARH, 1949-1970). Monthly data from October 1949 to December 1970, based on 2,034.08 m.a.s.l. as the zero of a metal scale located at the Santa Fe de la Laguna lakeshore.

3rd time-series (SARH, 1950-1987). Information obtained on a once-every-15-days basis from January 1950 to December 1987, without a ground-reference associated.

4th time-series (SCT, 1986-1990). Monthly data from January 1986 to December 1990, overlapping the third and fifth time-series. This information was re-calculated by the Coordinación de Dragado (SDAF) to meet the position of the current level bank.

5th time-series (SDAF, 1989-). Water levels determined almost daily since 1989 at the last reference point established in the far extreme of Lake Patzcuaro main dock.

SMN (1922-1986), based on the 16087 Meteorological Station, reported climatic information for the area of Lake Patzcuaro. Annual records of temperature, precipitation, evaporation, among others, include frequently incomplete time-series (also available in a CD entitled ERIC by CNA, 1995). Mean values are as follows: temperature, 15.8°C (1922-1930); 16.7°C (1931-1940) and 16.3°C (1973-1979); precipitation, 1060 mm (1922-1930), 1049

mm (1931-1940) and 922 mm (1971-1979); evaporation, 1810 mm (1939-1940), 1351 mm (1941-1943), 1438 mm (1973-1975) and 1556 mm (1984-1985). Zozaya (1941) registered data simultaneously for 1922-1940 presumably obtained from the same Station.

CETENAL (1987) charts include the Lake Patzcuaro region (1:50,000), as well as traces of runoff watercourses (channels) as they appear in aerial photographs of March 1974. The Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, developed a Digital Elevation Model from remote sensed information.

Study Area

Lake Patzcuaro (Fig. 1) lies within an endorheic basin of the East-West Volcanic Axis at 19° 32'N; 19° 42'N; 101° 32'W and 101° 42'W approximately, in the highlands of Central Mexico. The water body varies in surface altitude between 2,035 and 2,041 m.a.s.l., with a maximum area detected of 116 km² (Gomez-Tagle Chavez *et al.*, this volume). No evident outlets are present.

The lake origin dates back to the Tertiary and Quaternary (Tamayo and West, 1964; Demant, 1975). Tectonic and volcanic events cut off an ancestral tributary to the Lerma river which, in turn, created a closed basin and hence a lake (De Buen, 1944a; Barbour, 1973). De Buen (1941c, 1944b), Osorio-Tafall (1941, 1944) and Deevey (1957) described the shallow water body ($z_m=10$ m) as tropical since pioneer limnological studies in Mexico. However, except for the thermal regime, Lake Patzcuaro and the temperate zone of North America show a close similarity of biotic elements (Osorio-Tafall, 1944; Hutchinson *et al.*, 1956).

Method

A geodesic point was established in Patzcuaro downtown by CETENAL (1974) and signalized at the floor next to the Shrine front door by means of a mortised aluminum plate (ref. a). The corresponding file indicates $19^{\circ} 30' 52''$ N; $101^{\circ} 36' 23''$ W; and 2,154.285 m.a.s.l (DGG, 1991). From here, the difference in altitude relative to other terrestrial references used in the past for the registration of the time-series on water levels (refs b, c and d) was determined by means of a level (Carl Zeiss Jena NI 050). Measurements with ± 1 mm accuracy were carried out on November 25, 1997, at refs. b and c in the same town of Patzcuaro. Later, on May 25, 1998, we checked out the altitude at ref. d located 20 km to the north relative to the other three references, by previous knowledge of the water level at ref. c on calm meteorological conditions.

The fact of unstable water level conditions before 1971 and after 1979 precludes the analysis of proportional and consistent lake responses to climatic variables. Therefore, we focused on data available for 1971-79, as the lake level, during this particular time, maintained a fairly steady-state condition defined by $A_{LE}=R/E_L-P_L$ in the case of closed lakes (Harris, 1994). Monthly data of precipitation (P), evaporation (E) and changes in water level were converted to volumes. Next, we determined E_L+V/P_W as the rate of watershed precipitation (P_W) able to offset the lake evaporation (E_L) and provide a surplus amount of water equivalent to the volume change (V) into the lake, determined by the fluctuation in water level. In a steady state, the water balance $(P_L-E_L)/R=0$ (P_L = lake precipitation; E_L = lake evaporation; R =

runoff), therefore $R = P_L - R$ and the total water supply to the lake $W_s = 2E_L + V = P_L + R$. Thus, the relationship between W_s and V were determined.

An incorporation of topographic charts (CETENAL, 1987) into a Geographic Information System (ILWIS Ver. 1.3) enabled digitizing of watercourses (channels) in order to assess number, length and density.

Results

Water levels

The altitude of ground-based references before and after verification in the field is shown in Table 1. Here, refs. b and d display the highest bias in contrast with c, which has no difference relative to the geodesic point.

Climatic variables

The seasonal alternation of wet and dry seasons results in lake level fluctuations following the predominance of one or the other climatic extreme situation (Fig. 2). When steady water additions begun with early rains (1972-73), the lake level shows a lag-time response in its recovery of higher positions. In the case that an initial water supply by early rains stops, water additions offset losses by evaporation at some 23 million m^3 , reaching an equilibrium lake level. Thereon, new additions of water cause a proportional change in the lake level, following a close linear relationship (Fig. 3). Conversely, the volume loss during the dry season impacts the water level in a parallel decreasing sequence. Runoff involves 49% of W_s on average (Table 2).

GIS output

Lake Patzcuaro watershed (Fig. 4) measures 93,430 ha between 19° 27'N, 19° 44'N, 101° 26'N and 101° 53'N, in an altitude differential of 1265 m (Fig. 5). Eight internal sub-basins (Fig. 6) bear implicit specific morphological and hydrological characteristics (Table 3).

Discussion

Goldman (1988) states that "long-term data sets made it possible to detect eutrophication in Lake Tahoe and to sort out the climatic effects of rainfall, solar radiation, depth of winter mixing, and possibly in future the role of grazing by zooplankton on the annual primary productivity. To improve our understanding of both the structure and function of lakes, we need sustained data collection over many years in order to interpret lake processes that are often obscured in short time by interannual variation". In Mexico, "unfortunately, part of the limnological tradition that begun with Cuesta-Terrón, De Buen, Osorio-Tafall, Rioja and Alvarez, has been lost and there are now only isolated efforts..." (Arredondo, 1987) mostly analogous to photographs taken in particular moments by different methods. Our case study, as well as case studies of some other lakes in Michoacan, demands a conceptual framework of regional applicability (Bernal-Brooks, 1998) based on reliable long-term databases. Here, we highlight the need to profoundly revise any past information available in regard to Mexican water bodies, especially that coming from anonymous or government sources, before proceeding to interpretations. The following drawbacks were detected for Patzcuaro:

Ground-references for water levels seem to be established by means of altimeter measurements, and the high variance associated with this method impose limitations when comparing data between the different time-series.

De Buen (1944b:108-9, Figure 4) data on water levels include an error between September 1, 1941, and February 28, 1942. In order to be consistent with the figure, the typist forgot to include 2,035 before the corresponding numbers for those dates.

In the case of the 2nd time-series, the scales for lake level registration were changed several times and moved to other places in the nearby, trying to maintain the zero at 2,034.08 m.a.s.l. Since the first wooden scale attached to a tree (October 19, 1949), scale re-locations proceeded as the lake level went down (December 23, 1949; March 24, 1952) and up (scale change: May 22, 1962) respectively. Sometime during the '60s, a metal scale was established permanently, although it currently lies over dry land some 100 m away from the shoreline. An unknown ground reference at the town of Quiroga (2,075 m.a.s.l.) was not indicated in the reference paper.

Data contained in the third time-series appears with a difference of +2.43 m relative to the 2nd time-series, and also moved one position (the number for February should be in the place of January, as it is in the 2nd time series) for unknown reasons. However, this sequence by 1987 connects smoothly with the 4th time-series, pointing out a convenient anonymous intervention to change ref. d for ref. b.

The time-series on climatic variables frequently include missing data or some of them doubtful in the case of evaporation.

CNA (1995) re-issued the climatic information provided by the SMM (1922-1986) for all the Meteorological Stations in Mexico but, in the case of the one numbered 16087, the evaporation data appear different and significantly lower than they are in the original file.

The pertinent data corrections applied reveal cyclic movements (<6 m) at the lake surface in the long-term of approximately every 40 years, including also short-term seasonal fluctuations (<1 m). Figure 7 shows the whole assembly of water-level positions over time before and after verification in the field and corrections. The maximum depth of 15 m determined at station VII on February 17, 1941 (De Buen, 1941c; 1944b) approximates the current maximum depth (10-11 m) following the rearrangement made on the water levels time-series, which also served to double-check the recently developed database.

Chacon (1993a: p.32) model of water balance bears implicit high evaporation rates at the terrestrial watershed able to prevent the development of surface runoff over the topsoil. In his own words: "On an annual basis, if the average monthly precipitation (with the exception of the rainy season) is less than the average monthly evaporation, then any runoff and precipitation over the lake surface would have negligible effects in the lake water levels". However, the shape of seasonal cycles highlights an alternated influence in the lake water level of either precipitation or evaporation predominance (Osorio-Tafall, 1944, De Buen, 1944b) rather than the arrival of seepage flows. The speed of rain infiltration underground and then, towards the lake, requires further investigation to accept or reject the hypothesis of water movements in terms of one-season. However, such a complex commitment

involving land use, soil type, and erosion degrees and slopes, led us to consider a shortcut by the analysis of lake water levels versus climatic variables. Herewith, a close relationship ($r^2= 0.92$) between the lake level fluctuations and water additions (Fig. 3) addresses a significant role of runoff as a hydrological component in combination with direct precipitation over the lake surface.

GIS output shows the existence of abundant runoff channels in intimate interaction with the land features mentioned above. Along the watershed, subbasins I, II and III include more channels, main water courses at maximum length and low to intermediate channel density running over smoother slopes of null to slight soil erosion. In contrast, subbasins V and VIII with less area than the other subbasins, have steeper slopes, shorter water channels and high channel density in deteriorated grounds where the hydrologic erosion has caused strong to severe impacts. Subbasins IV, VI and especially VII, maintain a hybrid situation between the two extremes mentioned above. Furthermore, land use following deforestation, agriculture and extensive cattle management, catalyzes an hydrological network deterioration due to vegetation cover reduction and the stimulation of damages caused to the grounds by increasing water erosion. Spatial and temporal variations in water additions seem to induce variable R values between years as detected in our analysis. A parallel study (Gomez-Tagle, 1997) shows the ultimate consequence of land mismanagement in terms of erosion.

Other arguments in support to the presumed climatic sensitivity of the closed basins located in Central Mexico as a response to variations in rainfall amounts through time are as follows:

Hutchinson *et al.* (1956: p. 1493) considered that the high level of Nahua time, which permitted Cortes to conquer Tenochtitlan (Mexico City today), is also established for Patzcuaro by the evidence of the Beaumont map. Thus, while the archaeological data from Michoacan are scanty, they provide some independent evidence for the view that moist and dry phases were synchronous in Michoacan and in the Valley, and must have been controlled by climate”.

Wetzel (1983, p. 38) states that:

Much of the intercepted water and surface runoff (up to 80 per cent) is returned to the atmosphere by evaporation. Infiltrated water may be temporarily stored (average renewal time approximately 280 days) as soil moisture prior to being evapotranspired. Some of the water percolates to deeper zones to be stored as groundwater (average renewal of 300 years). Groundwater is actively exchanged and may be used by plants, flow out as springs, or seep as runoff. The runoff phase is exceedingly complex and variable because of the extensive involvement with biota, the extreme heterogeneity of soil structure and composition, and variation in climate...

"When the rate of rainfall or meltwater influx exceeds the adsorptive capacity of the soil, the excess water flow over the surface as overland flow. Overland flow is most common in arid and semiarid regions....

The same author considers groundwater seepage below the surface for lakes in rock basins and lake basins in glacial till that extend below the water table. This is not the case for Lake Patzcuaro.

Watts & Bradbury (1982) and O'hara (1991), quoted by Metcalfe *et al.* (1994, p. 139), pointed out that "the level of Lake Patzcuaro has fluctuated considerably over both the long and the short term. There is no evidence that the lake has ever desiccated completely or had a clear tendency to dry up in the 44,000 years of its known existence".

Harris (1994, p. 83) consider that "measurements of lake volume changes... provide a climate record. In particular, closed lakes... by integrating the

precipitation over their catchment basins, provide a fuller picture of precipitation changes than the more localized *in situ* measurements, particularly in arid and semiarid regions, where such monitoring is often sparse".

Grimm *et al.* (1997: 1927, fig. 1) shows a map of western North America including the Basin and Range, Southwest and Mexico region, with runoff ratios (runoff/precipitation) in the range of 0.1-0.2 for the area of Lake Patzcuaro.

Bernal-Brooks & MacCrimmon (2000) observed parallel movements in the water level fluctuations of some lakes in the region of Michoacan (Zirahuen, Patzcuaro, Cuitzeo and Chapala), which support the argument of climatic sensitivity for them all.

Gomez-Tagle Chavez *et al.* (this volume) analyzed aerial photographs from Lake Patzcuaro in order to set up a methodological basis for the graphic demonstration of climatic sensitivity through detection of changes in area over time.

A Global Lake and Catchment Conservation Database (GLCCD) under development includes some of the closed basins in Central Mexico as potential water bodies sensitive to climate change. Lake Cuitzeo and Lake Chapala appears on the basis of a threshold area of detection (>100 km²) inherent to the satellite technology used (Birkett & Mason, 1995). Long and short-term water cycles seem to be an expression of the lake and its catchment functioning relative to climate change.

A decline in lake water level since 1979 in Lake Patzcuaro, along with the observations made by Williams (1993) in saline lakes, suggest an impairment

of rainfall for the last 20 years, as well as that Lake Patzcuaro is a valuable study case for monitoring the regional climatic change. The answer to how much of the tendency to lower water levels responds to a natural cycle or an anthropogenic influence remains as a challenge. The next decade will demonstrate if a natural progression to wetter conditions will appear as it occurred during the 1970s or a global warming effect irremediably announces our lakes' disappearance and human life constraints in the area. A monitoring of lake levels in this region became an imperative for the Comisión de Pesca, Residencia en el Lago de Pátzcuaro, at the Government of Michoacan.

Finally, an ancillary observation made on another example based on altimeter measurements. Cruz (1995), on the basis of data obtained by De Buen (1943), reach the conclusion of a "transgression stage" (*sensu* De Buen) for Lake Zirahuen, a water body located 17 km from Lake Patzcuaro. Again, data verification must be carefully undertaken before interpretations in order to avoid any misuse of data to support prescribed theories. Certainly, in the study of Mexican waters, frequent and detailed observations based on standard methodology and systematized in long-term databases should become a priority, as Goldman (1988) shows in the case of Lake Tahoe.

Acknowledgements

This research would not be possible without the participation of the topography people at the Comisión de Pesca del Gobierno del Estado de Michoacan, and the kindness of his Director, Biól. Pedro Tamayo Díaz. The authors appreciate the willingness of MC Araceli Orbe Mendoza (CRIP Patzcuaro) and Yolanda Chavez (INIFAP Campo Morelia) to provide us with facilities and equipment. Financial support was given, in part, by CONACyT project 3626P-B9608.

References

- Ancona, I., M.A. Batalla, E. Caballero, C.C. Hoffman, R. Llamas, R. Martín del Campo, I. Ochoterena, E. Rioja, J. Roca, A. Sámano, C. Vega & F. Villagrán, 1940. Prospecto biológico del lago de Pátzcuaro. An. Inst. Biól. (Méx.), 11: 415-503
- Arredondo, J.L., (1983) 1987. Bosquejo histórico de las investigaciones limnológicas realizadas en los lagos mexicanos, con especial énfasis en su ictiofauna. In: Gomez-Aguirre, S. & V. Arenas-Fuentes (eds). Contribuciones en Hidrobiología. Proceedings of the meeting "Alejandro Villalobos" held at the University of Mexico, 24-26 October 1983.
- Barbour, C.D., 1973. A biogeographical history of *Chirostoma* (Pisces: Atherinidae): a species flock from the Mexican plateau. COPEIA 3: 553-556
- Barrera, N., 1992. Ecogeografía. In: Toledo, V.M., P. Alvarez-Icaza & P. Avila (eds). Patzcuaro 2000. Fundación Friedrich Ebert Stiftung, Mexico, D.F.: 11-35.
- Bernal-Brooks, F.W., 1998. The lakes of Michoacan (Mexico): a brief history and alternative points of view. Freshwater Forum 10: 20-34.
- Bernal-Brooks, F.W. & H.R. MacCrimmon, 2000. Lake Zirahuén (Mexico): an assessment of the morphometry change based on evidence of water level fluctuations and sediment inputs. In M. Munawar, S. Lawrence, I. Munawar & D. Malley (eds), Aquatic Ecosystems of Mexico: Status and Scope. Backhuys Publishers, The Netherlands.
- Birkett, C.M. & I.A. Mason, 1995. A new global lakes database for a remote sensing programme studying climatically sensitive large lakes. J. Great Lakes Res. 21 (3): 307-318.
- CETENAL (Centro de Estudios sobre el Territorio Nacional), 1987. Topographic charts E14A21, E14A22, E14A31 AND E14A32. 3rd Edition.
- Chacon, T. A., 1989. A limnological study of Lake Patzcuaro, Mexico, with a consideration of the applicability of remote sensing techniques. PhD thesis, Stirling Univ. Scotland. 340p.
- Chacon, T. A., 1992. El Ecosistema Lacustre. In: Toledo, V.M., P. Alvarez-Icaza & P. Avila (eds). Patzcuaro 2000. Fundación Friedrich Ebert Stiftung, Mexico, D.F.: 37-70.
- Chacon, T. A., 1993a. El Lago de Pátzcuaro, Michoacán, México. Bosquejo de un Lago Amenazado. Ed. Universitaria. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Chacon, T. A., 1993b. Lake Patzcuaro, Mexico: watershed and water quality deterioration in a tropical high-altitude Latin American Lake. Lake and Reserv Manage. 8(1): 37-47.
- CNA (Comisión Nacional del Agua), 1995. A database of climatic variables registered by SSM (1969-1986).
- Cruz, O., 1995. Balance hídrico en la cuenca del lago de Zirahuén. BSc thesis, University of Michoacan. 78p

- De Buen, F., 1941a. Dos cortas campañas limnológicas en el lago de Patzcuaro (febrero y julio de 1941). *Investigaciones de la Estación Limnológica de Pátzcuaro* 10: 1-16
- De Buen, F., 1941b. El lago de Pátzcuaro. *Rev. Geogr.* 1: 20-44.
- De Buen, F., 1941c. Las variaciones físicas y químicas de las aguas del lago de Pátzcuaro (st. X) desde octubre de 1939 a marzo de 1941. *Investigaciones de la Estación Limnológica de Pátzcuaro* 7: 1-25.
- De Buen, F., 1943. Los lagos michoacanos. I. Caracteres generales. El lago de Zirahuén. *Rev. Soc. Mex. Hist. Nat.* 4 (3-4): 211-232.
- De Buen, F., 1944a. Limnobiología de Patzcuaro. *Anales del Instituto de Biología (Mexico)* 15: 261-312.
- De Buen, F., 1944b. Los lagos michoacanos. II. El lago de Patzcuaro. *Rev. Soc. Mex. Hist. Nat.* 5: 99-125.
- Deevey, E.S., 1957. Limnological studies in Middle America with a chapter on Aztec limnology. *Transactions of the Connecticut Academy of Arts and Sciences* 39: 213-328.
- Demant, A., 1975. Les quatre provinces volcaniques du Mexique, relations avec l'évolution géodynamique, depuis le Cretace, II. Les deux provinces occidentales. *C.R. Acad. Sc.*, 280: 1437-1440.
- DGG (Dirección General de Geografía), 1991. Data file for the geodesic point BNT-601 established by CETENAL in 1974.
- Goldman, C.R. 1988. Primary productivity, nutrients, and transparency during the early onset of eutrophication in ultra-oligotrophic Lake Tahoe, California-Nevada. *Limnol. Oceanogr.* 33 (6, part 1), 1321-1333.
- Gomez-Tagle, A., 1997. Levantamiento Agrológico Forestal de la Cuenca de Patzcuaro, Mich., y Diagnóstico de Posibilidades de Recuperación y Desarrollo mediante Sistemas de Información Geográfica. PhD thesis. UNAM. 131p.
- Gomez-Tagle, A., F.W. Bernal-Brooks & J. Alcocer-Durand, this volume. Sensitivity of Mexican water bodies to regional climatic change: three study alternatives applied to remote sensed data of Lake Patzcuaro.
- Grimm, N.B., A. Chacon, C.N. Dahm, S.W. Hostetler, O.T. Lind, P.L. Starkweather & W.W. Wurtsbaugh, 1997. Sensitivity of aquatic ecosystems to climatic and anthropogenic changes: the Basin and Range, American Southwest and Mexico. *Hydrological Processes* 11: 1023-1041
- Harris, A.R. 1994. Time series remote sensing of a climatically sensitive lake. *Remote Sens. Environ.* 50: 83-94
- Hutchinson, G. E., Patrick, R. & E.S. Deevey, 1956. Sediments of Lake Patzcuaro, Michoacan, Mexico. *Bulletin of the Geological Society of America* 67: 1491-1504
- Metcalfe, S., F.A. Street-Perrot, S. O'hara & P.E. Hales, 1994. The paleolimnological record of environmental change: examples from the arid frontier in Mesoamerica: In C. Millington & K. Pye (eds), *Environmental change in drylands: biogeographical and geomorphological perspectives*, John Wiley & Sons: 131-145
- O'hara, S.L., 1991. Late Holocene environmental change in the basin of lake Patzcuaro, Michoacan, Mexico. PhD thesis, Oxford University.

- Osorio-Tafall, B.F., 1941. Materiales para el estudio del microplancton del lago de Pátzcuaro (Mexico). *Anales de la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas (Mexico)* 2 (2-3): 331-384.
- Osorio-Tafall, B.F., 1944. Biodinámica del lago de Pátzcuaro. I. Ensayo de interpretación de sus relaciones tróficas. *Rev. Soc. Mex. Hist. Nat.* 5 (3-4): 197-227
- Planas, D. & G. Moreau, 1990. Natural eutrophication in a warm volcanic lake. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 24: 554-559.
- SARH (Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos), 1949-1970. Lake Patzcuaro water levels. (2nd time-series).
- SARH (Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos), 1950-1987. Lake Patzcuaro water levels. (3rd time series).
- SCT (Secretaría de Comunicaciones y Transportes), 1986-1990. Lake Patzcuaro water levels. (4th time series).
- SDAF (Secretaría de Desarrollo Agropecuario y Forestal), 1989-. Lake Patzcuaro water levels (5th time series).
- SMN (Servicio Meteorológico Nacional), 1922-1986. Climatic variables registered at 16087 Meteorological Station.
- Tamayo, J.L. & R.C. West, 1964. The hidrology of Middle America. In: Wauchope, R. & R.C. West (eds), *Handbook of Middle America Indians*, I. University of Texas, Austin.
- Watts, W. & J.P. Bradbury, 1982. Paleoeological studies at Lake Patzcuaro on the west-central Mexican plateau and at Chalco in the basin of Mexico. *Quaternary Res.* 17: 56-70.
- Wetzel, R., 1983. *Limnology*. CBS Colege Publishing Co., 767pp.
- Williams, W.D., 1993. The worldwide occurrence and limnological significance of falling water-levels in large, permanent saline lakes. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 25: 980-983.
- Zozaya, M., 1941. Observaciones termoplumiométricas en Pátzcuaro, Mich. *Investigaciones de la Estación Limnológica de Pátzcuaro* 2: 1-14

List of figures

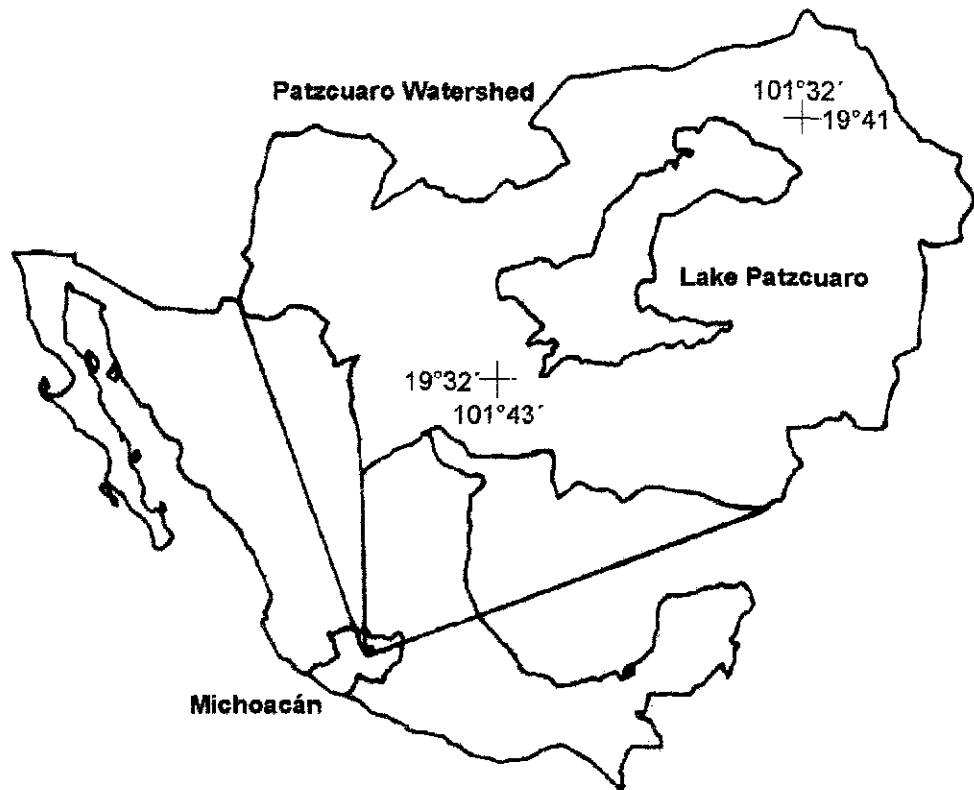


Figure 1. Geographical location of Lake Patzcuaro in Central Mexico

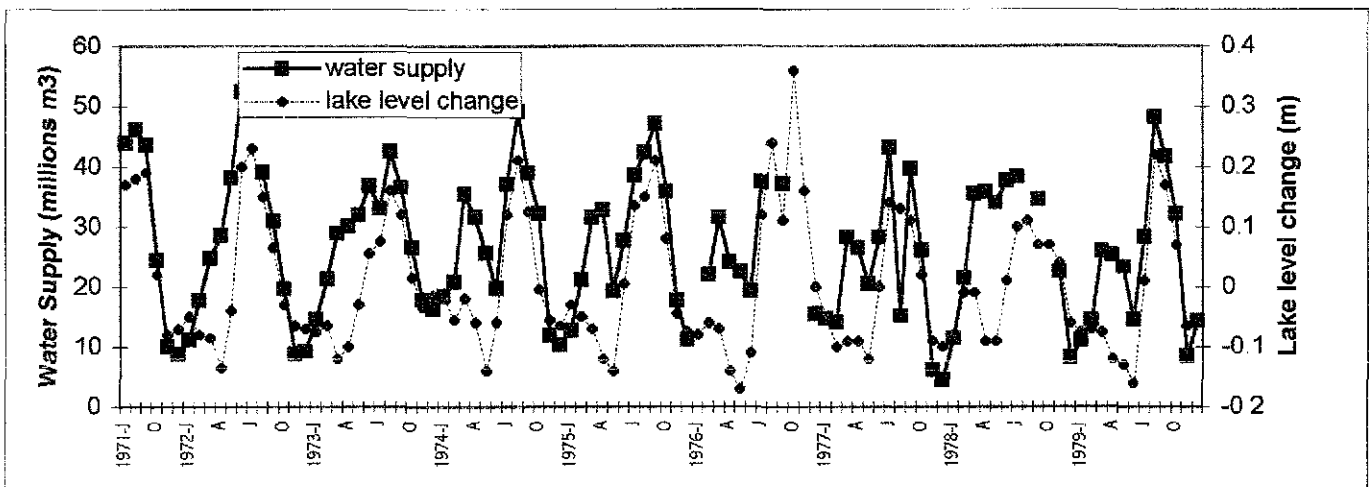


Figure 2. Sequences of water supply to the lake (W_s) and corresponding lake volume changes (1971-1979)

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

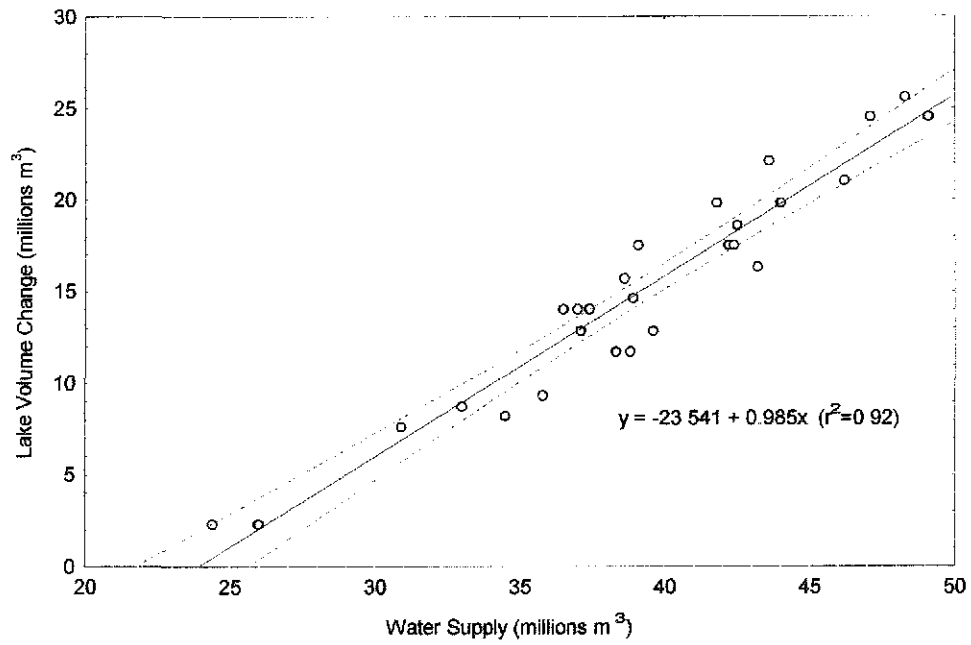


Figure 3. Water supply for the rainy seasons of 1971-79 and corresponding changes in lake volume

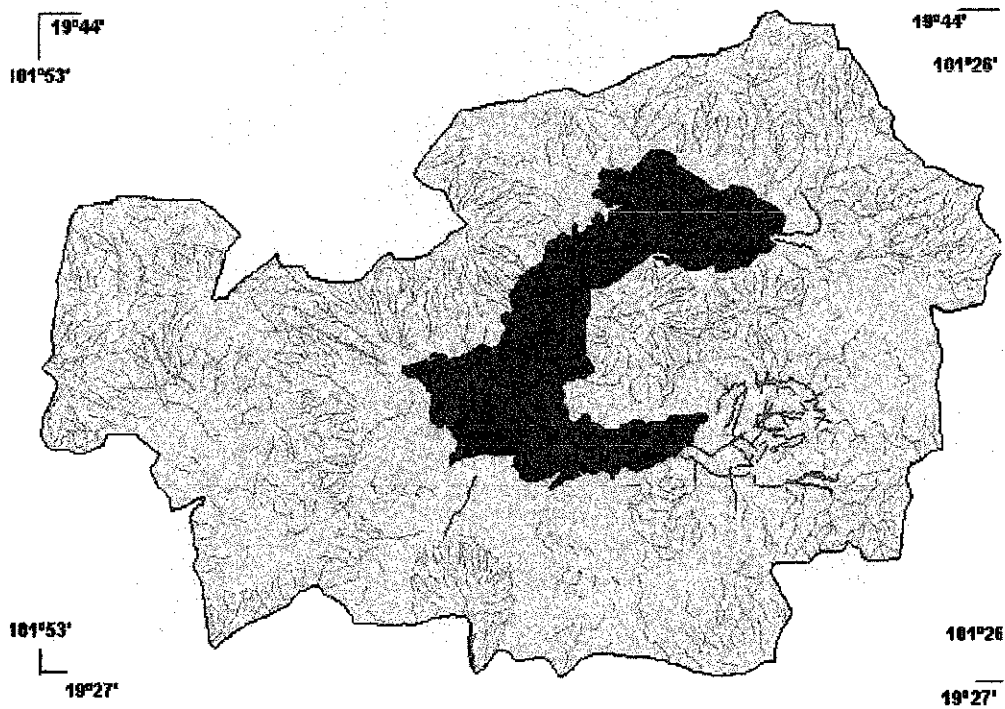


Figure 4. Lake Patzcuaro channels network

ESTADO DE GUANAJUATO
SECRETARÍA DE AGUAS

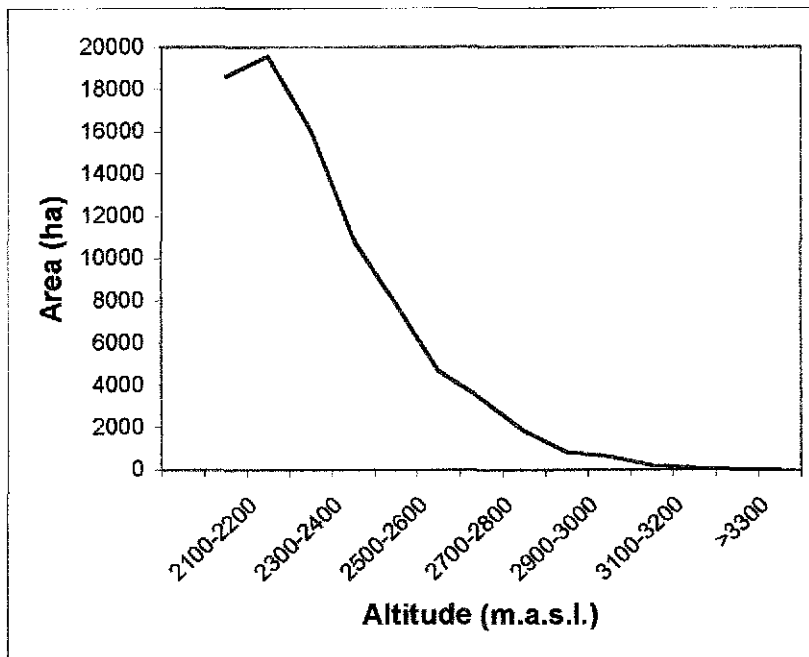


Figure 5. Lake Patzcuaro watershed area relative to the altitude

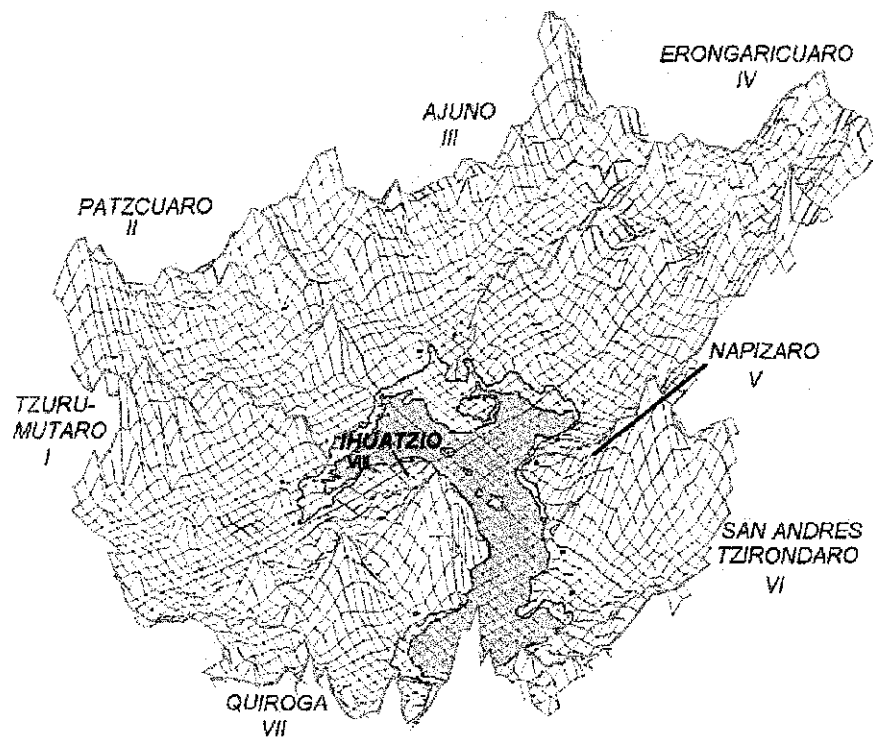


Figure 6. Lake Patzcuaro basin and subbasins in a perspective view from Cerro "El Zirate"

TOCIS CON
FALLA DE ORIGEN

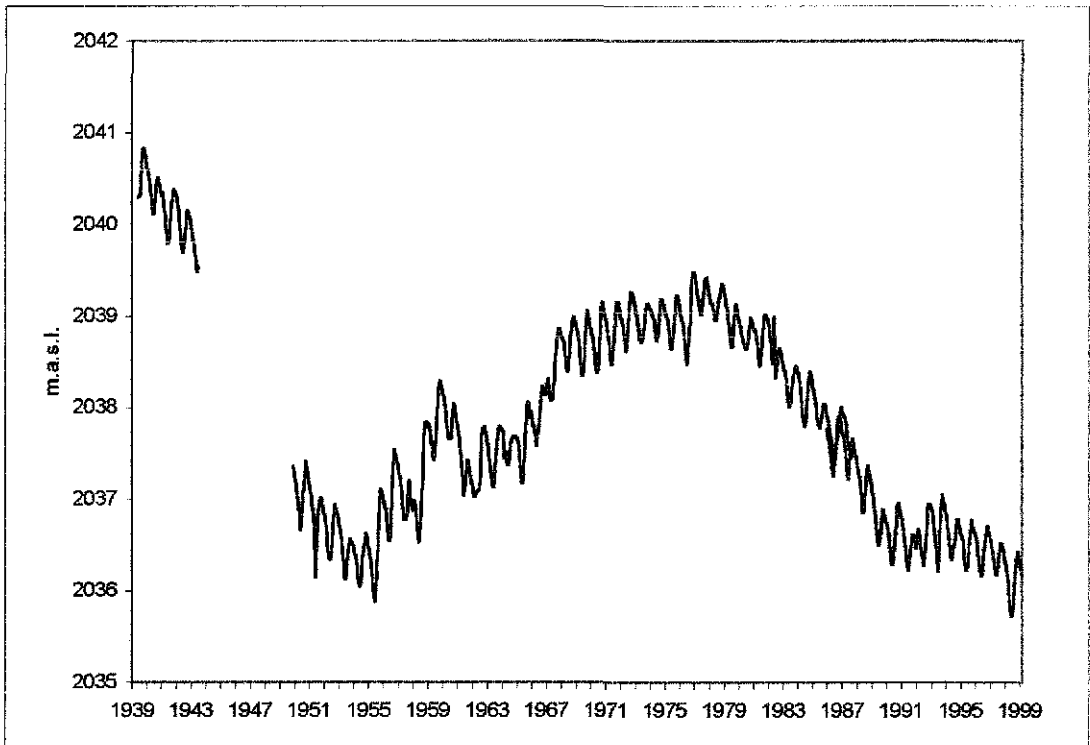
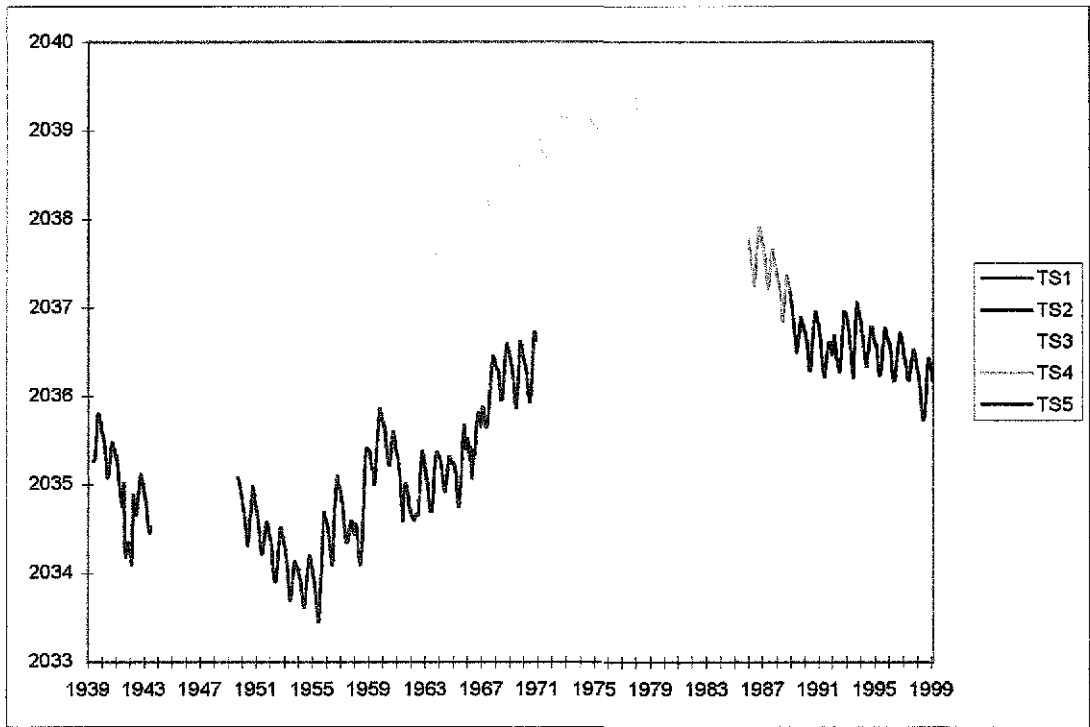


Figure 7. Lake Patzcuaro water levels, a) before and b) after re-arrangement of data and corrections applied. (Time series 1: 1939-1943; Time series 2: 1949-1970; Time series 3: 1950-1987; Time series 4: 1986-1990; Time series 5: 1989-).

List of tables

Table 1. Altitude (m.a.s.l.) of ground references used for the registration of Lake Patzcuaro water levels

References	reported m.a.s.l.	measured m.a.s.l.	difference m
ref a	2,154.29		
ref b	2044	2049.026	5.026
ref c	2034.08	2038.471	4.391
ref d		2038.385	0

Table 2. Lake Patzcuaro water balance variables (1971-79) including P = precipitation (mm); E = evaporation (mm); P_w = watershed precipitation (10⁶ m³); E_L = lake evaporation (10⁶ m³); V = lake volume fluctuation (10⁶ m³); P_L = precipitation over the lake surface (10⁶ m³); R = runoff (10⁶ m³) and R_c = runoff coefficient.

		P	E	P _w	E _L	V	W _s	P _L	R	R _c
1971	J	0.2487	0.1038	232.4	12.1	19.8	44.0	29.0	15.0	0.07
	A	0.1942	0.1083	181.4	12.6	21.0	48.2	22.6	23.6	0.15
	S	0.2208	0.092	206.3	10.7	22.1	43.6	25.7	17.8	0.10
	O	0.1091	0.0946	101.9	11.0	2.3	24.4	12.7	11.7	0.13
1972	A	0.1768	0.0926	165.2	10.8	17.5	39.1	20.6	18.5	0.13
	S	0.1713	0.1001	160.0	11.7	7.6	30.9	20.0	10.9	0.08
1973	J	0.1389	0.1042	129.8	12.1	8.7	33.0	16.2	16.8	0.15
	A	0.2407	0.1026	224.9	12.0	18.6	42.5	28.0	14.5	0.07
	S	0.1617	0.0966	151.1	11.3	14.0	36.5	18.8	17.6	0.13
	O	0.1322	0.1062	123.5	12.4	17.5	42.2	15.4	26.8	0.25
1974	J	0.1567	0.0989	146.4	11.5	14.0	37.0	18.3	18.8	0.15
	A	0.2093	0.1058	195.5	12.3	24.5	49.1	24.4	24.7	0.14
	S	0.1078	0.1045	100.7	12.2	14.6	38.9	12.6	26.4	0.30
1975	J	0.1663	0.098	155.4	11.4	15.7	38.6	19.4	19.2	0.14
	A	0.2679	0.1069	250.3	12.5	17.5	42.4	31.2	11.2	0.05
	S	0.143	0.097	133.6	11.3	24.5	47.1	16.7	30.4	0.26
	O	0.0244	0.1135	22.8	13.2	9.3	35.8	2.8	32.9	1.65
1976	J	0.2695	0.1007	251.8	11.7	14.0	37.4	31.4	6.0	0.03
	S	0.2235	0.1043	208.8	12.2	12.8	37.1	26.0	11.1	0.06
1977	J	0.2941	0.1152	274.8	13.4	16.3	43.2	34.3	8.9	0.04
	S	0.1052	0.115	98.3	13.4	12.8	39.6	12.3	27.4	0.32
	O	0.0585	0.1016	54.7	11.8	2.3	26.0	6.8	19.2	0.40
1978	J	0.183	0.1144	171.0	13.3	11.7	38.3	21.3	17.0	0.11
	S	0.0837	0.1131	78.2	13.2	8.2	34.5	9.8	24.8	0.36
1979	J	0.2036	0.1165	190.2	13.6	11.7	38.8	23.7	15.1	0.09
	A	0.1821	0.0971	170.1	11.3	25.6	48.3	21.2	27.0	0.18
	S	0.1926	0.0943	179.9	11.0	19.8	41.8	22.4	19.3	0.12

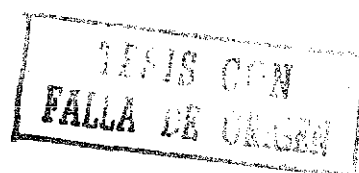


Table 3. Morphometric and hydrologic characteristics of Lake Patzcuaro watershed

	I ZURUMUTARO	II PATZCUARO	III AJUNO
Area, ha	17406	9015	12131
Mean slope, %	11.27	14.34	13.06
Channels	132	47	101
Length of main channel, km.	53	49.6	37.05
Channels density, number/ha	0.76	0.52	0.83
Channels density, km/ha	1.25	0.55	0.97

	IV ERONGARICUARO	V NAPIZARO	VI SAN ANDRES
Area, ha	19296	1332	7350
Mean slope, %	14	91.22	15.43
Channels	166	18	52
Length of main channel, km.	19.75	11.5	30.9
Channels density, number/ha	0.86	1.35	0.71
Channels density, km/ha	1.19	2.31	0.96

	VII QUIROGA	VIII IHUATZIO
Area, ha	15897	2221
Mean slope, %	12.34	88.29
Channels	178	20
Length of main channel, km.	56.85	5.95
Channels density, number/ha	1.12	0.9
Channels density, km/ha	1.57	0.9

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

SENSITIVITY OF MEXICAN WATER BODIES TO REGIONAL CLIMATIC CHANGE: THREE STUDY ALTERNATIVES APPLIED TO REMOTE SENSED DATA OF LAKE PATZCUARO

Gomez-Tagle Chavez, A.¹, F. W. Bernal-Brooks², & J. Alcocer³

¹ Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias, Campo Experimental en Morelia. E-mail: pichucho@lycos.com

² Estacion Limnologica de Patzcuaro, Centro Regional de Investigacion Pesquera de Patzcuaro. Calzada Ibarra 28, Colonia Ibarra, Patzcuaro, Michoacan. 61609. E-mail: bbrooks@jupiter.ccu.umich.mx

³ Limnology Lab, Environmental Conservation and Improvement Project, UIICSE, UNAM Campus Iztacala. Av. de los Barrios s/n, Los Reyes Iztacala, Tlalnepantla, Edo. de Mex. 54090. E-mail: jalcocer@servidor.unam.mx

Abstract

Historical aerial photography over closed basins enables the observation of lake surfaces at variable water levels and climatic conditions. Thus, the assessment at landscape level of subtle variations in inundated areas depends on a suitable framework for processing historical imagery, frequently available at different scales and resolutions.

The present paper deals with Lake Patzcuaro as a case study and the application of three analytical procedures to remote sensed data of 1974, including two maps commercially available and nine aerial photographs. Computer-based processing of images and further incorporation into GIS led to three different outputs: topographic map (TM-GIS), photomosaic 1 (P_1) and photomosaic 2 (P_2). Aerial photographs assemblages were georeferenced by means of GCP's, 86 located by means of INEGI vectorial polygons (P_1), and 40 determined directly at the field by GPS (P_2).

In conclusion, TM-GIS lack of photointerpretation for the lake as an image derived from a topographic map; while P_2 involved an unacceptable RMS. P_1 thus became the best option for the calculation of areas not only because of the lower RMS associated, but the additional photointerpretation of limnological zones exclusive to aerial photographs. As a background picture, P_1 also facilitates the analysis of historical images on a comparative basis.

Key words: climatic change, lake levels, Central Mexico, remote sensing, closed lakes, Patzcuaro

Introduction

Lakes in closed basins often undergo variations in water levels and area relative to changes in the regional water balance between precipitation (P) and evaporation (E). This magnitude of response to fluctuations in P-E depends on the relative contribution of groundwater inflow and outflow to the hydrologic budget; lake-level change is greatest in terminal basins which have neither surface nor groundwater outflow (Fritz *et al.*, 1999). The analysis of climatic effects over lakes morphometry requires historical imagery as well as equipment for manual or computer-aid photointerpretation. Meaden and Kapetsky (1991) have provided a view on the application of remote sensing techniques in inland waters. Johnson and Cage (1997) discuss current and future trends in technologies and tools used for catchment research and comment on their use as they has been applied to regional assessments.

Because of limited data availability about climatically sensitive lakes located in arid and semiarid regions, worldwide related programs have called for hydrological studies to be put into a more global perspective with the use of remote sensing techniques (Birkett & Mason, 1995). In consequence, the Mullard Space Science Laboratory (MSSL) is currently developing a Global Lake and Catchment Conservation Database (GLCCD) based on measurements of lake areas and levels by satellite imaging radiometers and radar altimeters respectively. An inherent limitation of 100 km² has been established as a minimum threshold area. We believe that studies related to smaller climatically sensitive lakes might also be informative when ground-based information and historical aerial photography are available. Moreover, the existence in Mexico of registered time-series on water levels for some closed lakes (Bernal-Brooks & MacCrimmon, 2000) encourage the possibility of retrospective studies relative to climate-based effects.

Since retrospective studies encompass decadal time scales, black and white aerial photographs represents the only remotely sensed data. Recent examples include studies of vegetation change in the South African Savanna (Hudak & Wessman, 1998), the Negrito Creek watershed in southwestern New Mexico

(Miller, 1999), and the Mediterranean Maquis in Northern Israel (Kadmon & Harari-Kremer, 1999). The high-spatial resolution needed to discriminate shrubs and trees in landscape studies like those mentioned before, led us to consider simultaneously the suitability of aerial photos in old files of land use/cover as a useful material for the analysis of climatically sensitive lakes. Historical sequences available for the case study herewith presented, Lake Patzcuaro, demand a framework for both, photomosaics assemblages at different scales and resolutions as well as correction of geometric distortions caused by aircraft drifting. As a preamble to obtaining comparable results through time, we applied the procedures described below.

Study Area

See Bernal-Brooks et al., 2001

Materials and Method

Computer hardware included a personal computer with an Intel Pentium II processor, 32 MB in RAM, 16 MB in video memory, and a scanner (ScanPort SQ 4800) with flat bed and fluorescent lamp. Images management were made by means of Adobe Photo-Shop ver. 5.0 (Adobe), Cartalinx ver. 1.0 (Cartalinx), and Idrisi for Windows ver. 2.010 (GIS) over the following working references:

- 1) Topographic maps Cheran E14A21 and Patzcuaro E14A22 (CETENAL, 1977), including Lake Patzcuaro at 1:50,000 scale.
- 2) Nine sequential aerial photographs of the lake basin (1:75,000 scale) taken in 1974, which are also the basis for the elaboration of maps mentioned before.
- 3) Vectorial polygons of maps E14A21 and E14A22 established by INEGI (1995) with an accuracy of 2 m.

General procedure

Six sectors were arbitrarily established inside the lake shoreline: Quiroga, Cuello, Islands, Erongaricuaro, Ihuatzio, and Jaracuaro. Also, a stereoscopic analysis of aerial photographs defined emergent and submersed vegetation on the basis of texture, as well as a limnetic zone (free of vegetation). Aerial photographs must be scanned in order to convert their information content into digital form (Kadmon & Harari-Kremer, 1999). Thus, maps and photos were transformed into digital data by means of graphic software (Adobe). Scanning of imagery at 600 dpi led to assemblage of entire Lake Patzcuaro images and adjustment of stereoscopic pairs by means of entities present in overlapping areas. Files in a *.tif format allowed image importation to Cartalinx (resample module). Then, a georeferencing process relied on Ground Control Points (GCP's). Digitizing followed contours of lakeshore, sectors, and limnological features over georeferenced images set up as backdrops. Vectorial polygons were incorporated into GIS and converted into raster format for the elaboration of output maps and areas calculation.

Specific outputs

1. Topographic map by GIS (TM-GIS).

The two parts of the lake image, as shown in CETENAL (1977) maps were carefully fitted together into the computer memory by means of vectorial polygons (INEGI, 1995), before proceeding to Cartalinx.

2. Photomosaic 1 (P_1).

Mosaicking a global lake image from aerial photographs involved an overlap and analogic adjustment of every single photo over a background file of the topographic map. The latter included an intricate matrix of digitized contours, including diverse terrestrial features in the lake nearby, such as watercourse junctions and road intersections. At Cartalinx level, 86 GCP's were included by means of an easy location of at both, topographic maps and aerial photographs, and determined by the INEGI (1995) vectorial polygons. Thus, geopositioned

references enabled the development of a correspondence file, which could be reprocessed into GIS resample module along with all digitized polygons.

3. Photomosaic 2 (P_2).

Procedures were basically the same as those for P_1 . In this case, though, 40 GCP's were identified at working references and determined directly in the field by means of GPS (Garmin 45).

Results

Remote sensed data for the present investigation includes the assemblage of both topographic map (Fig. 1) and photomosaic (Fig. 2). Output maps (TM-GIS, P_1 and P_2) enabled the calculation of areas shown in Table 1. Estimations of the total lake area differed as follows: 11,839.93 ha (TM-GIS); 11,648.19 ha (P_1), and 11,912.04 ha (P_2), including islands. Figures 3 and 4 show TM-GIS and P_1 , respectively, as the most relevant lake maps obtained herewith.

Discussion

Changes in the regional climatic regime induce responses of sensitive water bodies in terms of varying water levels and areas. The incorporation of aerial photographs into GIS enabled, in our study case of Lake Patzcuaro, an analysis of the situation at an unusually high water level (1974) different from what it currently is. As long as a generalized lake-level decline occurred in the western part of the Mesa Central of Mexico since 1979, lake surface shrinking and volume reductions indicate a progression to a dryer climate at the regional level (Bernal-Brooks & MacCrimmon, 2000). A graphic demonstration of climatic effects over sensitive lakes in Mexico is the aim of this and further research.

The analysis of aerial photographs on the basis of graphic software bear implicit different levels of variability, as a cumulative root mean square (RMS) rose in our case study to 24.5 m (TM-GIS), 19.5 m (P_1), and 197.6 m (P_2), with the following implications:

TM-GIS, despite the low RMS associated, includes a rough photointerpretation for the lake as it represents another view of the topographic chart (Fig. 2), focusing on terrestrial features at the water body nearby. Thus, the shallow lakeshore lack of vegetation-zone differentiation and, as such, overestimates of the limnetic area at the southern littoral.

P_1 , in contrast, reaches a finer image adjustment reinforced by 86 GCP's determined on the basis of INEGI (1995) vectorial polygons. Also, the areas with emergent and submersed vegetation acquired definition compared to the diffuse wetland shown in TM-GIS at the same place. Therefore, P_1 incorporates photointerpretation exclusive to aerial photographs becoming a true limnologic map that surpasses TM-GIS limitations. Moreover, an intricate matrix of digitized layers set up a framework for mosaicking aerial photographs from any other time, a methodological framework that enables the retrospective studies mentioned above.

An unacceptable RMS associated with P_2 arose from data obtained directly at the field with a commercial GPS. Low points coverage (6.6 points/photo in average) accompanies such variability, particularly outstanding at the neighborhood of the Cuello and Islands sectors. This fact draws our attention as long as the steep slopes of mountains beside the lakeshore interfered with the reception quality of microwaves coming from satellites. A codification process is recommended in the future to tackle the high variation in the process of P_2 georeferencing, if that is the case.

An analysis of total area estimations for Lake Patzcuaro by other authors is shown in Table 2, including the apparent source of primary remote sensed data. Tellez and Motte (1976) described the existence of different kinds of vegetation at the littoral zone based on aerial photographs, although the purpose was merely descriptive. Nonetheless, the latter contribution remained irrelevant, as further research still relied on the topographic map of 1974 as the basic reference for lake description and areas calculation. At the shallowest southeastern shoreline, in particular, a westward displacement occurred during the '80s and '90s as the lake surface shrunk at lower water levels. To date, no

assessment has been performed of area vs. water level position through time (and presumed changes in vegetation areas).

In our study, current advances in computer technology facilitated handling of geographical images on the basis of limited resources. Today, this type of analysis is within reach of those with the insight and desire to conduct the analysis (Johnson & Gage, 1999). In particular, the potentials of graphic software for incorporation of remotely sensed data into a GIS demonstrate an effective tool in our case study. Furthermore, the procedure is no less accurate than data obtained from manual photointerpretation (Kadmon & Harari-Kremer, 1999). Our estimation, surprisingly, approximates the results obtained by a team of students and professors from the Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Instituto Politécnico Nacional (supervision by Eng. Carlos Quintana and Eng. Jorge Mendez), which carried out a precise topographic survey in 1938-39 (De Buen, 1944; Zozaya, 1940 a, b). Both cases involved levels (Bernal-Brooks *et al.*, 2001) with roughly similar areas, which enables comparisons. The analysis of Lake Patzcuaro, among other climatically sensitive lakes in Mexico, is on-going on the basis of the methodology applied here.

Acknowledgements

The authors appreciate the willingness of MC Araceli Orbe Mendoza (CRIP Patzcuaro) and Yolanda Chavez (INIFAP Campo Morelia) in providing us with facilities and equipment. Financial support was given, in part, by CONACyT project 3626P-B9608.

References

- Bernal-Brooks, F.W. and MacCrimmon, H.R. 2000. Lake Zirahuén (Mexico): an assessment of morphometry change based on evidence of water level fluctuations and sediment inputs. In: M. Munawar, S. Lawrence, I. F. Munawar & D. Malley (eds.). *Aquatic Ecosystems of Mexico: Status & Scope*. Ecovision World Monograph Series. Backhuys Publishers. The Netherlands. 61-76.
- Bernal-Brooks, F.W., Gómez-Tagle Rojas, A. and Alcocer, J. 2001. Lake Pátzcuaro (México): a controversy about the ecosystem water regime approached by field references, climatic variables and GIS. *Hydrobiologia*. in press.
- Birkett, C.M. and Mason, I.A. 1995. A new global lakes database for a remote sensing programme studying climatically sensitive large lakes. *J. of Great Lakes Research* 21 (3): 307-318
- CETENAL (Centro de Estudios para el Territorio Nacional). 1977. Topographic charts E14A21 and E14A22 (1:50,000). 3rd. ed.
- Chacon, A., Ross, L.G. and Beveridge, M.C.M. 1989. Lake Patzcuaro, Mexico: results of a new morphometric study and its implications for productivity assessments. *Hydrobiologia* 184: 125-132.
- De Buen, F. 1944. Los lagos michoacanos. II. El Lago de Pátzcuaro. *Rev. Soc. Mex. Hist. Nat.* 5 (1-2): 99-125.
- Fritz, S.C., Cumming, B.F., Gasse, F. and Laird, K. 1999. Diatoms as indicators of hydrologic and climatic change in saline lakes. In: Stoermer, E.F. & J.P. Smol (eds.). *The Diatoms. Applications for the environmental and earth sciences*. Cambridge University Press. Cambridge. pp. 41-72.
- García, E., 1988. Modificaciones al sistema climático de Köppen. Talleres de offset Larios, S.A., México, D.F. 217pp.
- Herrera, E. 1979. Características y manejo del Lago de Pátzcuaro, Michoacán. BSc thesis. National University of Mexico (UNAM). Mexico.
- Hudak, A.T. and Wessman, C.A. 1998. Textural analysis of historical aerial photography to characterize woody plant encroachment in South African Savanna. *Remote Sens. Environ.* 66: 317-330
- Johnson, L.B. and Gage, S.H. 1997. Landscape approaches to the analysis of aquatic ecosystems. *Freshwat. Biol.* 37: 113-132
- Kadmon, R. & R. Harari-Kremer, 1999. Studying long-term vegetation dynamics using digital processing of historical aerial photographs. *Remote Sens. Environ.* 68: 164-176
- Meaden, G.J. and Kapetsky, J.M. 1992. Los sistemas de información geográfica y la telepercepción en la pesca continental y la acuicultura. FAO technical Report no. 318. 266pp.
- Miller, M. E. 1999. Use of historic aerial photography to study vegetation change in the Negrito Creek watershed, southwestern New Mexico. *Southwest. Nat.* 44: 121-137
- SMN (Servicio Meteorológico Nacional), 1922-1986. Climatic variables registered at 16087 Meteorological Station.

- Tellez, R. and Motte, O. 1980. Estudio planctonológico preliminar del Lago de Pátzcuaro, Michoacán, México. Mayo de 1976. 2nd. Latinamerican Symposium of Aquaculture. 1797-1836.
- Velasco, A. 1982. Evaluación de la calidad del agua con base en algunos aspectos de la comunidad planctónica del Lago de Pátzcuaro, Michoacán. BSc thesis. National University of Mexico (UNAM). Mexico.
- Zozaya, M. 1940a. Informes de la Estación Limnológica de Pátzcuaro. Mayo 1940. 23pp.
- Zozaya, M. 1940b. Informes de la Estación Limnológica de Pátzcuaro. Junio 1940. 14pp.



List of figures

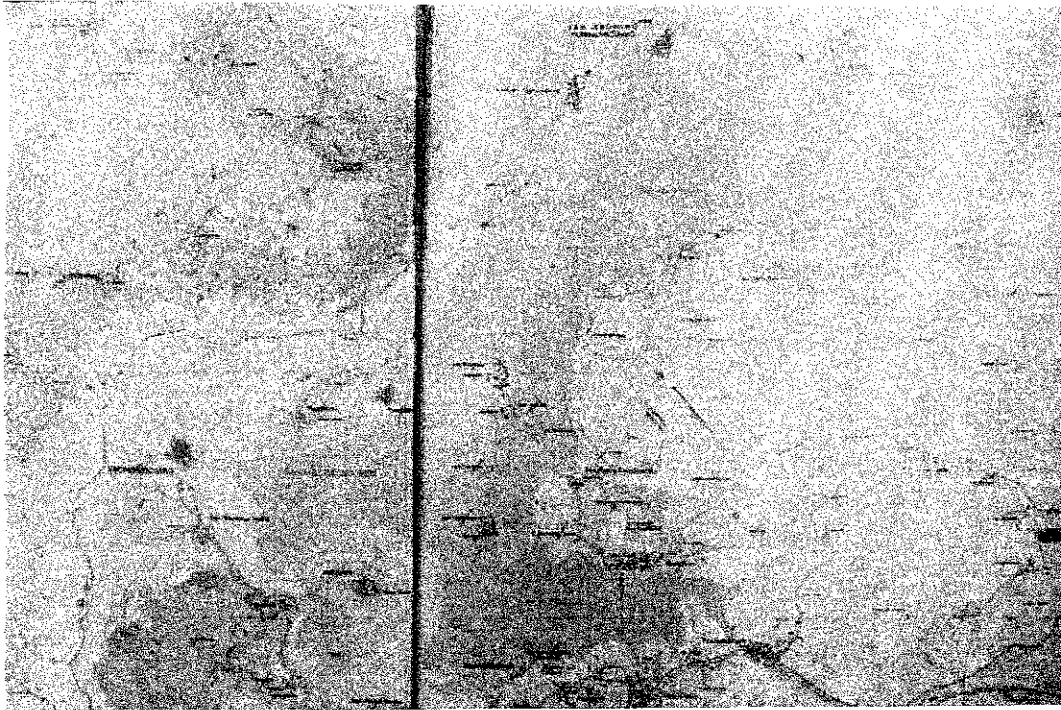


Figure 1. Lake Patzcuaro topographic map (source: CETENAL 1977).

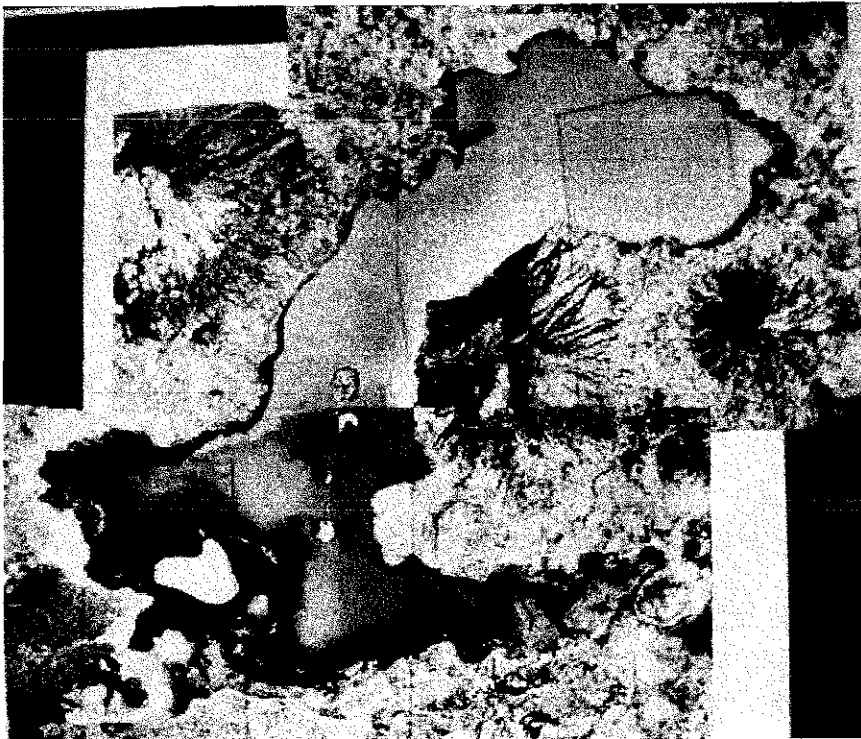


Figure 2. Lake Patzcuaro photomosaic.

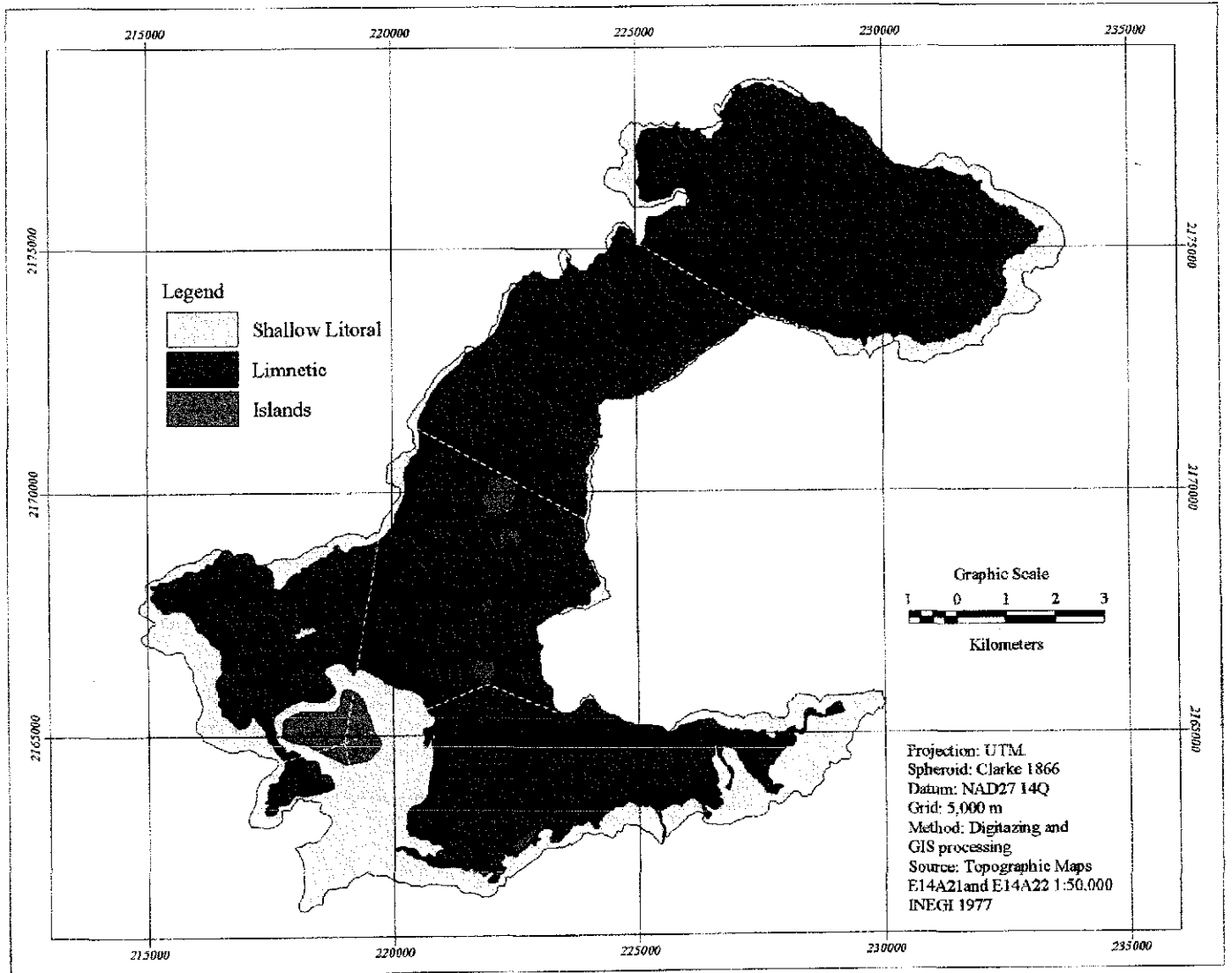


Figure 3. Output 1: Lake Patzcuaro (TM-GIS), including six sectors considered in the present research.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

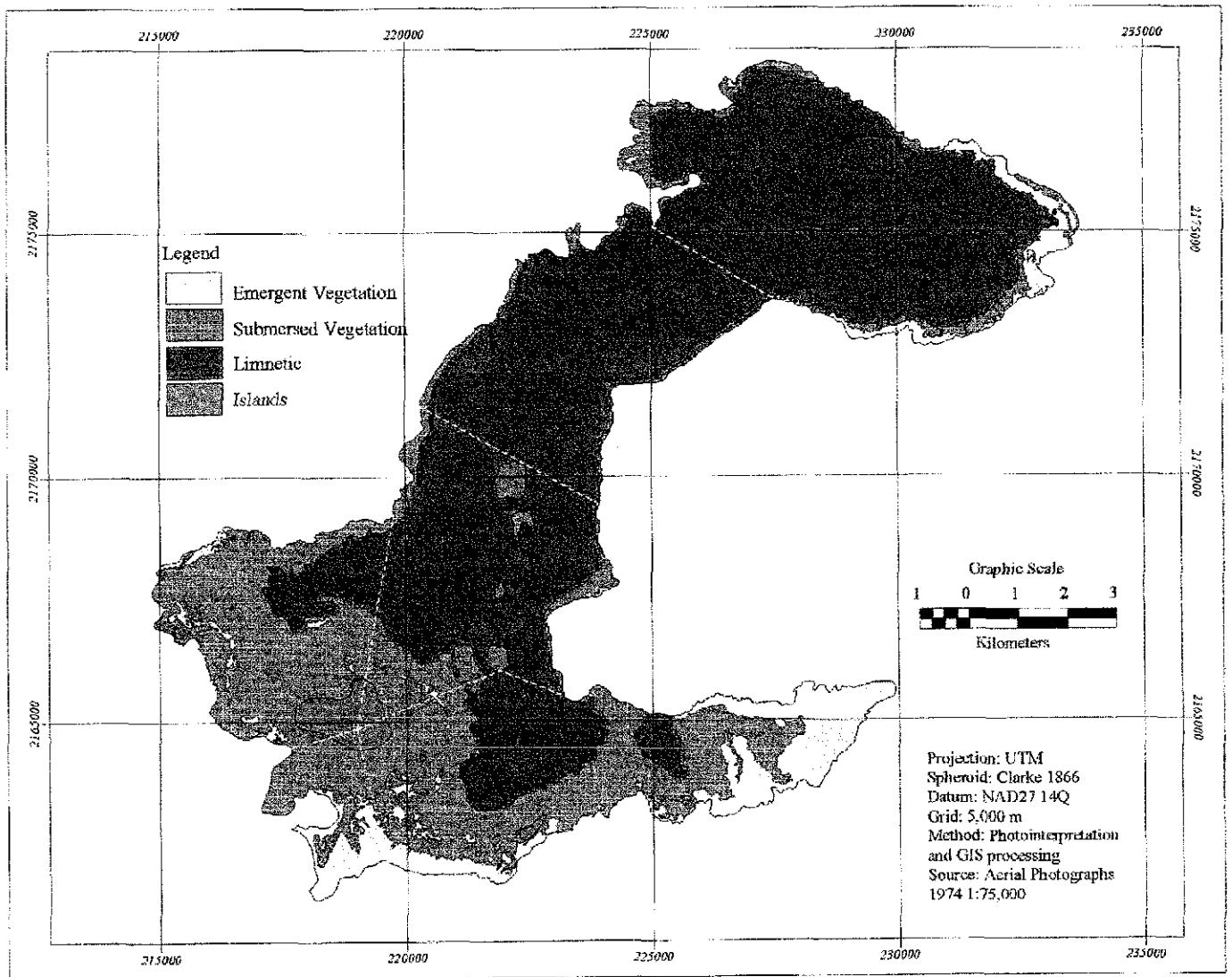


Figure 4. Output 2: photomosaic 1 (P_1), including six sectors considered in the present research and photointerpretation based on aerial photographs.

List of tables

Table 1. Area estimation for three outputs (TM-GIS, P₁ and P₂) including A= aquatic surface; V = Vegetation; EV = Emergent vegetation; SV = submersed vegetation; L = lake; I = islands and S = sectors.

Outputs/	Sectors	A	V	EV	SV	L	I	Total
CM	1	27.70	4.45			32.15	0.00	32.15
	2	18.00	0.81			18.82	0.00	18.82
	3	17.22	1.75			18.97	1.22	20.18
	4	10.16	4.41			14.57	1.11	15.68
	5	0.85	3.41			4.26	0.14	4.40
	6	16.42	10.37			26.79	0.38	27.16
	Total		90.34	25.21			115.55	2.85
P1	1	27.78		3.24	1.28	32.31	0.00	32.31
	2	17.74		0.39	0.34	18.47	0.00	18.47
	3	14.43		0.23	3.02	17.68	1.07	18.75
	4	2.87		1.33	10.03	14.24	1.13	15.37
	5	0.00		1.47	2.58	4.05	0.17	4.22
	6	7.77		8.09	10.77	26.63	0.72	27.35
	Total		70.59		14.76	28.01	113.38	3.10
P2	1	28.42		1.31	3.31	33.04	0.00	33.04
	2	18.14		0.34	0.40	18.89	0.00	18.89
	3	14.75		3.09	0.24	18.08	1.10	19.18
	4	2.93		10.26	1.37	14.57	1.16	15.72
	5	0.00		2.63	0.00	2.63	1.68	4.31
	6	7.95		11.02	8.26	27.23	0.74	27.98
	Total		72.20		28.65	13.58	114.44	4.68

Table 2. Lake Patzcuaro: reported estimations of total area.

Author	Apparent source	Methodology	Result (km ²)
De Buen (1944)	topographic survey	grid enumeration analysis	111.00
Tellez & Motte (1976)	CM and aerial photographs (1974)	Photointerpretation	107.73
Herrera (1979)	CM	Planimetry	104.60
Velasco (1982)	CM	Planimetry	88.70
Chacon (1989)	CM	GIS	130.00
Present study	CM and aerial photographs (1974)	Photointerpretation-GIS	116.48

SPATIAL AND TEMPORAL HETEROGENEITY OF PHYSICAL AND CHEMICAL VARIABLES FOR AN ENDORHEIC, SHALLOW WATER BODY: LAKE PÁTZCUARO, MEXICO

Javier Alcocer and Fernando W. Bernal-Brooks

With Two Figures and One Table

¹Limnology Laboratory, Environmental Conservation and Improvement Project, UIICSE, ENEP Iztacala, UNAM, México; ²Estacion Limnologica de Pátzcuaro, Centro Regional de Investigacion Pesquera de Pátzcuaro, México.

Key words: environmental heterogeneity, endorheic, tropical lake, Michoacán, chlorophyll a, nutrients, tecto-volcanic, warm polymixis, circadiomixis

Abstract

Homogeneity of water quality in a shallow endorheic lake in Mexico, Lake Pátzcuaro, was studied through the analysis of 13 physical and chemical variables at 10 sampling stations monthly between January 1998 and January 1999. Principal components analysis associated most temporal and spatial variance with two variables: total residue and conductance. Spatial analysis discriminated between limnetic and littoral areas, and among shallow stations. Temporal analysis segregated four time intervals: cold/dry, warm/dry, rainy, and highest rainfall. Even though Lake Pátzcuaro is a continuous warm polymictic lake, our results show its environmental heterogeneity; the lake is a physical and chemical mosaic.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

Introduction

Limón et al. (1989) state that most research on tropical lakes concerns lakes of the equatorial region (0° to 15° N and S latitude). Between these lakes and the intensively investigated lakes of the temperate region is a circumglobal belt, typically arid, where few limnological studies have been conducted. Closed-lake basins typical of semi-arid zones are well represented in the Mesa Central of Mexico (Alcocer & Escobar 1996, Alcocer et al. 2000), but limnological studies on these shallow lakes have been poorly developed outside Lake Chapala (Limón et al. 1989, Lind et al. 1992) and Lake Pátzcuaro (references cited below). Pátzcuaro is the first lake in Middle America to have been studied comprehensively (Deevey 1957). Bernal-Brooks et al. (2001), however, have questioned our knowledge of Lake Pátzcuaro, especially since the water budget of the lake never has been well resolved.

Barbour (1973) considered the lakes of the Mexican Mesa Central to be homogeneous water masses because of their low relative depths. Given that the coexistence of several atherinid fish species in some of these lakes required explanation, Barbour concluded that each species feeds upon items of different size, thus avoiding competitive exclusion in a common habitat. There has, however, been no test for possible segregation of populations based on heterogeneity of the aquatic environment conditions. Past studies of physical and chemical variables for this lake suggest homogeneity, as data have been reported in synoptic tables without much consideration of variability (Herrera 1979, Chacon 1989, 1992, 1993a, 1993b).

De Buen (1940), Rosas (1976), and Lara (1980) have argued that Lake Pátzcuaro is an environmental mosaic. If so, habitat preferences may explain differential distributions of fish species. Tellez & Motte (1980), in turn, defined two zones in the lake: the northern limnetic zone and southern littoral zone.

The present study gives a new analysis of physical and chemical variables according to a sampling plan that allows the heterogeneity in Lake Patzcuaro to be quantified.

Study Area

Lake Pátzcuaro ($A = 116.5 \text{ km}^2$, $l = 18.0 \text{ km}$, $b = 8.4 \text{ km}$) lies within an endorheic basin (934 km^2) located between $19^\circ32'$ - $19^\circ42'$ N and $101^\circ32'$ - $101^\circ42'$ W at 2035 m above sea level (Fig. 1). Intense volcanic and tectonic activity during the Tertiary and Quaternary (Demant 1975) converted a tributary of the Lerma River into the closed basin of Lake Pátzcuaro (De Buen 1944, Barbour 1973). Ichthyologists inferred ancient connections between water bodies in the region (De Buen 1943, Álvarez 1972), but these connections are still uncertain (Bernal-Brooks 1998). The lake, along with some others in the region (Bernal-Brooks & MacCrimmon 2000), is climatically sensitive in that the difference in volume between precipitation and evaporation govern water levels (Bernal-Brooks et al. 2001) and surface area (Gómez-Tagle Chávez et al. 2001) of this shallow lake ($z_{\text{max}} = 9.4 \text{ m}$, $\bar{z} = 3 \text{ m}$). Water-level fluctuations are substantial, both on seasonal ($\cong 1 \text{ m}$) and decadal ($\cong 6 \text{ m}$) time scales.

Mean depth of Lake Pátzcuaro decreases from the north (6 m) to an

intermediate zone around the islands located in the center (2 m), and then to the southern basin (1.5 m). The limnetic zone at the north is deepest ($z > 4$ m) and has a narrow littoral zone with macrophytes. A large littoral zone ($z < 3$ m) located mostly in the southern basin supports most conspicuous development of macrophytes, including species that are rooted submersed, rooted with floating leaves, rooted emergent, and free-floating (Lot & Novelo 1988).

On the basis of latitude and water temperature, Pátzcuaro is distinctly tropical (De Buen 1941, 1944, Osorio-Tafall 1941, 1944). However, an altitude correction (according to Lewis 1983) relocates the geographical position into the subtropical area (by 26° N). Actually, Lake Pátzcuaro and temperate lakes of North America show a close biotic similarity (Osorio-Tafall 1944, Hutchinson et al. 1956).

Methods

Field collections at 10 sampling stations (Fig. 1) were carried out monthly from station 1 to 10 between 0900 and 1500 approximately, during January 1998 and January 1999. Water samples (6.5 L) were obtained at 1 m depth with a Van Dorn bottle; Secchi disc transparency, temperature, and depth also were measured. Temperature gains when travelling from in-lake stations 1 to 7 were maintained at a minimum by means of sampling operations accomplished in about two hours (10:00 to 12:00).

After samples were transported in cool, dark containers to the Limnological Station at Pátzcuaro, the analysis of physical and chemical

variables proceeded mostly on the basis of Standard Methods (APHA 1989), including dissolved oxygen, pH, alkalinity, hardness, calcium, suspended solids, total residue dried at 105°C, conductance (K_{25}), nitrite nitrogen, and nitrate nitrogen. Alternative methods were used for chlorophyll a (Holm-Hansen & Riemman 1978), ammonia (Solórzano 1969), and soluble reactive phosphorus and total phosphorus (Murphy & Riley 1962).

Except for pH, the data for all variables were transformed ($\ln+1$) to improve normality prior to principal components analysis (PCA, Gauch 1984). Z_{SD} were not considered in the latter process because of an inconsistent weight of variables involved: a) Turbidity at limnetic stations depends on a mixture of biotic and abiotic elements (i.e., phytoplankton and suspended clay), while at the littoral counterpart predominates a sediment content set up in motion by wind-driven currents; Z_{SD} fail in this case as a general indicator of trophic status. b) Z_{SD} at stations 8, 9 and 10 was limited by the stations' shallowness and not by biotic elements (i.e., the disc could be clearly seen lying on the bottom); once more, Z_{SD} readings are not informative of trophic status.

PCA allowed the identification of variables explaining the greatest amount of spatial and temporal variance. Cluster analysis was used in joining similar stations and similar months.

Results

PCA showed that total residue, conductance, alkalinity, and hardness explain most of the variance associated with the monthly data sets, either spatially or

temporally. Total residue was most important for spatial variance, while conductance was most important for temporal variance (Table 1). Cluster analysis for total residue (Fig. 2) grouped stations into three areas: A (stations 1-3), the limnetic zone; B (stations 4-5), open waters at the southern part of the lake; and C (stations 6-7), at the southeastern littoral. Cluster analysis for conductance (Fig. 3) resolved four time intervals: (I) cold/dry (January - March 1998), (II) warm/dry (April - July 1998), (III) rainy (August, October 1998 - January 1999), and (IV) highest rainfall (September 1998). Mean values for each variable were obtained for specific areas and stages, as shown in Table 2. Three stations (8-10) near the lake shore isolated each one from the other stations.

Transparency decreased from the limnetic (0.36 to 0.43 m) to the littoral area (0.13 to 0.35 m), with the exception of the highest rainfall stage, when the lake water reached its highest transparency (0.37 to 0.52 m). All parts of the lake registered their lowest temperatures during the cold/dry period (15.8 to 17.2°C), followed by an increase at the onset of warm/dry conditions (22.0 to 23.1°C). A general decrease in temperature occurred during the rainy season (19.4 to 19.6°C), except for a second maximum coinciding with the highest amount of rainfall (21.8 to 23.0°C). In every area, conductance rose from the cold/dry (766 to 908 $\mu\text{S cm}^{-1}$) to the warm/dry stages (832 to 963 $\mu\text{S cm}^{-1}$) and thereafter decreased during the rainy (405 to 917 $\mu\text{S cm}^{-1}$) and highest rainfall stages (263 to 911 $\mu\text{S cm}^{-1}$). The limnetic area maintained fairly stable suspended solids content at about 30 mg l^{-1} ; the open waters at the southern area (33 to 67 mg l^{-1}) and the southeastern littoral (64 to 243 mg l^{-1}) had higher concentrations. The

highest suspended solids amounts occurred in the cold/dry and warm/dry stages (50 to 243 mg l⁻¹); the rainy and highest rainfall stages showed lower values, especially at the southeastern littoral area (107 and 64 mg l⁻¹).

An increase in total residue occurred between the cold/dry (652 to 703 mg l⁻¹) and the warm/dry stages (746 to 822 mg l⁻¹). Thereafter, a reversion to lower values appeared in the rainy (405 to 703 mg l⁻¹) and highest rainfall stages (263 to 711 mg l⁻¹); the minimum occurred at the southeastern littoral in the stage of highest rainfall.

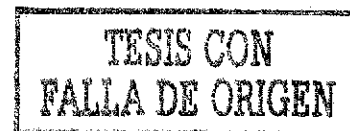
The water column in all areas and across all stages was well oxygenated (mean values around 100 per cent of saturation). The lowest mean values were detected during the highest rainfall stage (80 percent of saturation). The limnetic area and the southern part of the lake mostly maintained a pH of 8.9 during the study. Lower values were associated with the southeastern littoral, especially during the rainy and highest rainfall stages (8.1 to 8.2). The limnetic area reached the highest alkalinity at the cold/dry (12.1 meq l⁻¹) and warm/dry stages (11.3 meq l⁻¹). Simultaneously, a gradation to lower alkalinity occurred from the limnetic to the southeastern littoral (9.4 and 8.6 meq l⁻¹ respectively). In comparison, lower values were characteristic of the highest rainfall stage (2.8 to 10.8 meq l⁻¹); the minimum was found at the southeastern littoral. During all stages, the limnetic area, the open waters at the southern part of the lake, and the southeastern littoral displayed a spatial gradation of calcium concentrations (13 to 16 mg l⁻¹, 17 to 19 mg l⁻¹, 22 to 24 mg l⁻¹, respectively). The limnetic area maintained fairly stable hardness values across stages (199 to 214 mg l⁻¹). In

other areas, the highest values were registered during the cold/dry and warm/dry stages (196 to 212 mg l⁻¹), and the lowest ones during the rainy (152 to 186 mg l⁻¹) and highest rainfall stages (120 to 162 mg l⁻¹); the minimum was for the extensive littoral area, at the highest rainfall stage.

Maximum concentrations of chlorophyll a occurred at the southeastern littoral and the stations near lake shore (i.e., stations 8 and 9), especially during the warm/dry stage (59 to 103 µg l⁻¹). The limnetic areas and the open waters at the southern part of the lake exhibited chlorophyll a concentrations \leq 20 µg l⁻¹, with the exception of the latter at the highest rainfall stage (46 µg l⁻¹).

In general, mean total inorganic nitrogen increased from the cold/dry stage (143 to 245 µg l⁻¹) to the warm/dry stage (184 to 1155 µg l⁻¹), and even more at the open waters at the southern part of the lake during the rainy (329 µg l⁻¹) and highest rainfall stages (426 µg l⁻¹). After reaching a peak value in the extensive littoral area throughout the rainy stage (1915 µg l⁻¹), it fell during the highest rainfall stage (374 µg l⁻¹).

In all stages, mean soluble reactive phosphorus increased from the limnetic area (5 to 10 µg l⁻¹), to the open waters at the southern part of the lake (8 to 19 µg l⁻¹), and the southeastern littoral (11 to 34 µg l⁻¹). These areas also showed a spatial gradation of mean total phosphorus (60 to 81 µg l⁻¹; 85 to 118 µg l⁻¹; and 153 to 324 µg l⁻¹ respectively).



Discussion

How homogeneous are lakes? The answer to this question is of great importance to limnologists, who often seem to assume homogeneity of limnological conditions within a given lake (Lind 1984). For shallow tropical lakes, the assumption of continuously well-mixed water columns (implicit in Barbour 1973) or stable aquatic ecosystem dynamics in view of an "endless summer" (Kilham & Kilham 1990, Hecky 2000) suggests a habitat that is homogeneous spatially and temporally. Such a viewpoint may prejudice a sampling program or its final interpretation.

In the case of Lake Pátzcuaro, the whole water column mixes every day. The well-oxygenated water column from top to bottom is further evidence of frequent mixing. Lewis (1983) classified such lakes as continuous warm polymictic. Recently, a new typology provided by Reynolds (1997) recognizes, in the term "circadiomictic," a temporary thermal stratification during morning hours and mixing in the afternoon.

African waters (Melack 1979) underwent day-to-day and diel variations in water temperatures only slightly less than seasonal variations (2.2 to 3.2°C). In contrast, our study case of Pátzcuaro registered annual temperature differences of some 10°C, a significant seasonal component. Time schedule for sampling (0900 and 1500) became unimportant as temperature adjustments went on with daily mixing. In addition, no significant differences of temperature were detected among stations according to an analysis of variance. Other variables surpassed the potential of water temperature to discriminate spatial and temporal patterns,

as further mentioned.

Talling & Talling (1965) used principal components analysis for the study of physical and chemical variables among African waters, and Margalef (1983) did the same for Spanish waters. Both found that alkalinity and conductance were key variables in explaining regional differences. The same procedure applied here for Lake Pátzcuaro led us to discern both, spatial and temporal differences, with total residue, conductivity, hardness, and alkalinity as the variables explaining the most variance. Water temperature remained unimportant to detect seasonal differences, which suggest that the variables mentioned before rather integrate the effects of climatic conditions undergone into the lake waters.

Spatially, the limnetic area and the open waters at the southern part of Lake Pátzcuaro tended to be more stable, i.e., it showed the lowest coefficients of variation (cv) for most variables under study (Table 2, areas A and B). The southeastern littoral exhibited the opposite tendency (Table 2, area C), as well as stations 8 and 9. An intermediate situation occurred at the southern lake open waters (Area B) which despite a close similarity to the limnetic water body (area A), formed a different cluster. Thus, the present study share the view of Tellez & Motte (1980) of a distinctive limnetic zone in the northern area, which has the most stable physical and chemical characteristics, and a more variable southern counterpart with remarkable differences within. Our study, however, enhance the spatial and temporal analysis and resolution, as the latter authors relied on a single day sampling (i.e., may 10-18, 1976.).

In regard to station 8, which lies at the opening of a channel connected to the lake, it resembles a different water body. Station 9, located at the southwestern part of the lake beside the Island of Jarácuaro, reached an outstandingly high conductance and ionic content (i.e. alkalinity, hardness). In contrast, the lowest values were registered for Chapultepec (station 10), where clean spring water emerge some 8 km away from the lake.

Cluster analysis for conductance revealed temporal differences coincident with the seasonal cycles of evaporation and precipitation, as reflected in the concentration and dilution of dissolved solids. The warm/dry stage causes the onset of concentration, which in 1998 abnormally extended until July probably associated to the 1997-1998 El Niño Southern Oscillation as seem to be the case for Lakes Chapala (Tereshchenko et al. 2002) and Alchichica (Alcocer & Lugo 2002), both in Central Mexico. The stages of rain and higher rainfall cause dilution.

When evaporation was predominant (cold/dry and warm/dry stages), there was higher mean conductance (766 to 963 $\mu\text{S cm}^{-1}$), mean alkalinity (8.6 - 12.1 meq l^{-1}), mean hardness (196 - 214 mg l^{-1}), and mean temperature (15.8 – 23.1°C), but lower transparency (0.13 to 0.43 m). In contrast, during the rainy season, lower mean values of conductance (263 to 917 $\mu\text{S cm}^{-1}$), alkalinity (2.8 - 10.8 meq l^{-1}) and hardness (120 - 207 mg l^{-1}) were registered along with an abatement of temperature (19.4°C to 19.6 °C) and the highest transparency reached (0.35 to 0.52 m).

Sediment resuspension was the main influence on transparency, although

phytoplankton affected transparency in certain areas and for certain stages. The absence of rain coupled with strong winds (dry season) led to sediment resuspension within the extensive littoral area. Especially in this area, the introduction of rainwater led to an increase in transparency to as much as 0.82 m in a 1-m water column (station 6). Transparency simultaneously increased in other areas, although to a smaller degree. The southern part of the lake, which is isolated (station 3), had low transparency (0.37 m) associated to an unusually high concentration of chlorophyll *a* during the stage of highest rainfall ($46 \mu\text{g l}^{-1}$).

Chlorophyll *a* concentrations increased from area A ($7\text{-}20 \mu\text{g l}^{-1}$) to B ($11\text{-}46 \mu\text{g l}^{-1}$) to C ($30\text{-}59 \mu\text{g l}^{-1}$). The same trend was fairly observed for total inorganic nitrogen (A = $143\text{-}269 \mu\text{g l}^{-1}$, B = $139\text{-}426 \mu\text{g l}^{-1}$, C = $245\text{-}1915 \mu\text{g l}^{-1}$), soluble reactive phosphorus (A = $5\text{-}10 \mu\text{g l}^{-1}$, B = $8\text{-}19 \mu\text{g l}^{-1}$, C = $11\text{-}34 \mu\text{g l}^{-1}$) and total phosphorus (A = $60\text{-}81 \mu\text{g l}^{-1}$, B = $85\text{-}118 \mu\text{g l}^{-1}$, C = $153\text{-}324 \mu\text{g l}^{-1}$). The latter suggest a relationship between chlorophyll *a* and nutrient concentrations. There is a general agreement between our physical and chemical zones (A, B, C) and chlorophyll *a* and nutrient concentrations (i.e., lowest in the limnetic zone A to highest in the littoral zone C; zone B had values between zones A and C). A general increasing trend in chlorophyll *a* and nutrient concentrations seems to be clear from zone A to zone C.

It should be noted that the highest chlorophyll *a* values occurred at marginal stations (7 and 9) associated to municipal wastewater effluents from the towns of Erongarícuaro and Pátzcuaro. A similar behavior occurs in Lake Okeechobee, in Florida (Phlips et al. 1993) where the highest chlorophyll *a*

concentrations were close to point contamination sites.

An algal bioassays study with Lake Pátzcuaro waters (Bernal-Brooks et al. in revision) registered the highest algal growth potentials (AGP's) for those shoreline sites related to anthropogenic nutrient surplus conditions. The limnetic and open waters at the southern part of the lake matched the same pattern (i.e., low AGP's in the dry season and high AGP's in the rainy season) observed for other 30 water bodies of the Mesa Central in Mexico (Hernández et al., in press).

Other tropical and subtropical large, shallow (warm polymictic) lakes seem to display analogous spatial and temporal heterogeneity. Lake Chapala (altitude= 1524 m; mean depth= 4.5 m; area= 1039 km²) in Jalisco, Mexico, Lake Okeechobee in Florida, USA (mean depth= 2.7 m; area= 1730 m) and Lake Naivasha (altitude= 1888 m; mean depth= 4.6 m; area= 115 km²) in Kenya, Africa show spatial and temporal heterogeneity similarly to Lake Pátzcuaro. Chapala shows a significant, although irregular spatial variation of water quality across its 77 km in length. The importance of rainfall became evident with a general increase in transparency due to dilution (Limón et al. 1989). Okeechobee display spatial heterogeneity identified in four ecological zones: the center of the lake, the shallow littoral and two areas associated to nutrient-loaded inflows. In this lake, temporal changes in chlorophyll-a, total P, total N and mean light flux in the water column involve specific patterns for each zone (Phlips et al. 1993). Naivasha manifests spatial and temporal heterogeneity associated to the littoral zones. From a temporal point of view, the rainy season is coupled with an increase in nutrients and chlorophyll a concentration (Melack 1976). Concluding,

the three large, shallow lakes exhibit horizontal heterogeneity mostly associated with open and littoral waters. There is also a clear temporal association with the rainy and dry seasons.

Webster et al. (2000) examined chemical responses to drought for lakes that are surface water- and groundwater-dominated. Our data corroborate their view that in surface water-dominated lakes, solute concentrations generally are a simple function of precipitation. Conservative solutes tend to be more synchronous and were negatively related to precipitation. Other solutes such as silica, total phosphorus, and chlorophyll a, are less synchronous and influenced by in-lake processes.

From a biological point of view, we could infer a relationship between the different zones within Lake Pátzcuaro and the aquatic biota. Although further studies on fish distributions are still required for our study case, there seems to be a differential distribution of fish species. De Buen (1940), Rosas (1976) and Lara (1980) mentioned this fact on an empirical basis. Fish species more frequently found at the deeper limnetic zone (area A) are the “pescado blanco” *Chirostoma estor*, the white charal, *Chirostoma grandocule* and also the amphibian *Ambystoma dumerilii*. The southern part of the lake (areas B and C) includes a macrophytic development suitable for the largemouth blackbass *Micropterus salmoides* and the “charal prieto” *Chirostoma attenuatum*. Besides, livebearers of the Goodeid family are found everywhere in the lake, especially the most abundant species *Goodea luitpoldi*. A habitat contrast remain also implicit but not clearly established in the government fishery records

(unpublished data).

As mentioned above, our preliminary information about the differential fish species distribution in Pátzcuaro suggests the existence of an environmental mosaic of habitats rather than homogeneous lake conditions. The fish species distribution bears resemblance with our physical and chemical scheme of Lake Pátzcuaro.

Finally, the present study supports the view of Lake Pátzcuaro as a spatially and temporally heterogeneous water body, in spite of its daily mixing pattern.

References

- ALCOCER, J. & ESCOBAR, E. (1996): Limnological regionalization of Mexico. *Lakes & Reservoirs: Research and Management* **2**: 55-69.
- ALCOCER, J., ESCOBAR, E. & MARÍN, L.E. (2000): Epicontinental aquatic systems of Mexico in the context of hydrology, climate, geography and geology. pp. 1-13. In: Munawar, M., Lawrence, S.G., Munawar, I.F. & Malley, D.F. (eds). *Aquatic Ecosystems of Mexico: Status and Scope*. Backhuys, The Netherlands.
- ALCOCER, J. & LUGO, A. (2002): Is the limnological dynamics of tropical Lake Alchichica affected by El Nino Southern Oscillation?. *Geofísica Internacional*. Accepted for publication.
- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (1989): *Standard Methods for the analysis of water and wastewater*. American Public Health Association, Washington, D.C. 1268pp.
- ALVAREZ, J. (1972): Ictiología Michoacana. V. Origen y distribución de ictiofauna dulceacuícola de Michoacán. *An. Esc. Nac. Cienc. Biól. (Méx.)* **19**: 155-161
- BARBOUR, C.D. (1973): A biogeographic history of *Chirostoma* (Pisces: Atherinidae): a species flock from the Mexican Plateau. *COPEIA* **3**: 533-556.
- BERNAL-BROOKS, F.W. (1998): The lakes of Michoacan: a brief history and alternative point of view. *Freshwater Forum* **10**: 20-34
- BERNAL-BROOKS, F.W., GÓMEZ-TAGLE ROJAS, A. & ALCOCER, J. (2001). Lake Pátzcuaro (Mexico): a controversy about the ecosystem water regime approached by field references, climatic variables and GIS. *Hydrobiologia*.

BERNAL-BROOKS, F.W., DAVALOS-LIND, L. & LIND, O.T. (in revision): Lake Pátzcuaro (Mexico): temporal and spatial variations in AGP's and limiting nutrients. *Lakes and Reservoirs: Research & Management*.

BERNAL-BROOKS, F.W. & MACCRIMMON, H.R. (2000): Lake Zirahuen (México): an assessment of the morphometry change based on evidence of water level fluctuations and sediment inputs. pp. 61-76. In M. Munawar, S. Lawrence, I. Munawar and D. Malley (eds) *Aquatic Ecosystems of México: Status and Scope*. Backhuys Publishers, The Netherlands.

CHACON, T. A. (1989): A limnological study of Lake Pátzcuaro, México, with a consideration of the applicability of remote sensing techniques. PhD thesis, Univ. Stirling, Scotland. 340pp.

CHACON, T. A. (1992): El Ecosistema Lacustre. In: V.M. Toledo, P. Álvarez-Icaza & P. Ávila (eds) *Pátzcuaro 2000*. Fundacion Friedrich Ebert Stiftung, México, D.F. pp. 37-70.

CHACON, T. A. (1993a): El Lago de Pátzcuaro, Michoacán, México. Bosquejo de un Lago Amenazado. Ed. Universitaria. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia. 144p.

CHACON, T. A. (1993b): Lake Pátzcuaro, México: Watershed and water quality deterioration in a tropical high-altitude Latin American Lake. *Lake and Reservoir Management* **8**: 37-47.

DE BUEN, F. (1940): Huevos, crías, larvas y jóvenes de *Chirostoma* en el lago de Pátzcuaro. *Invest. Est. Limnol. Pátzcuaro (México)*. 14p.

DE BUEN, F. (1941): Las variaciones físicas y químicas de las aguas del lago de Pátzcuaro (St. X) desde Octubre de 1939 a marzo de 1941. Invest. Est. Limnol. Pátzcuaro (México) **7**: 1-25.

DE BUEN, F. (1943): Los lagos Michoacanos. I. Caracteres Generales. El Lago de Zirahuén. Rev. Soc. Mex. Hist. Nat. **5**: 99-125

DE BUEN, F. (1944): Los lagos Michoacanos. II. El lago de Pátzcuaro. Rev. Soc. Mex. Hist. Nat. **5**: 99-125.

DEEVEY, E.S. (1957): Limnological studies in Middle America with a chapter on Aztec limnology. Trans. Conn. Acad. Arts Sci. **39**: 213-328.

DEMANT, A. (1975): Les quatre provinces volcaniques du Mexique, relations avec l'evolution geodynamique, depuis le Cretace, II. Les deux provinces occidentales. C.R. Acad. Sc. **280**: 1437-1440.

GAUCH, H.G. (1984): Multivariate analysis in community ecology. Cambridge University Press.

GÓMEZ-TAGLE, A., F.W. BERNAL-BROOKS & ALCOCER, J. (2001): Sensitivity of Mexican water bodies to regional climatic change: three study alternatives applied to remote sensed data of Lake Patzcuaro. Hydrobiologia.

HECKY, R.E. (2000): A biogeochemical comparison of Lake Superior and Malawi and the limnological consequences of an endless summer. Aquat. Ecosyst. Health Manage. **3**: 23-33.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

- HERNANDEZ, S., BERNAL, F., VELARDE, G., ORTIZ, D., LIND, O. & DÁVALOS-LIND, L. (in press): The algal growth potential and limiting nutrient of 30 lakes and reservoirs of the Mesa Central of México. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* **27**
- HERRERA, E. (1979): Características y manejo del Lago de Pátzcuaro, Michoacán. BSc thesis, UNAM, México.
- HOLM-HANSEN, O. & RIEMMAN, B. (1978): Chlorophyll-a determination: improvements in methodology. *OIKOS* **30**: 438-447
- HUTCHINSON, G. E., PATRICK, R. & DEEVEY, E.S. (1956): Sediments of Lake Pátzcuaro, Michoacán, México. *Bull. Geol. Soc. Am.* **67**: 1491-1504
- KILHAM, P. & KILHAM, S.S. (1990): Endless Summer; internal loading processes dominate nutrient cycling in tropical lakes. *Freshwat. Biol.* **23**: 379-389
- LARA, A. (1980): Introducción de nuevas especies al lago de Pátzcuaro y su posible perjuicio a las especies nativas. *Proceedings of the 2nd Latinamerican Symposium of Aquaculture.* pp. 489-524
- LEWIS, W.M. (1983): A revised classification of lakes based on mixing. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* **40**: 1779-1787
- LIMON, J. G., LIND, O.T., VODOPICH, D.S., DOYLE, R. & TROTTER, B.G. (1989): Long- and short-term variation in the physical and chemical limnology of a large, shallow, turbid tropical lake (Lake Chapala, Mexico). *Arch. Hydrobiol./Supl.* **83**: 57-81

- LIND, O. (1984): Patterns of phytoplankton populations and their relationship to trophic state in an elongate reservoir. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* **22**: 1465-1469
- LIND, O., DOYLE, R., VODOPICH, D., TROTTER, B., LIMÓN, J. & DÁVALOS
- LIND, L. (1992): Clay turbidity: Governing of phytoplankton production in a large, nutrient-rich tropical lake (Lago de Chapala, México). *Limnol. Oceanogr.* **37**: 549-565.
- LOT, A. & NOVELO, A. (1988): Vegetación y flora acuática del Lago de Pátzcuaro, Michoacán, México. *Southwest. Nat.* **33**: 167-175.
- MARGALEF, R. (1983): *Limnología*. Omega, Madrid, 1010 pp.
- MELACK, J. (1976): *Limnology and dynamics of phytoplankton in equatorial African lakes*. PhD thesis. Duke University, Durham, N.C.
- MELACK, J. (1979): Photosynthetic rates in four tropical African fresh waters. *Freshwat. Biol.* **9**: 555-571.
- MURPHY, J. & RILEY, J.P. (1962): A modified single solution method for determination of phosphate in natural water. *Anal. Chem. Acta* **27**: 31-37
- OSORIO-TAFALL, B.F. (1941): Materiales para el estudio del microplancton del lago de Pátzcuaro (México). *An. Esc. Nac. Cienc. Biol. (Mex.)* **2**: 331-382.
- OSORIO-TAFALL, B.F. (1944): Biodinámica del Lago de Pátzcuaro I. Ensayo de interpretación de sus relaciones tróficas. *Rev. Soc. Mex. Hist. Nat.* **5**: 197-227.

- PHILIPS, E.J., ALDRIDGE, F.J., HANSEN, P., ZIMBA, P.V., IHNAT, J., CONROY, M. & RITTER, P. (1993): Spatial and temporal variability of trophic state parameters in a shallow subtropical lake (Lake Okeechobee, Florida, USA). *Arch. Hydrobiol.* **128**: 437-458
- REYNOLDS, C.S. (1997): *Vegetation processes in the pelagic: a model for ecosystem theory*. Ecology Institute, Oldendorf/Luhe, 371 pp.
- ROSAS, M. (1976): Datos biológicos de la ictiofauna del lago de Pátzcuaro, con especial énfasis en la alimentación de sus especies. *Symposium of Inland Fisheries (México)*. 299-366.
- SOLORZANO, L. (1969): Determination of ammonia in natural waters by the phenylhypochlorite method. *Limnol. Oceanogr.* **14**: 799-801
- TALLING, J.F. & TALLING, L.B. (1965): The chemical composition of African lake waters. *Int. Revue. Ges. Hydrobiol.* **50**: 421-463.
- TELLEZ, C. & MOTTE, O. (1980): Estudio planctonológico preliminar del lago de Pátzcuaro, Mich., México. Mayo de 1976. 2nd Latinamerican Symposium of Aquaculture. 1799-1836
- TERESHCHENKO, I. E., FILONOV, A. E., MONZÓN, C. O. & FIGUEROA, A. (2002): Manifestation of El Niño signal in West México.. *Geofísica Internacional*..Accepted for publication.
- WEBSTER, K.E., SORANNO, P.A., BAINES, S.B., KRATZ, T.K., BOWSER, C.J., DILLON, P.J., CAMPBELL, P.L., FEE, E.J. & HECKY, R.E. (2000): Structuring features of lake districts: landscape controls of lake chemical responses to drought. *Freshwat. Biol.* **43**: 499-515.

Acknowledgements

We thank F. Sosa-Lima and P. Carrillo-Orea for their assistance at the field and laboratory. The support provided by the Director of the Centro Regional de Investigación Pesquera (CRIP Pátzcuaro), A. Orbe-Mendoza and the Instituto Nacional de la Pesca (INP) is gratefully acknowledged. Financial support was partially given by CONACyT project 3626P-B9608. The authors express a special recognition to Prof. William M. Lewis, Jr. (University of Colorado Center for Limnology) for helpful suggestions and comments that greatly improved this manuscript.

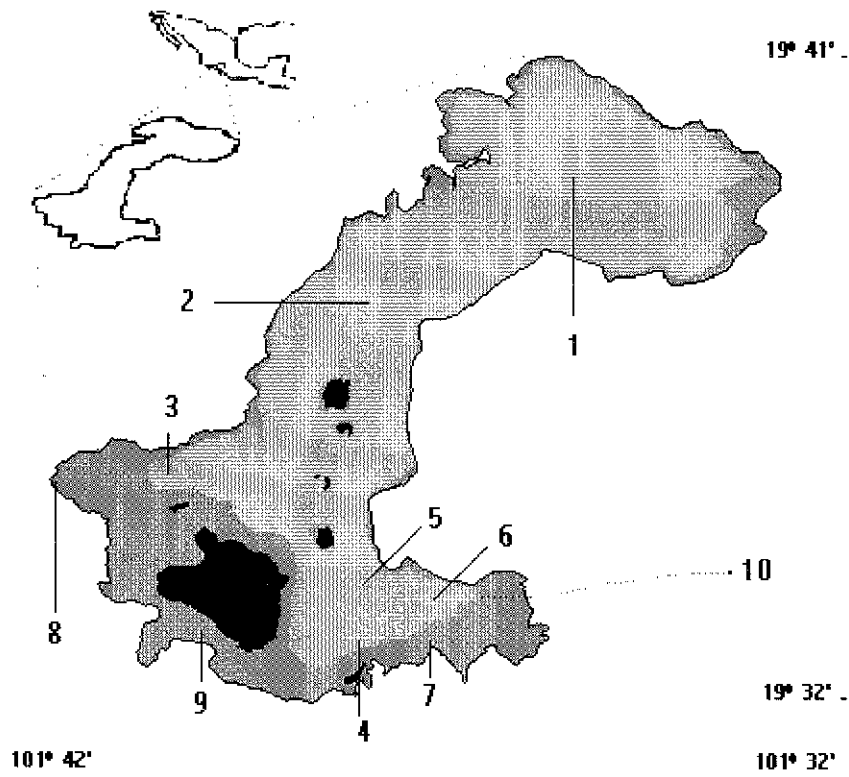
Authors' addresses:

JAVIER ALCO CER, Limnology Lab., Environmental Conservation and Improvement Project, UIICSE. FES Iztacala, UNAM. Av. de los Barrios s/n, Los Reyes Iztacala, 54090 Tlalnepantla, Edo. de Mexico. Mexico. E-mail: <jalcocer@servidor.unam.mx>

FERNANDO W. BERNAL-BROOKS, Estacion Limnológica de Pátzcuaro, Centro Regional de Investigación Pesquera de Pátzcuaro. Calzada Ibarra 28, Colonia Ibarra, Pátzcuaro, Michoacán, México. 61609. E-mail: <bbrooks@jupiter.ccu.umich.mx>

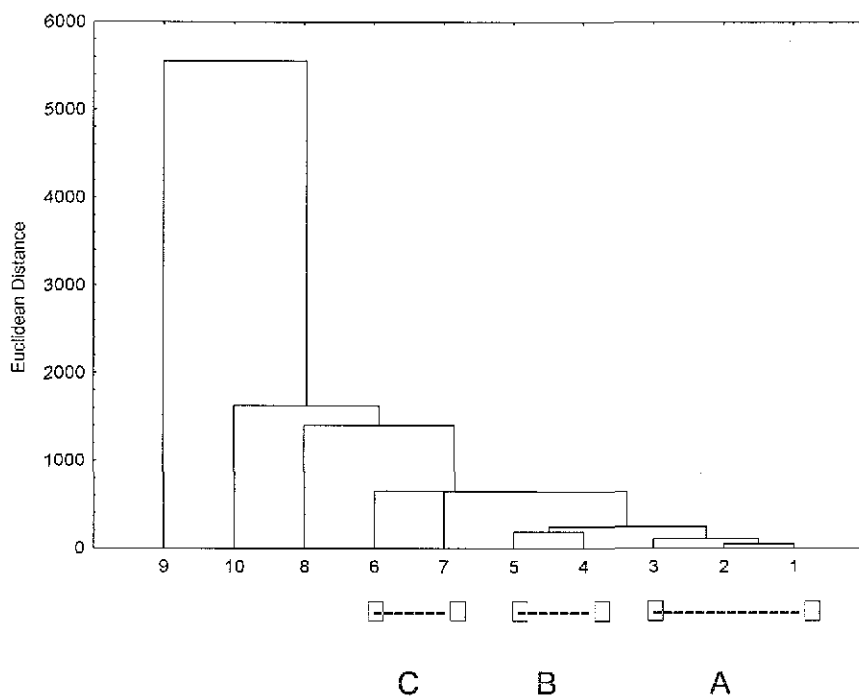
List of Figures

Figure 1. Lake Pátzcuaro: location of the lake and sampling stations: limnetic stations (1=Quiroga, 2=Espíritu, 3=Napízaro, 4=Uranden, 5=StationX, 6=Ihuatzio), lake shore stations (7=Embarcadero, 8=Erongarícuaro, 9=Jarácuaro) and the spring at Chapultepec (10=Chapultepec spring). Marshland is shown in deep gray, islands in black, and offshore waters in light gray.



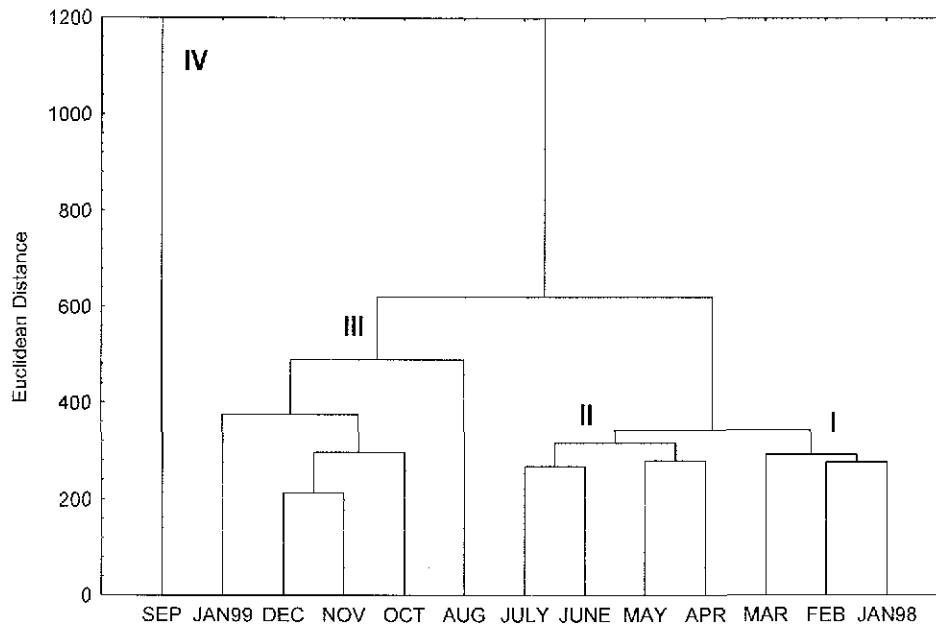
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figure 2. Spatial similarities between the 10 sampling stations; the three areas identified on the basis of total solids as key variable are shown: A (stations 1-3), B (stations 4-5), and C (stations 6-7).



FALLA DE ORIGEN

Figure 3. Temporal similarities between 13 months with four stages identified on the basis of conductance as key variable: I (January – March 1998), II (April-July 1998); III (August 1998 - January 1999) and IV (September '98).

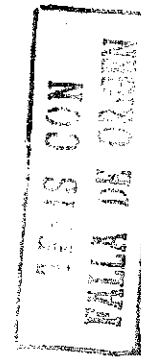


List of tables

Variable	Month												
	Jan 98	Feb 98	Mar 98	Apr 98	May 98	Jun 98	Jul 98	Aug 98	Sep 98	Oct 98	Nov 98	Dec 98	Jan 99
Temperature	0.09	-0.07	0.92	0.32	-0.64	0.73	0.93	0.83	0.78	0.83	-0.68	-0.82	0.51
Dissolved Oxygen	-0.17	-0.44	0.19	-0.91	0.17	-0.15	0.43	0.48	0.73	0.25	-0.45	-0.32	0.38
pH	0.15	0.56	-0.80	-0.42	-0.78	0.70	0.76	0.43	0.12	0.67	-0.78	0.43	-0.92
Alkalinity	0.88	0.94	-0.73	0.79	-0.90	0.85	0.85	0.70	0.52	0.95	-0.95	0.99	-0.85
Hardness	0.96	0.96	-0.54	0.84	-0.91	0.90	0.81	0.80	0.61	0.98	-0.93	0.82	-0.80
Calcium	0.22	0.85	0.87	0.86	-0.81	0.74	0.47	0.68	0.71	0.36	-0.03	-0.55	-0.32
Chlorophyll a	0.76	0.80	0.93	0.93	-0.78	0.67	0.84	0.87	0.93	0.86	-0.42	-0.26	-0.74
Total residue	0.94	0.98	0.92	0.96	-0.97	0.96	0.33	0.84	0.61	0.97	-0.90	0.98	-0.17
Suspended Solids	0.87	0.85	-0.70	0.97	-0.89	0.81	0.80	0.60	0.57	0.51	0.17	-0.39	-0.78
Conductivity	0.87	0.94	0.06	0.79	-0.92	0.89	0.86	0.70	-0.47	0.96	-0.96	0.99	-0.86
TIN	0.55	0.69	0.21	0.81	-0.31	0.37	0.38	0.56	0.48	0.31	0.30	-0.25	0.12
SRP	-0.13	-0.57	0.77	0.30	0.29	-0.39	-0.26	0.23	0.45	0.01	0.57	0.38	0.57
TP	0.59	0.42	0.96	0.81	-0.70	0.63	0.66	0.73	0.83	0.50	0.30	0.18	0.11
Expl.Var	5.48	7.25	6.85	7.92	7.22	6.62	6.08	5.92	5.20	6.38	5.48	5.32	4.98
Prp.Totl	0.42	0.56	0.53	0.61	0.56	0.51	0.47	0.46	0.40	0.49	0.42	0.41	0.38

Table 1. PCA output for the first eigenvector of variables under study (bold numbers show the highest explained variance in each monthly set).

104



Station

Variable	Station 1	Station 2	Station 3	Station 4	Station 5	Station 6	Station 7	Station 8	Station 9	Station 10
Temperature	0.51	-0.64	0.41	0.06	-0.41	-0.23	-0.08	0.92	0.51	0.85
Dissolved Oxygen	0.91	-0.47	0.48	0.61	0.66	0.09	-0.42	0.86	0.53	0.87
PH	0.60	0.36	0.53	0.76	0.67	0.65	-0.91	0.52	0.52	0.51
Alkalinity	0.09	-0.24	0.40	0.83	0.82	0.97	-0.94	0.72	0.95	0.63
Hardness	0.28	-0.80	0.71	0.83	0.87	0.96	-0.87	0.73	0.81	-0.50
Calcium	-0.34	-0.39	-0.06	0.68	-0.55	0.04	0.27	0.13	0.71	-0.03
Chlorophyll a	0.55	-0.46	-0.14	0.11	-0.68	0.73	-0.73	0.87	0.81	0.53
Total residue	0.80	-0.91	0.91	0.93	0.76	0.98	-0.81	0.06	0.79	-0.39
Suspended Solids	-0.18	-0.21	0.62	0.92	0.32	0.81	-0.24	0.87	0.90	-0.70
Conductivity	0.83	-0.87	0.96	0.94	0.88	0.96	-0.94	-0.01	0.37	0.48
TIN	-0.13	0.41	-0.24	-0.62	-0.83	0.38	0.67	0.38	0.34	-0.61
SRP	-0.35	0.47	0.40	0.44	-0.24	0.06	0.29	-0.22	-0.05	-0.62
TP	0.40	-0.58	0.40	0.60	0.01	0.92	-0.76	0.88	0.92	0.13
Expl.Var	3.61	4.16	3.88	6.34	5.45	6.44	5.96	5.41	6.08	4.31
Prp.Totl	0.28	0.32	0.30	0.49	0.42	0.50	0.46	0.42	0.47	0.33

Table 1a. PCA output for the first eigenvector of variables under study (bold numbers show the highest explained variance in each monthly set).

Table 2. Mean values of physical and chemical variables under study, based on the three areas and the four stages (n=number of observations; cv=coefficient of variation) recognized from cluster analysis. (A = limnetic, B = open waters at the southern part of the lake, C = southeastern littoral; I = cold/dry, II = warm/dry, III = rainy, IV = highest rainfall)

Variable	Areas	Stage											
		n	I	cv	n	II	cv	n	III	cv	n	IV	cv
Secchi Disc transparency (m)	A	9	0.36	12	12	0.43	17	15	0.43	21	3	0.52	8
	B	6	0.29	16	8	0.27	13	10	0.37	11	2	0.37	11
	C	5	0.13	14	8	0.26	100	10	0.35	53	2	0.51	86
Temperature (°C)	A	9	15.8	7	12	22.0	7	15	19.5	11	3	21.8	3
	B	6	16.3	7	8	22.3	6	10	19.6	10	2	23.0	0
	C	6	17.2	10	8	23.1	4	10	19.4	9	2	22.5	6
Conductivity (µS cm ⁻¹ -25°C)	A	9	908	4	12	963	3	15	917	3	3	911	1
	B	6	837	8	8	942	2	10	755	9	2	645	2
	C	6	766	13	8	832	22	10	405	51	2	263	12
Suspended solids (mg l ⁻¹)	A	9	33	18	12	34	11	15	34	44	3	30	10
	B	6	50	32	8	67	9	10	33	28	2	50	15
	C	6	99	70	8	243	62	10	107	166	2	64	106
Total residue dried at 100°C (mg l ⁻¹)	A	9	688	3	12	746	3	15	703	6	3	711	3
	B	6	652	10	8	762	3	10	582	10	2	532	6
	C	6	703	16	8	822	17	10	405	49	2	263	19
Dissolved Oxygen (% saturation)	A	9	89	37	12	108	11	15	101	24	3	80	6
	B	6	110	3	8	99	17	10	99	22	2	80	2
	C	6	105	9	8	80	25	10	92	39	2	86	19
pH	A	9	8.9	1	12	8.9	1	15	8.9	1	3	8.9	1
	B	6	8.9	0	8	9.0	1	10	8.9	2	2	8.9	1
	C	6	8.8	0	8	8.8	2	10	8.2	10	2	8.1	12
Alkalinity (meq l ⁻¹)	A	9	12.1	13	12	11.3	5	15	10.1	7	3	10.8	3
	B	6	11.2	21	8	10.7	2	10	8.3	11	2	7.4	3
	C	6	9.4	18	8	8.6	26	10	4.3	50	2	2.8	18
Calcium (mg l ⁻¹)	A	9	16	16	12	16	13	15	15	16	3	13	7
	B	6	18	11	8	18	6	10	17	14	2	19	24
	C	6	24	31	8	22	19	10	23	20	2	23	24
Hardness (mg l ⁻¹)	A	9	206	4	12	214	5	15	207	6	3	199	5
	B	6	201	6	8	212	3	10	186	15	2	162	5
	C	6	199	11	8	196	6	10	152	21	2	120	9
Chlorophyll-a (µg l ⁻¹)	A	9	7	36	12	17	78	15	20	84	3	20	27
	B	6	11	39	8	17	26	10	14	36	2	46	57
	C	6	58	64	8	59	108	10	30	95	2	35	93
Total inorganic nitrogen (µg l ⁻¹)	A	9	143	80	12	246	165	15	267	66	3	269	48
	B	6	139	90	8	184	95	10	329	42	2	426	51
	C	6	245	48	8	1155	141	10	1915	146	2	374	69
Soluble reactive phosphorus (µg l ⁻¹)	A	9	10	73	12	6	64	15	6	66	3	5	34
	B	6	8	44	8	19	33	10	11	61	2	12	57
	C	6	28	99	8	34	158	10	14	103	2	11	77
Total phosphorus (µg l ⁻¹)	A	9	60	25	12	81	24	15	74	41	3	73	5
	B	6	90	18	8	110	8	10	85	17	2	118	11
	C	6	286	45	8	324	60	10	157	81	2	153	93

Seasonal and spatial variation in algal growth potential and growth-limiting nutrients in a shallow endorheic lake: Lake Pátzcuaro (Mexico)

Fernando W. Bernal-Brooks¹, Laura Dávalos-Lind² and Owen T. Lind²

¹Estación Limnológica de Pátzcuaro, Centro Regional de Investigación Pesquera, MÉXICO ²Limnology Lab, Baylor University, USA

Abstract

The present research focused on the functional role of the phytoplankton of an economically important endorehic tropical lake from the perspective of algal growth bioassays. The algal growth potential of the lake water was compared littoral and pelagic sites during the wet and dry seasons.

Algal growth potentials (AGP) at open waters reached minimum and maximum values following the seasonal alternation of dilution (by rain) and concentration (by evaporation) respectively. Conversely, at southern littoral stations high algal growth responses related to the availability of nutrients from occasionally functioning wastewater treatment plants. There was no such effect at nearby offshore sites or elsewhere in the lake which suggests filtration and competitive interactions for these nutrients between phytoplankton and littoral macrophytes. N and P both acted consistently as limiting nutrients at open waters by colimitation—frequently with a predominant role of one of them. N:P ratios seemed to approach equilibrium where limitation easily shifted to one element or the other temporally and spatially.

Key words: nutrients, nitrogen, phosphorus, colimitation, Pátzcuaro

INTRODUCTION

At scales ranging from lake districts to individual lakes, nutrient input rate, water renewal rate and lake morphometry are prominent abiotic factors with dominant effects on lake ecosystem productivity (Schindler 1978, Fee 1979, Carpenter 1983, Carpenter & Kitchell 1993). Pulses in the supply of major nutrients stimulate the biotic component's growth or decline on the basis of autotrophic uptake (Reynolds 1997). Thus, leaving aside the rare cases of Si limitation, three essential "fuels" activate the primary level of production (Sommer 1989): N, P and light.

The concept of limiting nutrient (derived from Liebig's law of minimum) implies that a shortage of a key element constrains the possibility of continuous algal population growth. "The paradigm of P as the dominant limiting factor in freshwater was developed largely by North American limnologists studying lakes at temperate latitudes..." (Elser *et al.* 1990), while the experience in tropical waters evokes N (Henry *et al.* 1985, Wurtsbaugh *et al.* 1985, Dávalos *et al.* 1989). In some cases (Sommer 1989) though, the temporal pattern of nutrient limitation as well as simultaneous occurrence of P and N contradicts the widespread habit of considering lakes as either P or N limited. Moreover, spatial and temporal variations may occur within the same water body (Phlips *et al.* 1993, Havens 1994). Certainly, a clear identification of the limiting nutrient in control of aquatic productivity requires a case-by-case investigation, especially when the project's target is eutrophication control.

Traditionally, Mexican limnology has consisted of the monitoring of physical and



chemical components— a descriptive limnology (Dávalos-Lind & Lind 1993) with a remarkable influence from textbooks drawing examples from northern latitudes because little other literature was available. The need of a solid limnological background demands an assiduous development of reliable databases (Bernal-Brooks *et al.*, in press) and concepts with local applicability (Bernal-Brooks 1998). Actually, the inference of ecological relationships based on the unilateral standpoint of chemical water analysis— in this case the role of limiting nutrients— focuses on N:P ratios. Shortcomings have been identified as “the measurement of P and N concentrations in water gives static values...” (Lopez-Lopez & Dávalos-Lind 1998) and “this method by itself does not yield reliable results if fluxes of nutrients are unknown and if no information is available on the nutrient requirements of the species involved” (Van Donk *et al.* 1989).

In 1996, a course “Pollution and Ecology of Plankton” held at the Chapala Ecology Station near Guadalajara, Jalisco brought the opportunity for Mexican scientists to be introduced to experimental limnology. In particular, algal bioassays were set-up for the assessment of impacts upon algal productivity caused by nutrients and/or changes in nutrient loading that evolved from the work at Lake Chapala ongoing for more than a decade. This work led to a contribution in México about limiting nutrients and algal growth potentials (AGP's) beyond Lake Chapala encompassing 30 water bodies located on the Mesa Central (Hernandez *et al.* in press).

Lake Pátzcuaro, which was included in the above study, is a well-known water body in Middle America (Deevey 1957). However, there are no experimental data

supporting the functional inferences derived from descriptive studies on limiting nutrients and phytoplankton biomass (Chacon, 1989, 1992, 1993a, 1993b; Planas & Moreau, 1990) or the algal community structure (Ancona *et al.* 1940, Osorio-Tafall 1941, Tellez & Motte 1980, Rosas *et al.* 1993, Sládecek & Vilaclara 1993). Low AGP's determined for the northern basin (Hernandez *et al.* op. cit.) contradicted the earlier description of this particular zone as distinctively eutrophic (Chacon op. cit.). Thus, the present research builds upon the experimental findings obtained previously for Lake Patzcuaro, with a comprehensive assessment of AGP's and limiting nutrients for both littoral and limnetic zones, and considers temporal variations associated with the onset of wet and dry seasons.

STUDY AREA

Lake Pátzcuaro (116.5 km²) lies within an endorehic basin (934 km²) located between 19° 32'N, 19° 42'N, and 101° 32'W and 101° 42'W (Fig. 1). The watershed had intense volcanic activity during the Tertiary and Quaternary (Demant 1975) with the eventual compartmentalization of Lake Patzcuaro from a Lerma river tributary (De Buen 1944, Barbour 1973). As a closed water body, the difference in volume between precipitation and evaporation governs the lake level (Bernal-Brooks *et al.* in press). Water level fluctuations, either seasonal (\cong 1 m) or in the long-term of decades (\cong 6 m), relates to regional climatic changes (Bernal-Brooks & MacCrimmon 2000).

A littoral zone located mostly at the southern basin includes conspicuous

developments of macrophytes categorized by Lot & Novelo (1988) as rooted emergent (*Typha* spp, *Scirpus* spp, *Phragmites australis*), rooted submersed with floating leaves (*Nymphaea mexicana*), rooted submersed (*Potamogeton illinoensis*, *P. pectinatus*) or free floating (*Eichhornia crassipes*, *Oxycarium cubense*). In contrast, the limnetic zone of the north region contains deeper waters (4-10 m) with only a narrow littoral with vegetation.

On the basis of water temperature and mixing regimes, this shallow lake ($z_{\max}=9.4$ m) has been classified as "tropical" since the pioneer limnological studies in México (De Buen 1941, 1944; Osorio-Tafall 1941, 1944). However, except for the thermal regime, Lake Patzcuaro and the temperate lakes of North America have a close similarity of biotic elements (Osorio-Tafall 1944, Hutchinson *et al.* 1956).

METHODS

Water samples were obtained at the lake surface with a vertical 1-m PVC Van Dorn bottle at offshore (Fig. 1, stations 1-5) and shoreline sites (Fig. 1, stations 6-7). Collection occurred on two dates during the rainy season (August 12 and September 21, 1998) and two during the dry season (May 3 and June 8, 1999). Rainwater was also included for one date (September 25, 1998).

At the Patzcuaro Limnological Station, the water samples were analyzed for physical and chemical variables. Standard Methods (APHA 1989) were followed for procedures except for chlorophyll-a (Holm-Hansen & Riemman 1978), ammonia (Solorzano 1969), and soluble reactive phosphorus and total phosphorus (Murphy & Riley 1962). A 1.5-liter water sample was filtered (0.45

µm Millipore®) and frozen until algal bioassay in the Limnology Laboratory, Baylor University in Waco, Texas (February 10-21; November 8-19, 1999).

Algal bioassay followed the standard EPA (1978) method with *Selenastrum capricornutum* as test organism. A modification introduced by Dávalos et al. (1989) allowed the use of 50 ml foam plugged test tubes in a 40:60 sample to air proportion (Lopez-Lopez & Dávalos-Lind 1998). Previous to each bioassay, all glassware was acid cleaned and rinsed with bicarbonate followed by deionized water. The experimental design, to evaluate water from seven sampling stations and four dates, included controls (C), and three nutrient addition treatments (nitrogen, phosphorus, and nitrogen and phosphorus combined) with four replicates each. The controls (filtered water without nutrient addition) were the basis of AGP determinations; while additions of nitrogen ($1000 \mu\text{g l}^{-1}$), phosphorus ($50 \mu\text{g l}^{-1}$) and NP combination (1000 and $50 \mu\text{g l}^{-1}$ respectively) allowed identification of the growth-limiting nutrient(s).

RESULTS

Physical and chemical data

At offshore stations (1 to 5), the lake maintained fairly stable temperatures during the spring-summer ($21-23.5^{\circ}\text{C}$) (Table 2). Wind-driven currents thoroughly mixed the water column every day to maintain DO levels ($>4.8 \text{ mg l}^{-1}$) and suspended solids ($>30 \text{ mg l}^{-1}$) in circulation. Physical and chemical variables varied more at the shoreline (stations 6-7) in comparison with offshore waters (stations 1-5)—especially under the influence of rainfall (August and September). Conductivity

and suspended solids in general, were lower during the rainy season. Both variables, in addition to chlorophyll-*a*, reached minimum values at shallow station 5 in response to the maximum lake water dilution. Simultaneously, at the opposite northern extreme, chlorophyll-*a* reached the highest values attained for the limnetic zone in association to dissolved oxygen over saturation. Nonetheless, the maximum chlorophyll-*a* concentrations occurred at littoral stations 6 and 7. The dry season, in the other hand, imposed a continuous water loss by evaporation and so, a persistent concentration of substances and a conductivity increase. In the absence of major water inputs, suspended solids had an increasing gradient from limnetic Stations 1 to 5, and on to Station 6 at the littoral.

Algal Growth Potential

AGPs differed between pelagic and littoral regions, within regions, and between seasons (Table 3). At offshore waters (stations 1-5), low and high values followed the onset of wet and dry seasons respectively. AGP's were low (stations 2 and 4) to almost negligible (stations 1, 3 and 5) during the rainy season, while reaching maximum values (>300%) at station 1 and 2 in May (dry season)—comparatively more than twice that at stations 3 to 5 in June (46-138%). The maximum AGP for the study (>1000%) occurred at littoral at station 7 in August 1998 and at station 6 in June 1999.

Limiting nutrients

At offshore waters (stations 1-5), the combined addition of N and P induced much greater algal growth in comparison to single additions of either element (Table 4). Minor responses to P at station 3 or N at station 4 involved also temporal variations from one to the other element at stations 1 and 2. At the littoral stations, variable responses were observed to additions of N, P or NP combination. Station 6 responded to N in August 1998, September 1998 and June 1999; while to NP in May 1999. Station 7 responded to NP additions in general, with a secondary response to N on one occasion (August, 1998).

Rainwater

The evaluation of rainwater as a possible source of nutrients to the lake showed a low AGP and no response to either N or P addition.

DISCUSSION

During the 80's, public concern for Lake Pátzcuaro's eutrophication eventually led to the establishment of six wastewater treatment plants at each major settlement around the lake (Pátzcuaro 1 "Las Garzas", Erongarícuaro, Tzintzuntzan, Quiroga, Janitzio and a new one under construction: Pátzcuaro 2). These facilities, sponsored by the federal government, relied on the technical support of engineers without a limnological perspective of the problem to be solved. As the facilities operation, focuses on the treatment of water volumes for BOD removal, the significance of the process itself for the lake water quality

remains uncertain. Currently, two questions still have to be considered in this respect: which "limiting nutrient" governs lake productivity? The answer is of great importance if one is to maintain that particular nutrient under control and thus constrain eutrophication. Also, what loading of that limiting nutrient may induce or has already caused an unwanted change in Lake Pátzcuaro's waters (in other terms, how many inhabitants around the lake may produce or have produced an undesirable situation into the lake considering present and future human development?)?

The precise nature of eutrophication or the problem in the lake seems not to be fully understood. The public concern relies on visual evidence of wastewater spills in the immediate town environment with an assumption that the latter necessarily has to have consequences into the lake. As long as there is no precise identification of the unwanted effects in the waters of Lake Pátzcuaro, say, chlorophyll-a blooms, the whole plan of water treatment appears as a commitment to the unknown with regard to the lake. Spatial differences in AGP's became evident during our study of Lake Pátzcuaro. Shoreline waters attained the highest chlorophyll-a content (Table 2) and also elicited intense algal bioassay responses on two occasions (station 6, June 1999; station 7, August 1998). Station 6, at the end of a navigation channel connecting to the lake, is surrounded by macrophytes and is thus isolated from open lake waters. Station 7 includes water hyacinth growths almost exclusive to this area which are apparently associated with wastewater spills from the town of Pátzcuaro. Algal responses for this station, either observed in the field or in the laboratory, show

negligible influence on the nearby stations 4 and 5 or elsewhere in open waters. The lack of relationship suggests restricted water circulation inside the littoral caused by the presence of macrophytes. Low AGP's at open waters (stations 1 and 5) during the rainy season point out a runoff inability to surpass the macrophytic limits down and induce algal responses offshore by pulses of nutrients. These data suggests point-source contamination at stations 6 and 7 with an active role of macrophytes as a competitor for nutrients. Wetzel (1990) considers land-water interfaces as metabolic and limnological regulators: "It is clearly recognized that wetlands and littoral regions function as a *physical sponge*, and that loading rates of incoming water can be significantly ameliorated as long as the adsorptive capacity of the littoral organic matter is not exceeded...". Thus, as a water treatment facility (biologically operated) within the lake, the functional interaction of macrophytes within the ecosystem (competition for nutrients) seems to have been overlooked in the past as well as have other trophic pathways not related directly to phytoplankton.

Seasonal variation in AGP's for open waters followed the scheme observed before for 30 water bodies located in the Mesa Central (Hernandez et al. in press): low AGP's during the rainy season and high AGP's during the dry season corresponding to sequences of dilution-concentration in the lake waters. An active role in the water balance by direct precipitation to the lake surface (Bernal-Brooks et al. MS) induced changes of physical and chemical water properties (Table 2), with a dilution process that led to a general AGP decline offshore. Conversely, the lakeshore stations showed independent responses as mentioned

before in relationship to point-contamination.

During the dry season, at the onset of progressive evaporative substance concentration, AGP's increased to the maximum at offshore sites. This is consistent with the April-May appearance of algal blooms in this particular zone as reported by Ancona *et al.* (1940), Osorio-Tafall (1941), Rosas *et al.* (1993) and Bernal-Brooks (unpublished data). AGPs reached maximum values in May at northern stations (1 and 2), then the southern sites followed (3-5) with lower values than those attained by the former. The temporal differences mentioned before fairly comply with Tellez & Motte's (1980) conclusion which also supports our data: stations 1-3 involve fairly constant conditions in the limnetic area (from the islands area northwards) compared to a more variable condition at the southern littoral region of macrophyte development. Also, the records from the Estacion Limnologica de Pátzcuaro of a more frequent wind direction towards the northwest along with field observations, suggests current patterns that split in two directions (from station 3 to 1; and station 3 to 5) roughly overlapping the lake areas considered before.

Past studies identified nitrogen as the algae growth-limiting nutrient on the basis of N:P ratios (Planas & Moreau 1990; Chacon 1989, 1992, 1993a, 1993b). However, Deevey (1957) found that the seston-phosphorus fraction reached 48.6 percent of the total and he assumed that the filterable fractions of nitrogen and phosphorus were largely in the soluble organic, not the inorganic form. This is an unusual situation for the interpretation of the limiting nutrient on the basis of N:P ratios that indeed are rather low. Further experimental evidence revealed that

N:P lacked informative value for 30 study cases in the Mesa Central of Mexico (Hernandez *et al.* in press). Lake Pátzcuaro had N:P colimitation for a sample obtained at San Andres Zirondaro (the northern basin). A consistent NP colimitation at open waters, low N:P ratios and a scarce availability of both nutrients agrees with Elser *et al.*'s (1990) statement regarding 60 North American lakes: "low frequency of detectable algal response to single nutrient enrichment relative to the combined enrichment is consistent with the view that both nitrogen and phosphorus are in relatively short supply, such that enrichment of one nutrient without the other produces only a brief growth enhancement until depletion of the other nutrient occurs. When both nitrogen and phosphorus are added, enhanced algal growth can be sustained and produce substantial and detectable responses".

Although Lind *et al.* (1992) observed a correspondence of algal biomass to rainfall events in Lake Chapala, a nearby nitrogen-limited large lake, for Lake Pátzcuaro the algal growth with rainwater barely responded, and even failed with the addition of N and P, singly or in combination.

According to the typology put forth by Reynolds (1997), a picture common to a large number of tropical and subtropical lakes complies with the concept "circadiomictic". In Lake Pátzcuaro, a temporary thermal stratification develops during the morning under calm meteorological conditions but usually dissipates with wind-driven mixing events by the afternoon. As an aquatic ecosystem with "high-frequency disturbance" at open waters, the whole water column undergoes complete motion as long as the mixing depth—calculated by Planas & Moreau

(1990) of 10 m—the maximum lake depth. The action of turbulent flows transports algae below the photic zone (≈ 1 m) but enhances nutrient availability after each mixing event. From this perspective, a continuous phytoplankton renewal and frequent shifts of limitation control from nutrients to light and back may happen at open waters.

Studies of Lake Okeechobee, Florida, a shallow lake with an even more complex morphometry consisting of four ecological zones (Phlips *et al.* 1993, Havens 1994) and spatial and temporal variations of limiting nutrients, might provide an appropriate example for future research in Lake Pátzcuaro.

ACKNOWLEDGEMENTS

We would like to thank Felicitas Sosa-Lima and Patricia Carrillo-Orea for their assistance at the field and laboratory. The support provided by the Director of the Centro Regional de Investigación Pesquera, Araceli Orbe-Mendoza and the Instituto Nacional de la Pesca is gratefully acknowledged. Financial support was given, in part, by CONACyT project 3626P-B9608.

REFERENCES

- Ancona, I., Batalla, M.A., Caballero, E., Hoffman, C.C., Llamas, R., Martín del Campo, R., Ochoterena, I., Rioja, E., Roca, J., Samano, A., Vega, C. & Villagrán, F. (1940) Prospecto biológico del lago de Pátzcuaro. *Anales del Instituto de Biología (México)* **11**: 415-503
- APHA (1989). *Standard Methods for the examination of Water and Wastewater*. 17th ed. American Public Health Association, Washington, D.C.
- Barbour, C.D. (1973) A biogeographic history of *Chirostoma* (Pisces: Atherinidae): a species flock from the Mexican Plateau. *COPEIA* **3**: 533-556.
- Bernal-Brooks, F. W. & MacCrimmon, H.R. (2000) Lake Zirahuen (Mexico): an assessment of the morphometry change based on evidence of water level fluctuations and sediment inputs. In: *Aquatic Ecosystems of Mexico: Status and Scope*. (eds M. Munawar, M., Lawrence, S., Munawar, I. & D. Malley) pp. 61-76. Ecovision World Monograph Series, Backhuys Publ. The Netherlands.
- Bernal-Brooks, F. W., Gomez-Tagle Rojas, A. & Alcocer, J. (in press) Lake Pátzcuaro (México): a controversy about the ecosystem water regime approached by field references, climatic variables and GIS. *Hydrobiologia*.
- Bernal-Brooks, F. W. (1998) The lakes of Michoacán: a brief history and alternative point of view. *Freshwater Forum* **10**: 20-34
- Carpenter, S.R. (1983) Lake geometry: implications for production and sediment accretion rates. *Journal of Theoretical Biology* **105**: 273-86.
- Carpenter, S.R. & Kitchell, J. F. (1993) *The trophic cascade in lakes*. Cambridge University Press.
- Chacon, A. (1989) *A limnological study of Lake Pátzcuaro, México, with a consideration of the applicability of remote sensing techniques*. Ph.D. thesis, University of Stirling, Scotland.
- Chacon, A. (1992) El Ecosistema Lacustre. In: *Pátzcuaro 2000*. (eds Toledo, V. M., Alvarez-Icaza, P. & P. Avila). pp. 37-70. Fundacion Friedrich Ebert Stiftung, México, D.F.
- Chacon, A. (1993a) *El Lago de Pátzcuaro, Michoacán, México. Bosquejo de un Lago Amenazado*. Editorial Universitaria, Universidad Michoacána de San Nicolas de Hidalgo.
- Chacon, A. (1993b) Lake Pátzcuaro, México: watershed and water quality deterioration in a tropical high-altitude Latin American lake. *Lake and Reservoir Management* **8**: 37-47.
- Dávalos-Lind, L. & Lind, O. T. (1993) The changing state of limnology in México: Lake Chapala as an example. *Verhandlungen der Internationalen Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie* **25**: 427-30
- Dávalos, L., Lind, O. T. & Doyle, R. D. (1989) Evaluation of phytoplankton limiting factors in Lake Chapala, México: turbidity and spatial and temporal variations in algal assay response. *Lake and Reservoir Management* **5**: 99-104
- De Buen, F. (1941) Las variaciones físicas y químicas de las aguas del lago de Pátzcuaro (St. X) desde Octubre de 1939 a marzo de 1941. *Investigaciones de la Estación Limnológica de Pátzcuaro (México)* **7**: 1-25.

- De Buen, F. (1944) Los lagos Michoacanos. II. El lago de Pátzcuaro. *Revista de la Sociedad Mexicana de Historia Natural* **5**: 99-125.
- Deevey, E. S. (1957) Limnological studies in Middle America with a chapter on Aztec limnology. *Transactions of the Connecticut Academy of Arts and Sciences* **39**: 213-328.
- Demant, A. (1975) Les quatre provinces volcaniques du Mexique, relations avec l'evolution geodynamique, depuis le Cretace, II. Les deux provinces occidentales. *C. R. Academy of Sciences* **280**: 1437-1440.
- Elser, J. J., Marzolf, E. R. & Goldman, C. R. (1990) Phosphorus and nitrogen limitation of phytoplankton growth in the freshwaters of North America: a review and critique of experimental enrichments. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **47**: 1468-1477
- EPA (1978) The *Selenastrum capricornutum* Print algal assay bottle test: experimental design, application and data interpretation protocol. EPA-600/9-78-018, Corvallis, Oregon.
- Fee, E. J. (1979) The vertical and seasonal distribution of chlorophyll in lakes of the Experimental Lakes Area, northwestern Ontario: implication for primary production estimates. *Limnology & Oceanography* **21**: 767-83
- Gómez-Tagle Chavez, A., Bernal-Brooks, F.W. & Alcocer, J. (in press) Sensitivity of Mexican water bodies to regional climatic change: three study alternatives applied to remote sensed data of Lake Patzcuaro. *Hydrobiologia*.
- Gomez-Tagle Rojas, A. (1997) *Levantamiento Agrológico Forestal de la Cuenca de Patzcuaro, Mich., y Diagnóstico de Posibilidades de Recuperación y Desarrollo mediante Sistemas de Informacion Geográfica*. PhD thesis, UNAM, México.
- Havens, K. E. (1994) Seasonal and spatial variation in nutrient limitation in a shallow sub-tropical lake (Lake Okeechobee, Florida) as evidenced by trophic state index deviations. *Archiv für Hydrobiologie* **131**: 39-53
- Henry, R., Hino, K., Tundisi, J.G. & Ribeiro, J.S.B. (1985) Responses of phytoplankton in lake Jacaretinga to enrichment with nitrogen and phosphorus in concentrations similar to those of the River Solimoes (Amazon, Brazil). *Archiv für Hydrobiologie* **103**: 453-477
- Hernandez, S., Bernal, F., Velarde, G., Ortiz, D., Lind O. & Dávalos-Lind L. (in press) The algal growth potential and limiting nutrient of 30 lakes and reservoirs of the Mesa Central of México. - *Verh. Internat. Verein. Limnol.* **27**
- Holm-Hansen, O. & Riemman, B. (1978) Chlorophyll-a determination: improvements in methodology. *OIKOS* **30**: 438-447.
- Hutchinson, G. E., Patrick, R. & Deevey, E.S. (1956) Sediments of Lake Pátzcuaro, Michoacán, México. *Bulletin of the Geological Society of America* **67**: 1491-1504
- Lind, O., Doyle, R., Vodopich, D., Trotter, B., Limón, J. & Dávalos-Lind L. (1992) Clay turbidity: Governing of phytoplankton production in a large, nutrient-rich tropical lake (Lago de Chapala, México). *Limnology & Oceanography* **37**: 549-565.

- Lopez-Lopez, E. & Dávalos-Lind, L. (1998) Algal growth potential and nutrient limitation in a tropical river-reservoir system of the Central Plateau, México. *Aquatic Ecosystem Health and Management* **1**: 345-351
- Lot, A., and Novelo, A. (1988) Vegetación y flora acuática del Lago de Pátzcuaro, Mich., México. *Southwestern Naturalist* **33**: 167-175.
- Murphy, J. & Riley, J.P. (1962). A modified single solution method for determination of phosphate in natural waters. *Analitica Chemica Acta* **27**: 31-36.
- Orbe, A. & Acevedo, J. (1995) El Lago de Patzcuaro. - In: *Lagos y Presas de México*. (compiladores De la lanza, G. & J.L. García). pp. 89-108. Centro de Ecología y Desarrollo, A.C.
- Osorio-Tafall, B.F. (1944) Biodinámica del Lago de Pátzcuaro I. Ensayo de interpretación de sus relaciones tróficas. *Revista de la Sociedad Mexicana de Historia Natural* **5**: 197-227
- Osorio-Tafall, B.F. (1941) Materiales para el estudio del microplancton del lago de Pátzcuaro (México). *Anales de la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas (México)* **2**: 331-382
- Phlips, E.J., Aldridge, F.J., Hansen, P., Zimba, P.V., Ihnat, J., Conroy, M. & Ritter, P. (1993) Spatial and temporal variability of trophic state parameters in a shallow subtropical lake (Lake Okeechobee, Florida, USA). *Archiv für Hydrobiologie* **128**: 437-458
- Planas, D. & Moreau, G. (1990) Natural eutrophication in a warm volcanic lake. *Verhandlungen der Internationalen Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie* **24**: 554-559.
- Reynolds, C.S. (1997) *Vegetation processes in the pelagic: a model for ecosystem theory*. Ecology Institute, Oldendorf/Luhe, Germany.
- Rosas, I., Velasco, A., Belmont, R., Baez, A. & Martinez, A. (1993) The algal community as an indicator of the trophic status of Lake Pátzcuaro, México. *Environmental Pollution* **80**: 255-264.
- Schindler, D.W. (1978) Factors regulating phytoplankton production and standing crop in the world's lakes. *Limnology & Oceanography* **23**: 478-85
- Sládecek, V. & Vilaclara, G. (1993) A water-bloom in Lake Pátzcuaro (Michoacán, México). *Verhandlungen der Internationalen Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie* **25**: 431-434
- Solorzano, L. (1969) Determination of ammonia in natural waters by the phenolhypochlorite method. *Limnology & Oceanography* **14**: 799-801.
- Sommer, U. (1989) Nutrient status and nutrient competition of phytoplankton in a shallow, hypertrophic lake. *Limnology & Oceanography* **34**: 1162-1173
- Tellez, C. & Motte, O. (1980) Estudio planctonológico preliminar del lago de Pátzcuaro, Mich., México. Mayo de 1976. 2nd Latin-American Symposium of Aquaculture, pp. 1799-1836
- Van Donk, E., Mur, L.R. & Ringelberg, J. (1989) A study of phosphate limitation in Lake Maarsveen: phosphate uptake kinetics versus bioassays. In: *Environmental Bioassay Techniques and their Application*. (eds Munawar, M., Dixon, G., Mayfield, C.I., Reynoldson, T. & M.H. Sadar, M.H.): *Hydrobiologie* **188/189**: 201-209.

Wetzel, R.G. (1990) Land-water interfaces: metabolic and limnological regulators. *Verhandlungen der Internationalen Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie* **24**: 6-24

Wurtsbaugh, W.A., Vincent, W.F., AlfaroTapia, R., Vincent, C.L. & Richerson, J.P. (1985) Nutrient limitation of algal growth and nitrogen fixation in a tropical alpine lake, Lake Titicaca (Peru/Bolivia). *Freshwater Biology* **15**: 185-195

LIST OF FIGURES

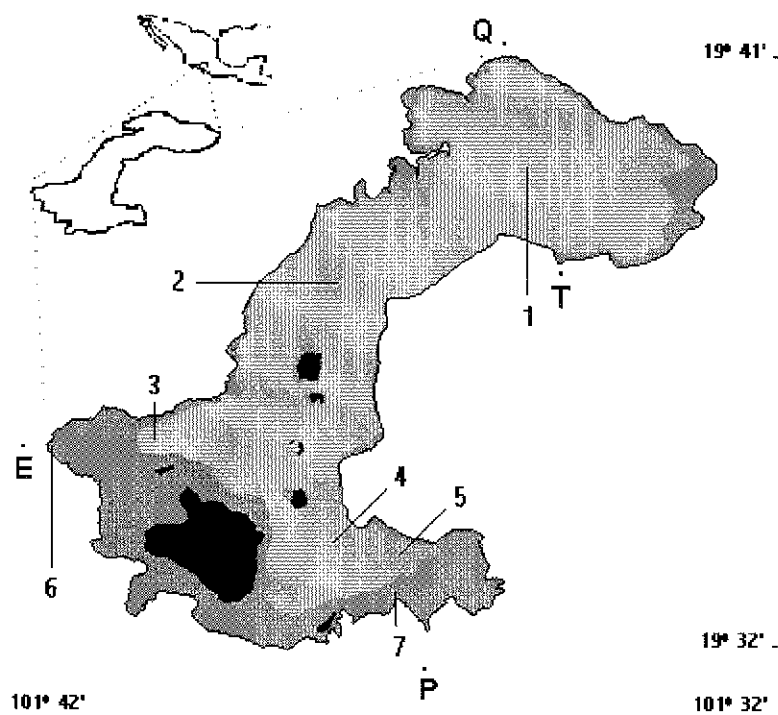


Figure 1. Lake Patzcuaro: geographical location with sampling stations at offshore waters (1-5) and littoral (6-7); as well as towns of Patzcuaro (P), Erongarícuaro (E), Quiroga (Q) and Tzintzuntzan (T). Shown are: macrophyte developments in deep gray, islands in black and offshore waters in light gray

LIST OF TABLES

Table 1. Lake Patzcuaro: basic morphometric, physical and chemical properties

⁵ Altitude (m.a s.l.)	2035
³ Catchment area (km ²)	934
⁴ Lake area (km ²)	116.5
² Volume (10 ⁶ m ³)	500
² Mean depth (m)	4.7
⁵ Maximum depth (m)	9.4
⁶ Suspended solids (mg l ⁻¹)	>30
⁶ Conductivity (μS cm ⁻¹ 25°C)	250-1200
⁶ Alkalinity (meq l ⁻¹)	<12
⁶ pH	8.9-9.1
¹ Mg ²⁺ (meq l ⁻¹)	1.90
¹ Ca ²⁺ (meq l ⁻¹)	0.76
¹ Na ⁺ (meq l ⁻¹)	5.20
¹ K ⁺ (meq l ⁻¹)	1.00

Sources: ¹Planas and Moreau 1990; ²Orbe and Acevedo 1995;

³Gomez-Tagle Rojas 1997; ⁴Gomez-Tagle Chavez et al. in press

⁵Bernal-Brooks et al. in press; ⁶Bernal-Brooks and Alcocer, unpublished data

Table 2. Lake Pátzcuaro: physical and chemical data obtained for stations 1-7 in support to the present algal assay research (next page)

Variables/Stations	Offshore---> North to South--->					Lakeshore		
	1	2	3	4	5	6	7	
Depth (m)		9.4	7.4	2.3	3.4	1.8	1.6	2.0
Temp (°C)	Aug-98	22	21.5	21.5	22	21.5	21	24.5
	Sep-98	21.5	21.5	22.5	23	23.5	21.5	24.5
	May-99	21	21	20.5	21.5	20.5	20.5	20.5
	June-99	21	22	22.5	22.5	23.5	24	20.5
DO (mg l ⁻¹)	Aug-98	12.3	8.5	8.6	9.3	8.5	4.8	20.6
	Sep-98	5.5	5.7	6.2	5.8	7.1	5.4	15.5
	May-99	6	5.9	6.7	6	4.5	4.2	4.7
	June-99	9.2	6.1	7.1	7	6.8	3.8	5
Chl-a (µg l ⁻¹)	Aug-98	44	17	11	15	8	74	158
	Sep-98	26		17	29	12	58	142
	May-99	23	10	20	26	28	208	69
	June-99	22	7	13	13	19	203	1126
SS (mg l ⁻¹)	Aug-98	32	28	28	47	23	603	50
	Sep-98	27	28	66	55	16	112	285
	May-99	36	57	59	61	95	165	50
	June-99	29	39	71	79	82	140	383
Cond (µS cm ⁻¹ .25°C)	Aug-98	970	970	950	840	320	260	1080
	Sep-98	920	900	920	660	280	240	1200
	May-99	980	1000	960	960	980	750	1700
	June-99	1000	1000	1000	970	1000	750	1680
TIN (µg l ⁻¹)	Aug-98	45	31	31	59	38	894	167
	Sep-98	63	26	44	70	32	83	36
	May-99	490	528	251	467	430	470	496
	June-99	206	197	191	236	225	112	41
SRP (µg l ⁻¹)	Aug-98	3	6	3	18	5	38	598
	Sep-98	6	6	3	16	5	17	258
	May-99	9	1	3	8	15	9	0
	June-99	4	5	3	34	24	25	490
TP (µg l ⁻¹)	Aug-98	113	76	74	101	73	452	851
	Sep-98	76	69	73	109	44	254	485
	May-99	83	74	91	115	110	325	214
	June-99	82	80	89	138	135	317	860
TIN:TP	Aug-98	0.4	0.4	0.4	0.6	0.5	2.0	0.2
	Sep-98	0.8	0.4	0.6	0.6	0.7	0.3	0.1
	May-99	5.9	7.1	2.8	4.1	3.9	1.4	2.3
	June-99	2.5	2.5	2.1	1.7	1.7	0.4	0.0

Table 3. Mean algal growth potential (n=4) of Lake Patzcuaro water (as percent increase during incubation) using *Selenastrum capricornutum*

Station/Date	Aug-98	Sep-98	May-99	June-99
1	4	3	322	46
2	21	29	305	204
3	0	6	0	51
4	45	18	34	138
5	3	2	29	78
6	15	106	17	463
7	1045	40	3	17
Rain		7		

Table 4. Mean maximum algal growth n=4 (over the control) of *Selenastrum capricornutum* for Lake Patzcuaro waters, including nutrient additions

Station/Date	Aug-98	Sep-98	May-99	June-99
Nitrogen Added				
1	0	0	10	0
2	0	0	0	5
3	0	0	0	0
4	3	2	2	16
5	0	0	0	0
6	131	56	0	96
7	28	0	0	0
Rain		1		
Phosphorus Added				
1	3	0	2	2
2	0	1	4	0
3	1	2	1	3
4	0	0	0	0
5	1	0	0	0
6	0	0	3	4
7	0	0	0	2
Rain		1		
Nitrogen + Phosphorus Added				
1	38	26	87	79
2	32	69	79	89
3	35	53	76	116
4	97	113	118	122
5	166	163	118	135
6	129	73	23	100
7	173	48	137	135
Rain		0		

DISCUSIÓN

En México, el desarrollo incipiente de la Limnología demanda una inspección exhaustiva de los sistemas acuáticos localizados en el territorio nacional, como punto de partida para construir un marco conceptual basado en casos de estudio locales y erradicar así la dependencia existente de ejemplos de ambientes templados en la literatura internacional. Goldman (1988), por ejemplo, destacó la importancia de los estudios continuados para detectar el cambio gradual en los lagos, el cual, -de otra manera-, podría quedar enmascarado en la variabilidad interanual. En el caso del lago Tahoe (Nevada-California, Estados Unidos), la disponibilidad de datos a partir de 1959 le permitió al referido autor discernir efectos climáticos relacionados con precipitación pluvial, radiación solar, profundidad de mezcla durante el invierno y, posiblemente en el futuro, el papel de la herbivoría del zooplancton sobre la productividad primaria anual.

La introducción de la presente tesis pone de manifiesto la existencia de una serie de estudios limnológicos realizados sobre Pátzcuaro y, no obstante, representar el caso de estudio con el mayor número de referencias en el país; destaca la naturaleza esporádica de la investigación, así como las contradicciones, bases de conocimiento débiles, vacíos de conocimiento e imprecisiones en la información, que sitúa el desarrollo de los trabajos limnológicos de este lugar prácticamente en sus inicios. Especialmente, el paradigma sobre el funcionamiento del ecosistema en torno a una relación entre ecología y evolución lacustre, -planteado por el Dr. Fernando De Buen (1943,

1944) sesenta años atrás-, lleva implícita una reiteración hasta la actualidad por autores subsecuentes en la limnología regional como se detalla a continuación.

Marco conceptual

El primer artículo de la presente tesis pone a consideración del lector el núcleo del pensamiento del Dr. Fernando De Buen sobre la relación propuesta entre ecología (el término es utilizado en este contexto como apariencia actual) y evolución lacustre. La información de apoyo radica fundamentalmente en las relaciones ictiológicas entre Zirahuén, Pátzcuaro y Cuitzeo, así como las diferencias detectadas entre los tres cuerpos de agua en términos de altitud, profundidad y condiciones ecológicas. A partir de este marco de referencia, el Dr. De Buen infiere un patrón común de evolución lacustre con diferente avance en los referidos lagos, análogo a un proceso de envejecimiento. La manera de identificar el progreso de la edad radica en el nivel de sedimentación y sus efectos asociados, al igual que planteó Lindeman (1941) en un esquema clásico de evolución lacustre para el Cedar Bog Lake en Estados Unidos. De manera similar, el Dr. De Buen hace lo propio con los lagos michoacanos, como se explica a continuación en sus propias palabras (extractos tomados de De Buen, 1943):

"Los lagos michoacanos evolucionan desde su origen, acercándolos hacia la muerte al cambiar sus actuales cuencas anegadas, por valles con espesos sedimentos, que formarán un llano casi horizontal, marginado de las elevaciones antes vertientes del lago. Tenemos además en los lagos Michoacanos tipos en

diferente evolución, Zirahuén es el más *joven*, Pátzcuaro le sigue, ya *envejecido*, Cuitzeo esta en plena *decadencia* y Lagunillas es un valle de origen lacustre".

De manera más explícita, "*Joven Zirahuén, con aguas limpias, azules, transparentes y profundas, avanzará rápidamente hacia el envejecimiento, acortando las etapas de su ciclo geológico bajo el hacha del leñador, con despiadada tala, y por la destrucción suicida del bosque por acción del fuego*". Por su parte, Pátzcuaro "ha suavizado las irregularidades del fondo, sus aguas por la *polución de arcillas* se colorean de *verde o de amarillo*, dejan su antigua *transparencia y el color azul*. Pátzcuaro, que retiró sus aguas, especialmente en Chapultepec y Quiroga, dejando terreno para la agricultura, se encuentra en regresión y por tanto en franco *envejecimiento...*". Finalmente, "*tras la senectud viene la muerte; ya solo se forman charcas en el fondo del valle, agotadas por la sequía, y últimamente, en el terreno llano y seco, abren profundos surcos, sobre los blandos materiales sedimentados, las aguas encauzadas*".

Así, el ejemplo de un "*lago joven de aguas profundas y claras*" es Zirahuén, mientras el extremo opuesto de un "*lago senescente de aguas someras y turbias*" presupone en Cuitzeo la consecuencia de una elevada sedimentación, con una etapa intermedia en Pátzcuaro.

A partir de las relaciones ictiológicas entre los tres cuerpos de agua y su diferencia en altitud, el Dr. De Buen concibe además un origen común de los lagos Michoacanos a través de la postulación de un afluente ancestral del Río Lerma y su subsecuente compartimentación en cuencas lacustres cerradas por procesos tectónicos y volcánicos.

El pensamiento limnológico propio de la Escuela Europea -tendiente a establecer generalizaciones a partir de una disponibilidad limitada de datos- caracteriza los trabajos del citado investigador, aunque el formular hipótesis sin un soporte exhaustivo de información fuera del campo de la ictiología, involucra carencias elementales de la época como la inexistencia de mapas topográficos de la región. De hecho, en los inicios de la Estación Limnológica de Pátzcuaro, una necesidad primaria a cubrir fue la elaboración de un primer producto cartográfico del Lago de Pátzcuaro mediante levantamiento de campo con teodolitos (Zozaya 1940a, 1940b).

Hutchinson (1969), sin embargo, considera la inconveniencia de un marco conceptual erigido sobre bases débiles en la clasificación general de lagos o Seetypenlehren: "La contribución de Naumann fue proporcionar un esquema teórico de clasificación que permitió coordinar un gran número de observaciones casuales, aunque partes de este esquema son probablemente de una aplicación limitada". Asimismo, Rodhe (1969) agrega que "las ideas generales pueden ser estimulantes en extremo, pero no ofrecen un atajo hacia la verdad si están basadas en premisas prematuras".

El conocimiento actual de la zona donde se localizan los lagos Michoacanos (CETENAL 1987) revela que una conexión lago a lago entre Zirahuén y Pátzcuaro resulta poco probable geográficamente. Esto es debido, por un lado, a que el primero se encuentra embalsado por una barrera volcánica que de no existir llevaría las aguas del Arroyo de la Palma hacia el Río Balsas, no al Río

Lerma. Nuevas evidencias geológicas (Israde y Garduño*, com. pers.) se suman en el sentido de negar una posible conexión entre ambos lagos. Por otra parte, Cuitzeo representa un lago somero ya desde su origen (Israde y Garduño 1997) y no una cuenca lacustre azolvada por sedimentos.

Sorpresivamente, la teoría general de ecología-evolución lacustre (TGEL de aquí en adelante) basada en el presunto "azolvamiento" de las cuencas, trascendió hasta la actualidad sin cuestionamiento y revisión crítica en una continuidad de ideas por Solórzano (1955), Deevey (1957), Mendivil et al. (1980), López (1982), Alvarado et al. (1985), Chacón y Muzquiz (1991), Chacón et al. (1991), Chacón (1993a, 1993b), Cruz (1995) y Chacón et al. (2000). Evidentemente, ante la rigidez de la teoría previamente establecida, los seguidores modernos de la TGEL procuran reconciliar las evidencias de campo con las ideas generales emitidas sesenta años atrás. Así, la interpretación de datos limnológicos ha gravitado sobre la justificación del paradigma de un cierto nivel de "azolvamiento" que la deforestación circundante acelera, con las consecuencias ecológicas pertinentes. Por ejemplo, el caso de Pátzcuaro involucra una condición "madura" o de "lago viejo" que le confiere la característica de "lago amenazado" (Chacón 1993a) desde esta perspectiva. Lo anterior, a su vez, lleva implícita una irremediable desaparición del cuerpo de agua por evolución avanzada y una ecología lacustre influida sensiblemente por la incorporación masiva de sedimentos provenientes de la deforestación circundante traducida además en eutroficación. En el extremo del modelo conceptual de ecología-evolución lacustre, Chacón et al. (2000) ejemplifican una

* Israde, I., y Garduño, V. Instituto de Investigaciones Metalúrgicas. Universidad Michoacana.

progresiva pérdida de profundidad en el lago de Cuitzeo a través de 48 años, con cuatro mediciones tomadas en cuenta a lo largo del tiempo (1946, 1976, 1980, 1994). Asimismo, asociado con el nivel extremo de sedimentación en Cuitzeo aparece el término "hipereutroficación", es decir, una apariencia propia de un estado evolutivo "*senescente*" caracterizado por una baja profundidad, resuspensión de sedimentos y un tiempo de residencia hidráulico elevado.

No obstante, en el caso de Cuitzeo, si bien la serie de tiempo sobre niveles del agua muestra condiciones de desecación del vaso lacustre en algunos años (1942, 1961 y 1982), también ocurre el caso contrario de niveles máximos de agua (1958, 1967, 1976, 1988 y 1991), de acuerdo con el registro obtenido en la Estación Chehuayito desde 1929. Por consiguiente, carece de sustento la postulación de una progresión gradual hacia un estado de desecación a consecuencia de un proceso de evolución lacustre. Asimismo, la "hipertroficación" planteada por Chacón et al. (2000) como consecuencia de la decadencia del ecosistema acuático, parece ser un evento de carácter esporádico (como ciertamente ocurrió en Septiembre de 1981, datos personales sin publicar) que requiere de un estudio específico con muestreos frecuentes. Paralelamente, no se reportan concentraciones de clorofila-a que permitan ubicar la dimensión del fenómeno.

En una posición alternativa sobre la limnología de los lagos Mexicanos, la opinión de Osorio-Tafall (1941) permaneció desapercibida en el transcurso de los años: "A medida que progresan los estudios limnológicos y se aplican los métodos más modernos a las cuencas lacustres se van reconociendo lagos que no concuerdan con los tipos descritos... [en la clasificación original propuesta por

Naumann y Thienemann (1922)]...". "Las conclusiones a que se ha llegado coinciden en considerar a cada lago como una entidad individual y un determinado tipo de hábitat, dado que representa una combinación de factores característica para cada lago en particular y que no es posible reducir a un patrón general". Este punto de vista del Dr. Osorio-Tafall es compartido por el autor del presente documento en el primer artículo de la presente tesis. La posibilidad de generalizar, si es el caso, aparecerá en la medida en que una inspección limnológica exhaustiva de cuerpos de agua progrese en el territorio nacional.

Balance Hidrológico y Sensibilidad Climática

El segundo artículo de la presente tesis trata sobre la serie histórica de niveles del lago; la relación entre variables climáticas vs. los cambios de nivel en el lago; y la importancia de las escorrentías en la cuenca terrestre como aportación de agua hacia el lago. De manera complementaria a lo anterior, el tercer artículo (y los mapas en el anexo 3) presenta una propuesta metodológica para el análisis de imágenes del lago disponibles a partir de 1969.

a) Verificación de bancos de nivel

La detección de diferencias significativas en la altitud reportada tanto del riel del ferrocarril de Pátzcuaro como la regla de niveles de Santa Fé, involucra 5.026 m y 4.391 m de desviación con respecto a los valores reales. Este hecho dio lugar a una recomposición de la información existente sobre niveles del agua y a un reconocimiento de ciclos de ca. 40 años de amplitud en el nivel del lago: un

descenso en el nivel de agua de 4.951 m entre 1939 y 1955 continúa posteriormente con una elevación de 3.182 m entre 1955 y 1969. Aunque la superficie del lago se mantuvo por arriba de los 2,039 m.s.n.m. durante la década de los 1970s, ésta descendió nuevamente partir de 1980. De este año en adelante, el nivel del agua registró pérdidas de manera sostenida hasta alcanzar 2035.416 m en el 2000, equivalente a 3.584 m por debajo del nivel de los 1970's y una diferencia de -0.462 respecto al mínimo alcanzado en 1955. Los signos de una posible recuperación en el nivel no aparecen aún a la fecha (junio, 2001). En la nueva serie de tiempo obtenida sobre niveles, la profundidad máxima registrada el 17 de febrero de 1941 (De Buen 1941a) de 15 m (nivel = 2040.350 m) proyectada a partir de la fecha señalada, coincide con una profundidad máxima actual del orden de 10 metros (nivel mínimo en 2000 = 2035.416 m). El nivel de precisión en el valor de profundidad, sin embargo, no es comparable con la medición de niveles de agua del lago realizada al milímetro, de tal manera que éstas últimas representan la fuente de información más confiable sobre los cambios ocurridos en el lago en las pasadas seis décadas.

b) Relación entre variables climáticas y fluctuaciones de nivel en el lago

El periodo de tiempo en el que el nivel del agua mantuvo una condición aproximadamente estable (los años 1970's) permite analizar, fuera de la influencia de los movimientos de nivel del lago a largo plazo, la respuesta del lago al efecto de las variables climáticas. A partir de los cambios mensuales en el nivel, el desglose de la aportación de agua de lluvia tanto de manera directa sobre el lago, como indirecta a través de escorrentías periféricas, muestra una

relación proporcional entre la adición de agua por precipitación y el cambio de nivel en el lago ($r^2 = 0.94$; $n = 27$; ver artículo 2, figura 3).

c) Escorrentías en la cuenca terrestre

La determinación del número y cantidad de canales producidos por las escorrentías de agua en la cuenca terrestre, contribuye asimismo a demostrar la existencia de flujos significativos de agua sobre los terrenos aledaños al lago. Los efectos de la lluvia sobre la cuenca terrestre, inclusive, adquiere dimensiones de una erosión hídrica destructora de la red hidráulica en las subcuencas V y VIII (ver artículo 2 figura 4, Tabla 3).

d) Imágenes del lago incorporadas a un SIG

Desde el punto de vista climático, los lagos varían en su nivel de agua y área en función de los cambios regionales en el balance hidráulico entre precipitación (P) y evaporación (E). La magnitud de la respuesta en P-E depende de la contribución relativa de aguas subterráneas y la pérdida de agua a través del flujo de salida. En consecuencia, el cambio de nivel en un lago es más pronunciado en cuencas terminales que no presentan flujo de salida superficial o subterráneo (Fritz et al. 1999). Por ende, el cambio morfométrico de un lago climáticamente sensible puede ser analizado por medio del estudio retrospectivo de imágenes.

La escala temporal en la investigación de fenómenos climáticos abarca décadas, de tal manera que las fotografías aéreas de blanco y negro representan la única fuente de información disponible. Estudios recientes sobre

uso del suelo a partir de fotografías aéreas realizados en el África (Hudak y Wessman 1998), Israel (Kadmon y Harari-Kremer 1999) y Nuevo México (Miller 1999) contemplan la incorporación de imágenes mediante escáner a un Sistema de Información Geográfica. Así, la resolución requerida para discriminar objetos en el paisaje como árboles, condujo a la realización del tercer artículo de la presente tesis al considerar paralelamente el mismo método para el análisis de lagos climáticamente sensibles. La carencia de imágenes con geoposicionamiento demanda el desarrollo de un marco de referencia que permita obtener resultados comparables del ensamble de fotos a diferentes escalas y resoluciones, así como compensar cualquier efecto ocasionado por deriva. Tres alternativas de estudio para el caso del Lago de Pátzcuaro parten del análisis de fotografías aéreas y cartografía de INEGI de 1974.

Las imágenes disponibles sobre el lago de 1969, 1974, 1986, 1991, 1993, 1995 y 2000 concuerdan con la recomposición de datos sobre niveles (ver Anexo 3). Es decir, el mayor nivel de agua registrado en imágenes corresponde a 1974 (2039.010 m.s.n.m.), con un área total en el lago de 11,873 ha y una superficie en islas de 267.5 ha. En niveles de agua más bajos a 1974, la relación se invierte por una tendencia hacia la desecación. Es decir, en 1969 (2038.75 m.s.n.m.) el área total del lago es menor (11,392 ha) y las islas mayor (397 ha). Dicha relación de cambio es más acentuada en años posteriores a la década de los 1970's hasta llegar al caso extremo del 2000, cuando el lago alcanza su nivel más bajo (2035.416 m.s.n.m.), el área total del lago se reduce a 9757 ha y las islas aumentaron a 851 ha.

e) Sensibilidad climática

Bernal-Brooks y MacCrimmon (2000) consideran, para el caso de los lagos de la Mesa Central de México, que la mayor aportación de agua procede de la lluvia y muestran secuencias paralelas en las fluctuaciones de nivel de largo plazo (décadas) para los lagos Zirahuén, Pátzcuaro, Cuitzeo y Chapala. Durante el desarrollo del trabajo mencionado anteriormente y el inicio de la presente tesis, la verificación y recomposición de datos sobre los niveles de Pátzcuaro permitió discernir la existencia de un efecto común de alcance regional identificado previamente por Hutchinson et al. (1956) como un fenómeno de sensibilidad climática: “El alto nivel del tiempo Nahua (en el Lago de Tenochtitlán, actual Valle de México), que le permitió a Cortés conquistar Tenochtitlán por agua, es también establecido para Pátzcuaro por la evidencia del mapa de Beaumont. Así, mientras las evidencias arqueológicas de Michoacán son escasas, proporcionan una evidencia independiente para el punto de vista de que fases húmedas y secas fueron sincrónicas en Michoacán y en el Valle (de México) y deben haber sido controladas por el clima”. Es decir, en estos casos el balance hidrológico del lago depende de la cantidad de lluvia suministrada y se refleja en una relación directa de cambios en el nivel del agua en la cuenca lacustre y el área inundada.

El contexto de los trabajos aquí realizados complementa la conclusión de Williams (1993) en cuanto a la ocurrencia de una disminución en los niveles de agua de los lagos localizados en zonas áridas y semi-áridas, en referencia específica para los grandes lagos salinos de carácter permanente. Ambas partes permiten vislumbrar un cambio climático global desfavorable en las últimas dos

décadas con dos alternativas a futuro. El bajo nivel del agua actual podrá recuperarse en años subsecuentes si prevalece la continuidad de ciclos repetitivos de largo plazo descrita en investigaciones paleolimnológicas para los 44,000 años de existencia del lago (Watts y Bradbury 1982; O'Hara 1991 y Metcalfe et al. 1994). En el segundo caso, la alteración de dichos ciclos por influencia humana mantendrá la tendencia de los niveles de agua a la baja por un proceso de desertificación que conducirá a una gradual desaparición de cuerpos de agua en la región. Las zonas áridas al norte de México muestran, de hecho, las consecuencias del empeoramiento climático en tanto "92 manantiales se secaron, los flujos superficiales han disminuido y los niveles freáticos han descendido", con numerosos ejemplos (Contreras-Balderas y Lozano-Vilano 1993).

Los antecedentes inmediatos al presente trabajo de tesis que respalda la TGEL, incluye un modelo de balance hidráulico (Chacón 1989, 1992, 1993a, 1993b) que nulifica los escurrimientos periféricos a la cuenca lacustre como fuente importante de afluencia de agua y, de manera extraña, la participación de la lluvia como factor de erosión hídrica y acarreo de sedimentos. En este caso, la infiltración de los mantos subterráneos hacia el lago se pondera como la alimentación principal de agua sin explicar la forma en que ocurre el transporte masivo de terrígenos procedentes de la cuenca terrestre ante la ausencia de esorrentías periféricas al lago.

Tampoco se encontraron evidencias que apoyen el argumento de tres metros acumulados de sedimentos entre principios de los 1940's y principios de los 1990's (Chacón 1989, 1992, 1993a, 1993b) equivalente a una pérdida de

profundidad aproximada de 60 mm/año. Por el contrario, Bradbury (2000) presenta un esquema de acumulación de 14.4 m de sedimentos en 44,000 años de existencia del lago, con una depositación promedio del orden de 0.3 mm/año. Si bien parece contradictoria la erosión ocasionada por la lluvia en la parte terrestre (ver inciso c. Escorrentías en la cuenca terrestre) con los reducidos niveles de sedimentación reportados, aún falta realizar investigación para conocer detalladamente como se efectúa el transporte y distribución de sedimentos hacia las partes bajas de la cuenca terrestre y hacia el interior del mismo lago.

Homogeneidad vs. Heterogeneidad del Medio Acuático

El cuarto artículo de la presente tesis incluye una regionalización del lago de Pátzcuaro a partir de un análisis multivariado con 13 variables físicas y químicas del agua. El análisis de componentes principales permitió identificar cuatro variables (residuo total, conductividad, alcalinidad y dureza) que explican la mayor varianza asociada a los datos. De manera más consistente, sin embargo, el residuo total explica las diferencias en el sentido espacial y la conductividad en el sentido temporal.

Espacialmente, el áreas A ubicada en una zona propiamente limnética ($z > 4$ m) involucra condiciones de mayor estabilidad física y química, mientras C y las estaciones someras del lago (8 y 9) representan lo contrario, una situación de variabilidad extrema. B representa una situación intermedia que contribuye a la heterogeneidad de la zona sur del lago.

Temporalmente, el período de sequía incluye las etapas I (Enero a Marzo 1998) de secas-frío y II (Abril a Julio 1998) secas-cálido con una contraparte en la temporada de lluvias que abarca casi por completo la etapa III (Agosto 1998, Octubre 1998 a Enero 1999) con excepción del mes de Septiembre 1998 que por sí solo representa la entrada mayor de agua de lluvia en el lago o etapa IV.

En el presente trabajo, la época de sequía representada por las etapas I y II incluye los valores promedio más bajos de transparencia del disco de Secchi (0.13 - 0.43 m) en asociación con los más altos de conductividad (766-963 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$), sólidos suspendidos (33-243 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$), residuo total (652-822 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$), alcalinidad (8.6-12.1 $\text{meq}\cdot\text{l}^{-1}$) y dureza (196-214 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$). En contraste, la incorporación de agua de lluvia en el lago produjo un efecto de dilución que eleva los valores promedio de la transparencia del disco de Secchi (SD) durante la etapa III (0.35-0.43 m) y con mayor énfasis en la etapa IV (0.37-0.52 m). El efecto más marcado de la lluvia ocurrió en el área C, donde la transparencia alcanzó valores individuales de 0.82 m en una columna de agua del orden de un metro. Los valores promedio de conductividad (263-917 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$), sólidos suspendidos (30-107 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$), residuo total (263-711 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$), alcalinidad (2.8-10.8 $\text{meq}\cdot\text{l}^{-1}$) y dureza (120-207 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$) disminuyeron en comparación con las etapas I y II.

En una investigación reciente realizada en tres distritos lacustres de Ontario, Canada, dominados por aguas superficiales (como es el caso de los lagos en la Mesa Central de México), Webster et al. (2000) encontraron patrones de respuesta química relacionados con los cambios interanuales de precipitación. Las propiedades iónicas tienden a ser sincrónicas y negativamente relacionadas

con la incorporación de agua de lluvia, no obstante solutos como el sílice y el fósforo total así como la concentración de clorofila-a resultan ser menos sincrónicos y la relación con la precipitación tiende a ser positiva o inexistente. En general, este es el caso de Pátzcuaro.

En consecuencia, la presente investigación muestra una heterogeneidad en el medio acuático que respalda el punto de vista expresado por De Buen (1940), Rosas (1976) y Lara (1980) en el sentido empírico, en cuanto a la existencia de un mosaico ambiental a lo interno del lago. El argumento justifica una posible selección de hábitat por parte de las especies ícticas y explica su distribución espacial diferenciada dentro del cuerpo de agua aunque, en este caso, es necesaria más investigación al respecto.

Así, la heterogeneidad encontrada en el medio acuático se contrapone al planteamiento de un medio acuático homogéneo implícito en los trabajos de Herrera (1979) y Chacón (1989, 1992, 1993a, 1993b) donde la presentación de una tabla sinóptica de variables incluye valores sin intervalos. Los resultados obtenidos en la presente investigación, con 10 estaciones de muestreo, fueron suficientes para detectar en un ciclo anual las diferencias espaciales y temporales que ocurren en el medio acuático de Pátzcuaro. Asimismo, los datos aquí reportados niegan el esquema de sólidos suspendidos (Chacón 1993a, 1993b) que muestra una concentración mayor en el área norte del lago donde, por el contrario, existen valores más bajos comparativamente con el resto del lago (al igual que es el caso con la clorofila-a, el mencionado autor centra la atención del lector en una imagen de satélite y no discute el posible contexto de variación que pudiera expresar la información de campo obtenida en 24

estaciones de muestreo, 500 muestras analizadas y 10 años de trabajo); y rechazan asimismo el punto de vista de que la conductividad eléctrica no muestra diferencias significativas en las diferentes zonas del lago, como reflejo de una presunta homogeneidad de condiciones.

Tampoco se encontraron evidencias de una incorporación masiva de sedimentos procedentes de la cuenca terrestre como postula la TGEL en cuanto a la elevación de sólidos suspendidos en el lago durante la temporada de lluvias por acarreo del exterior. Más bien, los datos destacan un ambiente turbio por resuspensión del sedimento presente en el interior del lago; los valores más altos de sólidos suspendidos son coincidentes con la presencia de los vientos de mayor intensidad en las etapas I y II (Enero a Julio 1998)

Régimen Térmico

Hutchinson y Löffler (1956) y Hutchinson (1957) propusieron un esquema de clasificación de lagos basado en los eventos de mezcla que ocurren a lo largo del año. Más tarde, Lewis (1983) modificó el esquema mencionado anteriormente y casos como el de Pátzcuaro, se ubican bajo el término "lago cálido polimíctico continuo". Por otra parte, el término lago "circadiomíctico" propuesto por Reynolds (1997) corresponde a la situación que ocurre localmente en Pátzcuaro, donde la estratificación térmica desarrollada durante las horas de la mañana termina en la tarde con la aparición de vientos que mezclan la columna de agua completamente. La definición de tres áreas diferentes (A-C) sugiere una mezcla horizontal limitada, especialmente para el área C y las estaciones 8-10 con una marcada condición somera en la línea de costa.

Sin duda, la ocurrencia de cambios más sutiles en los trópicos en torno a la temperatura y sus consecuencias en el medio acuático, demanda herramientas metodológicas más precisas y minuciosas como indican las investigaciones realizadas por Melack (1979, 1996) y MacIntyre y Melack (1988) en Brasil, lo que va más allá de los objetivos del presente trabajo de tesis.

Información existente sobre Fitoplancton, Estado Trófico y Contaminación del Lago

Chacón (1989, 1992, 1993a, 1993b) presenta un esquema de áreas tróficas dentro del lago que -si bien muestra una cierta variación interna en el cuerpo de agua con zonas oligotróficas hasta hipereutróficas-, no concuerda con la tabla sinóptica de variables físicas y químicas del agua que el mismo autor presenta por otro lado, donde la inclusión de valores sin rangos refleja una condición ambiental homogénea. De acuerdo con el citado autor, la explicación de una mayor concentración de clorofila en el seno Quiroga sugiere una relación causa-efecto asociada a la transportación por corrientes de materiales orgánicos desde el litoral sur. Dicho esquema parte de una imagen de satélite representativa de un momento fijo en el tiempo (imagen del 17 de Febrero de 1987 del SPOT XS) a pesar de una información de campo obtenida en un amplio sentido espacial y temporal (24 estaciones de muestreo, 500 muestras analizadas y 10 años de trabajo; Chacón 1993b).

Resultados preliminares obtenidos por Hernández et al. (en prensa) para el lago de Pátzcuaro indican sorpresivamente una condición crítica de falta de nutrientes disueltos en el agua del lago, en áreas definidas anteriormente como

eutróficas (Chacón 1989, 1991, 1993a, 1993b) que presuponen lo contrario. La TGEL, en su versión más contemporánea (Chacón op. cit.) considera que la eutroficación adquiere proporciones de contaminación del lago y procede de fuentes no-puntuales por su asociación con la entrada masiva de sedimentos, fertilizantes y agroquímicos vertidos en la cuenca de drenaje. Sin embargo, los datos de clorofila-a obtenidos por diversos autores a lo largo del tiempo para Pátzcuaro representan muestras informativas del espacio y momento preciso en que fueron obtenidas por una variabilidad extrema en la composición fitoplancton, como se explica más adelante. A pesar de lo anterior, los datos obtenidos en la presente investigación presentan consistencia en el registro de una mayor concentración de clorofila-a en las áreas marginales (23 a 103 µg/l en promedio, ver artículo 4, Tabla 2) asociadas al vertimiento de aguas residuales en Pátzcuaro y Erongarícuaro. Como un indicador de dicha contaminación puntual, la distribución del lirio acuático está restringido al área del Embarcadero de Pátzcuaro y no representa un problema generalizado en todo el lago.

Este último autor destaca asimismo, la aparición reciente de afloramientos algales en el seno Quiroga como una consecuencia de las actividades humanas circundantes y el acarreo por corrientes de materiales orgánicos procedentes de la zona sur. En este sentido, retoma la TGEL una vez más para asociar "azolvamiento" y eutroficación. Sin embargo, Ancona et al. (1940), Tellez y Motte (1980) y Rosas et al. (1993) reportan la aparición de este fenómeno en el lago para esta época particular del año desde hace varias décadas, no como un fenómeno de aparición reciente.

La intervención de especialistas en el estudio del fitoplancton revela una perspectiva diferente. Una percepción de la composición del fitoplancton como heterogénea en espacio y tiempo (Rosas et al. 1993) converge con los datos obtenidos por Téllez y Motte (1980) y Sládecek y Vilaclara (1993). Los últimos autores, especialmente, se percataron de la diferencia entre muestras superficiales de fitoplancton obtenidas bajo dos condiciones meteorológicas extremas: viento entre las 15:00 y 17:00 P.M. (Octubre 5, 1985) y calma en un día soleado entre las 8:00 y 10:00 A.M. (Octubre 6, 1985). En esta última condición, "el afloramiento algal se elevó al nivel de la superficie" para modificar los componentes del fitoplancton susceptibles de ser muestreados. Asimismo, en el análisis de muestras procedentes de las partes sur y centro del lago evaluaron diferencias de eutroficación (ligera, media y fuerte).

En función de las variaciones espaciales y temporales observadas en la comunidad del fitoplancton, Rosas et al. (1993) consideró al lago de Pátzcuaro como "mesotrófico" como fue el caso de Jaczewsky y Volsi (1931).

Bradbury (2000) considera que a pesar de la cantidad de estudios realizados sobre la limnología de Pátzcuaro, los estudios del fitoplancton carecen de datos en series de tiempo. Es decir, el estudio de la distribución y abundancia del fitoplancton requiere de una frecuencia en el muestreo acorde a la variabilidad observada y una planificación a largo plazo orientada a la obtención de datos continuados, de lo cual no existe precedente.

Experimentos de Laboratorio

Hernández et al. (en prensa) llevaron a efecto un estudio experimental basado en el crecimiento de *Selenastrum capricornutum* como organismo de prueba (USEPA 1978), e incluyeron 30 casos de estudio en la Mesa Central para definir el nutriente limitante de la productividad y los potenciales de crecimiento algal (PCA). El autor de la presente tesis incluyó el caso del lago de Pátzcuaro, entre otros del Estado de Michoacán. De manera contraria a la generalidad de sistemas acuáticos de la zona templada donde el fósforo (P) limita la productividad acuática, en la región mencionada se presentan tres escenarios: a) el nitrógeno (N) toma un papel preponderante como limitante de la producción, b) ocurren variaciones espaciales o temporales entre N y P en su papel como nutrientes limitantes y c) hay un efecto de colimitación entre N y P. Planas & Moreau (1990) sugieren una relación $TN:TP < 5$ favorable para el nitrógeno como nutriente limitante de la productividad. Sin embargo, la composición de las fracciones presentes en el agua (disuelta, coloidal y particulada) involucra una parte coloidal por arriba de la generalidad de los lagos que limita el valor informativo de la relación N:P para inferir cual es el nutriente limitante de la productividad acuática. De hecho, la concentración de N y P soluble cerca del límite de detección coincide con el estado de colimitación entre ambos elementos determinado experimentalmente. Es decir, las bajas concentraciones de N y P inclinan fácilmente el balance de la limitación ya sea hacia un elemento o hacia el otro.

El artículo 5 de la presente tesis incluye una ampliación de los trabajos experimentales realizados por Hernández et al. (en prensa), específicamente

para Pátzcuaro. En este caso se incluyen siete sitios de muestreo distribuidos en diversas partes del lago (cinco al interior del cuerpo de agua y dos en zonas marginales), así como cuatro fechas de muestreo (dos en la época de lluvias: Agosto y Septiembre 1998; dos en la época de secas: Mayo y Junio 1999). Los resultados obtenidos de las estaciones localizadas a lo interno del cuerpo de agua (zona limnética) corroboran la información de Hernández (et al.) en cuanto a un aumento en el PCA durante la época de sequía (0 a 322% de aumento máximo promedio con respecto a los controles durante la incubación), con el caso aislado de una sola estación y tiempo sin crecimiento (estación 3, Mayo 1999). En contraste, la temporada de lluvia (0 a 45%) incluye tres estaciones sin un crecimiento significativo (1, 3 y 5). Las estaciones 6 y 7 registraron en ocasiones los PCA más elevados por su asociación con el vertimiento de aguas residuales en Pátzcuaro y Erongarícuaro. Por otra parte, la determinación del nutriente limitante de la productividad señala nuevamente una colimitación entre N y P de manera consistente en la mayor parte de las muestras analizadas.

Las pruebas experimentales realizadas también rechazan la TGEL con base en la cual se esperarían mayores PCA's en la época de lluvias por una contaminación no-puntual propiciada por el acarreo de subproductos agrícolas utilizados en la parte terrestre.

Consideraciones Suplementarias sobre Índices de Estado Trófico

Welch (1980) considera que la concentración de clorofila-a, la profundidad del disco de Secchi, la concentración de fósforo total y el déficit de oxígeno en el hipolimnion de un lago representan las características primarias de la expresión

de estado trófico en los lagos. Obviamente, el conjunto de índices de estado trófico asumen la generalidad de un lago con una profundidad suficiente como para que se desarrolle un hipolimnion y que la turbidez del agua sea derivada de la densidad fitoplanctónica. Adicionalmente, también se asume que el P es el elemento limitante de la producción primaria del ecosistema. Dichos preceptos no resultan aplicables en el caso de Pátzcuaro debido a que la atenuación de luz es ocasionada, en una mayor parte, por la resuspensión de sedimentos en la columna de agua para hacer cuestionable la utilidad de las lecturas del disco de Secchi como índice de la producción del fitoplancton. Por su parte, el fósforo total como índice contempla lagos donde el elemento limitante de la productividad primaria es el fósforo, lo que en México -así como en otros países tropicales- no es siempre el caso (Hernandez et al. en prensa). Particularmente en el Lago de Pátzcuaro, tanto Ceballos (1994) como los resultados obtenidos durante el presente estudio coinciden en identificar una sobreestimación de biomasa algal a través del fósforo total o la profundidad del disco de Secchi comparativamente con los valores obtenidos de clorofila-a, debido, como ya se mencionó con antelación, a la limitante ejercida por la resuspensión de sedimentos. Este hecho confirma el punto de vista de Welch (1980) en el sentido que la clorofila-a representa la medición más específica y versátil de biomasa algal y, por lo tanto, del estado trófico del lago.

CONCLUSIONES

1. Los datos sobre las variaciones del nivel del lago de Pátzcuaro en su forma original, apoyaron la TGEL en tanto que la única explicación para una reducción de la profundidad máxima a lo largo de las últimas décadas en condiciones de un nivel relativamente estable, radica en la incorporación de sedimentos provenientes de la cuenca terrestre. Sin embargo, la verificación de los bancos de nivel que constituyen la referencia de los referidos datos, condujo a la detección de desviaciones significativas con respecto a los valores reales de los datos tanto en el riel del ferrocarril de Pátzcuaro como la escala de nivel de Santa Fé. La recomposición general de la información permitió el reconocimiento de fluctuaciones de nivel tanto a corto plazo (estacionales) como a largo plazo (40 años aproximadamente), que en este último caso abarcan una amplitud del orden de seis metros entre 1939 y la actualidad.
2. Con base en lo anterior, el descubrimiento de fluctuaciones de nivel paralelas en el componente de largo plazo para cuatro lagos de la región ubicados en cuencas diferentes (Bernal-Brooks y MacCrimmon 2000) respalda la existencia de una influencia común en las cuencas lacustres traducida como un fenómeno de sensibilidad climática. Es decir, el nivel del agua en los lagos depende de la cantidad de lluvia adicionada a las cuencas lacustres de manera determinante.
3. El análisis de la entrada de agua de lluvia al lago, tanto de forma directa como indirecta, y su efecto en el cambio de nivel del lago, involucra una

- relación directa ($r^2 = 0.92$; $n = 27$) que destaca nuevamente la importancia de las precipitaciones pluviales en el ciclo hidrológico.
4. El cálculo del número y densidad de canales portadores de escorrentías en la cuenca de drenaje, destaca el efecto de la incorporación de lluvia en la cuenca terrestre al grado que adquiere una dimensión destructora de la red hidráulica en las subcuencas V y VIII.
 5. La restitución de imágenes del lago a partir de fotomosaicos de fotografías aéreas y el análisis de imágenes de satélite resultan congruentes con los movimientos de nivel del lago, de tal manera que la imagen de 1974 presenta la mayor área total con respecto a otras épocas de menor nivel en el agua y una superficie menor del cuerpo de agua.
 6. Bradbury (2000) reporta niveles de sedimentación en el lago congruentes con el punto de vista del factor climático como una influencia más determinante en el cambio morfométrico del lago de Pátzcuaro.
 7. La erosión de la cuenca terrestre (Gómez-Tagle 1997), aparentemente contradictoria con los niveles mínimos de sedimentación reportados por Bradbury (2000), requiere de mayor investigación para definir los mecanismos de liberación del sedimento en áreas deforestadas, así como su transporte y distribución posterior hacia las partes bajas de la cuenca y al interior del mismo lago.
 8. El lago presenta un mosaico ambiental en su interior que involucra variaciones espaciales y temporales en tres áreas (A-C) y cuatro etapas temporales (I-IV) definidas por el análisis de cúmulos, es decir, el reflejo de un medio acuático heterogéneo. Durante la época de secas, los

componentes iónicos mayores aumentan en concentración por efecto de la evaporación predominante; mientras la incorporación de lluvia en el lago ocasiona un efecto de dilución que disminuye las concentraciones del contenido iónico así como la conductividad y la transparencia del disco de Secchi.

9. La dinámica térmica de Pátzcuaro coincide con el término "cálido polimíctico continuo" de la clasificación modificada por Lewis (1983) a partir de Hutchinson y Löffler (1956) y Hutchinson (1957). Asimismo coincide con el término "circadiomictico" de una reciente clasificación propuesta por Reynolds (1997), donde la estratificación térmica desarrollada durante las horas de la mañana desaparece con la mezcla producida por vientos durante la tarde
10. Los bioensayos, de manera general, asocian un mayor potencial de crecimiento algal a la época de secas. En contraparte el crecimiento en la temporada de lluvias es relativamente nulo, lo que respalda el efecto de dilución inducido por la lluvia en el lago de acuerdo con la información de campo (ver artículo 4). Asimismo, indican un efecto de colimitación consistente entre N y P.
11. En función de los incisos anteriores, la TGEL no encontró soporte sobre una incorporación masiva de sedimentos en la cuenca lacustre de Pátzcuaro y más bien, la cantidad de sólidos suspendidos aumenta de manera general durante la época de sequía (menor nivel del lago, menor profundidad, más viento). En otras palabras, la resuspensión de materiales presentes dentro del vaso lacustre le confieren la característica

de ser un "lago turbio" y no factores externos como un posible acarreo de materiales por erosión.

12. Los índices de estado trófico, específicamente la profundidad del disco de Secchi y la concentración de fósforo total, resultan inadecuados para este caso de estudio como índices de estado trófico por la interferencia que ocasiona la resuspensión de sedimentos en la columna de agua. La clorofila-a, como un proxy de la producción primaria lacustre, representa un índice apropiado bajo las condiciones de estudio.

13. La presente tesis involucra un cambio en el paradigma de la limnología del lago de Pátzcuaro. La TGEL propuesta por el Dr. De Buen hace seis décadas influyó en el pensamiento de los seguidores posteriores de esta base conceptual al grado que buscaron justificar a toda costa los datos de campo obtenidos y conformar su interpretación a un funcionamiento del vaso lacustre previamente definido. La proyección del pensamiento limnológico del ámbito geológico a las décadas parecía, de hecho, adecuada a la condición particular de baja profundidad existente en los lagos de la Mesa Central de México, interpretada como una evolución lacustre avanzada con un factor de aceleración en la deforestación circundante. A diferencia de lo anterior, la presente tesis pone a consideración el argumento propuesto originalmente por Hutchinson (1956) de sensibilidad climática y los cambios de nivel en el lago como la causa principal de las modificaciones ocurridas a la morfometría lacustre en las últimas décadas. El material fotográfico anexo ratifica, asimismo, esta visión alternativa de la limnología de Pátzcuaro.

REFERENCIAS

- Alcocer-Durand, J., Chávez-Arteaga, M., y Escobar-Briones, E. 1993. La limnología en México (historia y perspectiva futura de las investigaciones limnológicas). *Ciencia* **44**: 441-453
- Alcocer, J. y Lugo, A. (2002). Is the limnological dynamics of tropical Lake Alchichica affected by EL Nino Southern Oscillation?. *Geofísica Internacional*. en prensa.
- Alvarado, J., Zubieta, T., Ortega, R., Chacón, A., y Espinoza, R. 1985. Hipertroficación de un lago tropical somero (Lago de Cuitzeo, Michoacán, México). *Boletín Depto. Biól. UMSNH* **1**: 1-22
- Alvarez, J. 1972. Ictiología Michoacana. V. Origen y distribución de la ictiofauna dulceacuícola de Michoacán. *An. Esc. Nac. Cienc. Biól. (México)* **19**: 155-161.
- Ancona, I., Batalla, M.A., Caballero, E., Hoffman, C.C., Llamas, R., Martín del Campo, R., Ochoterena, I., Rioja, E., Roca, J., Sámano, A., Vega, C., y Villagrán, F. 1940. Prospecto biológico del lago de Pátzcuaro. *An. Inst. Biól. (Méx.)* **11**: 415-513
- Argueta, A. 1979. Una visión bibliográfica general de la cuenca lacustre de Pátzcuaro, Michoacán. Manuscrito. 13p.
- Arredondo, J.L. 1987. Bosquejo histórico de las investigaciones limnológicas realizadas en los lagos mexicanos, con especial énfasis en su ictiofauna. En: *Contribuciones en Hidrobiología*. Editado por Gómez-Aguirre, S., y Arenas-Fuentes, V. Memorias de la reunión "Alejandro Villalobos" llevada a efecto en la Ciudad de México, 24-26 Octubre 1983.
- Barbour, C.D., 1973. A biogeographical history of *Chirostoma* (Pisces: Atherinidae): a species flock from the Mexican plateau. *COPEIA* **3**: 533-556
- Barrera, N. 1992. Ecogeografía. En: *Patzcuaro 2000*. Editado por Toledo, V.M., Alvarez-Icaza, P., y Avila, P. Fundación Friedrich Ebert Stiftung, Mexico, D.F. pp. 11-35.
- Bernal-Brooks, F.W. 1998. The lakes of Michoacan (Mexico): a brief history and alternative points of view. *Freshwater Forum* **10**: 20-34.
- Bernal-Brooks, F.W., y MacCrimmon, H.R. 2000. Lake Zirahuén (Mexico): an assessment of the morphometry change based on evidence of water level fluctuations and sediment inputs. En: *Aquatic Ecosystems of Mexico: Status and Scope*. Editado por Munawar, M., Lawrence, S., Munawar, I., y Malley, D. Ecovision World Monograph Series, Backhuys Publishers. The Netherlands. 61-76
- Bradbury, J.P. 2000. Limnologic history of Lago de Patzcuaro, Michoacán, México for the past 48,000 years: impacts of climate and man. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* **163**: 69-95
- Ceballos, E. 1994. Diagnóstico del estado trófico del Lago de Pátzcuaro, Michoacán, México. Tesis Profesional. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- CETENAL (Centro de Estudios sobre el Territorio Nacional), 1974. Banco de nivel geodésico BNT601.

- CETENAL (Centro de Estudios sobre el Territorio Nacional), 1987. Cartas topográficas E14A21, E14A22, E14A31 AND E14A32. 3ª Edición.
- Chacón, A. 1989. A limnological study of Lake Patzcuaro, Mexico, with a consideration of the applicability of remote sensing techniques. Tesis de Doctorado, Stirling University, Scotland.
- Chacón, A., 1992. El Ecosistema Lacustre. En: Patzcuaro 2000. *Editado por* Toledo, V.M., Alvarez-Icaza, P. y Avila, P. Fundación Friedrich Ebert Stiftung, Mexico, D.F. pp. 37-70.
- Chacón, A. 1993a. El Lago de Pátzcuaro, Michoacán, México. Bosquejo de un Lago Amenazado. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Chacón, A. 1993b. Lake Patzcuaro, Mexico: watershed and water quality deterioration in a tropical high-altitude Latin American Lake. *Lake Reserv. Manage.* **8**: 37-47.
- Chacón, A., y Muzquiz, E. 1991. El Lago de Zirahuén, Michoacán, México. Reconocimiento ambiental de una cuenca Michoacana. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Chacón, A., Pérez, R., y Muzquiz, E. 1991. Síntesis limnológica del Lago de Pátzcuaro, Michoacán, México. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Chacón, A., Rosas-Monge, C., y Alvarado-Díaz, J. 2000. The effects of hypereutrophication in a tropical Mexican lake. En: *Aquatic Ecosystems of Mexico: Status and Scope. Editado por* Munawar, M., Lawrence, S., Munawar, I., y Malley, D. *Ecovision World Monograph Series*, Backhuys Publishers. The Netherlands. pp. 89-101
- Contreras-Balderas, S., y Lozano-Vilano, M.L. 1993. Ictiodiversidad, peces amenazados y disponibilidad de agua para el desarrollo en zonas áridas del norte de México. *Publicaciones Biológicas. F.C.B./U.A.N.L. Suplemento 1*: 40-49
- Cruz, O. 1995. Balance hídrico en la cuenca del lago de Zirahuén. Tesis de licenciatura, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- De Buen, F. 1939. Huevos, crías, larvas y jóvenes de *Chirostoma* en el lago de Pátzcuaro. *Trabajos. Est. Limn. Pátzcuaro (México)*. 14 p.
- De Buen, F., 1941a. Dos cortas campañas limnológicas en el lago de Patzcuaro (febrero y julio de 1941). *Invest. Est. Limn. Pátzcuaro (México)* **10**: 1-16
- De Buen, F., 1941b. El lago de Pátzcuaro. *Inst. Panamer. Geogr. Rev. Geogr.* **1**: 20-44.
- De Buen, F. 1941c. Las variaciones físicas y químicas de las aguas del lago de Pátzcuaro (st. X) desde octubre de 1939 a marzo de 1941. *Invest. Est. Limn. Pátzcuaro (México)* **7**: 1-25.
- De Buen, F. 1943. Los lagos michoacanos. I. Caracteres generales. El lago de Zirahuén. *Rev. Soc. Mex. Hist. Nat.* **4**: 211-232.
- De Buen, F., 1944a. Limnobiología de Patzcuaro. *Anal. Inst. Biol. (México)* **15**: 261-312.
- De Buen, F., 1944b. Los lagos michoacanos. II. El lago de Patzcuaro. *Rev. Soc. Mex. Hist. Nat.* **5**: 99-125.

- Deevey, E.S. 1957. Limnological studies in Middle America with a chapter on Aztec limnology. *Trans. Conn. Acad. Arts Sci.* **39**: 213-328.
- Demant, A. 1975. Les quatre provinces volcaniques du Mexique, relations avec l'évolution géodynamique, depuis le Cretace, II. Les deux provinces occidentales. *C.R. Acad. Sc.* **280**: 1437-1440.
- Díaz-Barriga, H., y Bello-Gonzalez, M.A. 1993. Contribución al conocimiento de la flora de la cuenca del lago de Pátzcuaro. SARH. Libro técnico no. 1.
- Fernandez, J. 1936. Pátzcuaro, su situación, historia y características con un plano pictórico de la ciudad. Secretaría de Hacienda y Crédito Público.
- Fritz, S.C., Cumming, B.F., Gasse, F., y Laird, K. 1999. Diatoms as indicators of hydrologic and climatic change in saline lakes. En: *The Diatoms. Applications for the environmental and earth sciences. Editado por Stoermer, E.F., y Smol, J.P.* Cambridge University Press. Cambridge. pp. 41-72.
- García, E. 1988. Modificaciones al sistema climático de Köppen. Talleres de offset Larrios, S.A. México, D.F.
- Goldman, C.R. 1988. Primary productivity, nutrients, and transparency during the early onset of eutrophication in ultra-oligotrophic Lake Tahoe, California-Nevada. *Limnol. Oceanogr.* **33** (6, part 1), 1321-1333.
- Gomez-Tagle, A. 1997. Levantamiento Agrológico Forestal de la Cuenca de Patzcuaro, Mich., y Diagnóstico de Posibilidades de Recuperación y Desarrollo mediante Sistemas de Información Geográfica. Tesis de Doctorado. UNAM.
- Gorenstein, S., y Pollard, H. 1983. The tarascan civilization: the late prehispanic cultural system. *Vanderbilt University Publications in Anthropology* **28**. Nashville, USA.
- Hernández, S., Bernal-Brooks, F.W., Velarde, G., Ortiz, D., Lind, O., y Dávalos-Lind, L. (en prensa). The algal growth potential and limiting nutrient of 30 lakes and reservoirs of the Mesa Central of Mexico. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* **27**
- Herrera, E. 1979. Características y manejo del Lago de Pátzcuaro, Michoacán. Tesis de licenciatura. UNAM.
- Hudak, A.T., y Wessman, C.A. 1998. Textural analysis of historical aerial photography to characterize woody plant encroachment in South African Savanna. *Remote Sens. Environ.* **66**: 317-330
- Hutchinson, G.E. 1957. *A treatise on limnology*. I. John Wiley & Sons, Inc., N.Y. 1015p.
- Hutchinson, G.E. 1969. Eutrophication, past and present. En: *Eutrophication: causes, consequences, correctives. Editado por National Academy of Sciences.* pp. 17-26
- Hutchinson, G.E., y Löffler, H. 1956. The thermal classification of lakes. *Proc. Nat. Acad. Sci.* **42**: 84-86
- Hutchinson, G. E., Patrick, R., y Deevey, E.S. 1956. Sediments of Lake Patzcuaro, Michoacan, Mexico. *Bull. Geol. Soc. Am.* **67**: 1491-1504
- Israde, I. y Garduño, V.M. (1997). Neogene diatoms of the central sector of the Mexican Volcanic Belt (Cuitzeo Lake) and its relationship with the volcanic-tectonic evolution. *Quaternary International* (in press).

- Kadmon, R., y Harari-Kremer, R. 1999. Studying long-term vegetation dynamics using digital processing of historical aerial photographs. *Remote Sens. Environ.* **68**: 164-176
- Lara, A. 1980. Introducción de nuevas especies al lago de Pátzcuaro y su posible perjuicio a las especies nativas. *Memorias del Segundo Simposio Latinoamericano de Acuacultura*. pp. 489-524
- Lewis, W.M. 1978. Dynamics and succession of the phytoplankton in a tropical lake, Lake Lanao, Philippines. *J. Ecol.* **66**: 849-880
- Lindeman, R.L. 1941. Seasonal food-cycle dynamics in a senescent lake. *Am. Nat.* **26**: 636-673
- López, G. 1982. Dinámica hidrológica del lago de Zirahuén. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa.
- MacIntyre, S. y Melack, J. 1988. Frequency and depth of mixing in an Amazon floodplain lake (L. Calado. Brasil). *Verh. Internat. Verein. Limnol.* **23**: 80-85
- Margalef, R. 1983. *Limnología*. Ediciones Omega, Madrid, España.
- Matsui, I., y Yamashita, T. 1936a. Informe acerca del establecimiento del laboratorio limnológico de Pátzcuaro. *Bol. Forestal y de Caza y Pesca*. Año I, no. 4. p. 175
- Matsui, I., y Yamashita, T. 1936b. Informe de los doctores Matsui y Yamashita acerca del lago de Pátzcuaro. *Bol. Forestal y de Caza y Pesca*. Año I, no. 3. p. 166
- Matsui, I., y Yamashita, T. 1937. Proyecto de los trabajos que se desarrollarán en la Estación Limnológica de Pátzcuaro, Mich. *Bol. Forestal y de Caza y Pesca*. Año II, no. 6. p. 145
- Melack, J. 1979. Temporal variability of phytoplankton in tropical lakes. *Oecologia* **44**: 1-7
- Melack, J. 1996. Recent developments in tropical limnology. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* **26**: 211-217
- Mendivil, O., Cortéz, R., Cuevas, C., y García, J.L. 1980. Algunos aspectos fisicoquímicos y consideraciones sobre la pesca en el lago de Cuitzeo, Mich. (estudio trimestral 1976-1977). *Memorias del 2º Congreso Latinoamericano de Acuacultura*. 1745-1782
- Metcalf, S., Street-Perrot, F.A., O'Hara, S., y Hales, P.E. 1994. The paleolimnological record of environmental change: examples from the arid frontier in Mesoamerica: En: *Environmental change in drylands: biogeographical and geomorphological perspectives*. Editado por Millington, C. y Pye, K. John Wiley & Sons. pp. 131-145
- Miller, M. E. 1999. Use of historic aerial photography to study vegetation change in the Negrito Creek watershed, southwestern New Mexico. *Southwest. Nat.* **44**: 121-137
- Mortimer, C.H. 1941-1942. The exchange of dissolved substances between mud and water in lakes. *J. Ecol.* **29**: 280-329, **30**: 147-201
- O'hara, S.L. 1991. Late Holocene environmental change in the basin of lake Patzcuaro, Michoacan, Mexico. Tesis de Doctorado, Oxford University.



- Ordoñez, P., Pérez, A., Traconis, S., y Rojas, A. 1982. Características limnológicas y clasificación trófica del Lago de Zirahuen, Mich. En: Memorias del Tercer Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria, 22-24 de Septiembre de 1982. Acapulco, Gro. 17p.
- Osorio-Tafall, B.F. 1941. Materiales para el estudio del microplancton del lago de Pátzcuaro (México). *Anal. Esc. Nac. Cienc. Biol. (México)*. **2**: 331-384.
- Osorio-Tafall, B.F. 1944. Biodinámica del lago de Pátzcuaro. I. Ensayo de interpretación de sus relaciones tróficas. *Rev. Soc. Mex. Hist. Nat.* **5**: 197-227
- Padisák, J. 1993. The influence of different disturbance frequencies on the species richness, diversity and equitability of phytoplankton in shallow lakes. En: *Intermediate Disturbance Hypothesis in Phytoplankton Ecology*. Editado por Padisák, J., Reynolds, C.S. y Sommer, U. Kluwer Academic Publishers. pp.135-156
- Planas, D., y Moreau, G. 1990. Natural eutrophication in a warm volcanic lake. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* **24**: 554-559.
- Reynolds, C.S. 1997. *Vegetation processes in the pelagic: a model for ecosystem theory*. Ecology Institute, Oldendorf/Luhe, Germany.
- Rodhe, W. 1969. Crystallization of eutrophication concepts in Northern Europe. En: *Eutrophication: causes, consequences, correctives*. Editado por National Academy of Sciences. pp. 17-26
- Rosas, I., Velasco, A., Belmont, R., Baez, A., y Martínez, A. 1993. The algal community as an indicator of the trophic status of Lake Pátzcuaro, México. *Environmental Pollution* **80**: 255-264.
- Rosas, M. 1976. Datos biológicos de la ictiofauna del lago de Pátzcuaro, con especial énfasis en la alimentación de sus especies. Memorias del Simposio sobre Pesquerías en Aguas Continentales. pp. 299-366
- SARH (Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos), 1949-1970. Niveles de agua del Lago de Pátzcuaro. (2ª serie de tiempo).
- SARH (Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos), 1950-1987. Niveles de agua del Lago de Pátzcuaro. (3ª serie de tiempo).
- SARH (Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos), 1984. Estudio batimétrico del Lago de Pátzcuaro. Residencia de Estudios en Erongarícuaro. SARH, inédito.
- SCT (Secretaría de Comunicaciones y Transportes), 1986-1990. Niveles de agua del Lago de Pátzcuaro. (4ª serie de tiempo).
- SDAF (Secretaría de Desarrollo Agropecuario y Forestal), 1989-. Niveles de agua del Lago de Pátzcuaro (5ª serie de tiempo).
- SPP (Secretaría de Programación y Presupuesto), 1979. Cartas edafológicas E14A21 y E14A22.
- Sheehan, P.J. 1984. Effects on Community and Ecosystem Structure and Dynamics. En: *Effects of Pollutants at the Ecosystem Level*. Editado por Sheehan, P., Miller, D., Butler, G., y Bordeau, P. Scientific Committee on Problems in the Environment. pp. 51-99.
- Sládeček, V. y Vilaclara, G. 1993. A water-bloom in Lake Pátzcuaro (Michoacán, México). *Verh. Internat. Verein. Limnol.* **25**: 431-434

- SMN (Servicio Meteorológico Nacional), 1922-1986. Variables climáticas registradas en la Estación Meteorológica 16087.
- Solórzano, A. 1955. La pesca en el lago de Pátzcuaro, Mich., y su importancia económica regional. Secretaría de Marina. Dir. Gral. De Pesca, México.
- Sommer, U. 1983. Nutrient competition between phytoplankton species in multispecies chemostat experiments. *Arch. Hydrobiol.* **96**: 399-416
- Tamayo, J.L., y West, R.C. 1964. The hidrology of Middle America. En: Handbook of Middle America Indians. Volume I. *Editado por* Wauchope, R., y West, R.C. University of Texas, Austin.
- Tellez, C., y Motte, O. 1980. Estudio planctonológico preliminar del lago de Pátzcuaro, Mich., México. Mayo de 1976. 2o. Simposio Lationoamericano de Acuacultura. pp. 1799-1836
- USEPA (US Environmental Protection Agency), 1978. The *Selenastrum capricornutum* Print algal assay bottle test: experimental design, application and data interpretation protocol. EPA-600/9-78-018. Corvallis, OR.
- Vega, C. 1940. Bibliografía analítica de los trabajos publicados acerca del lago de Pátzcuaro. En: Prospecto Biológico del Lago de Pátzcuaro. *An. Inst. Biól. (México)* **11**: 503-513
- Watts, W. y Bradbury, J.P. 1982. Paleoecological studies at Lake Patzcuaro on the west-central Mexican plateau and at Chalco in the basin of Mexico. *Quaternary Res.* **17**: 56-70.
- Webster, K.E., Soranno, P.A., Baines, S.B., Kratz, T.K., Bowser, C.J., Dillon, P.J., Campbell, P., Fee, E.J., y Hecky, R.E. 2000. Structuring features of lake districts: landscape controls on lake chemical responses to drought. *Freshwat. Biol.* **43**: 499-515
- Welch, E. 1980. Phytoplankton and controlling factors: Eutrophication. En: *Ecological Effects of Waste Water*. Cambridge University Press. 118-172
- Williams, W.D. 1993. The worldwide occurrence and limnological significance of falling water-levels in large, permanent saline lakes. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* **25**: 980-983
- Zozaya, M. 1940a. Informes de la Estación Limnológica de Pátzcuaro. Mayo 1940. 23pp.
- Zozaya, M. 1940b. Informes de la Estación Limnológica de Pátzcuaro. Junio 1940. 14pp.
- Zozaya, M. 1940c. La Estación Limnológica de Pátzcuaro. Departamento de la Marina Nacional, 18 p.
- Zozaya, M. 1941. Observaciones termoplumiométricas en Pátzcuaro, Mich. *Invest. Est. Limn. Pátzcuaro (México)* **2**: 1-14.

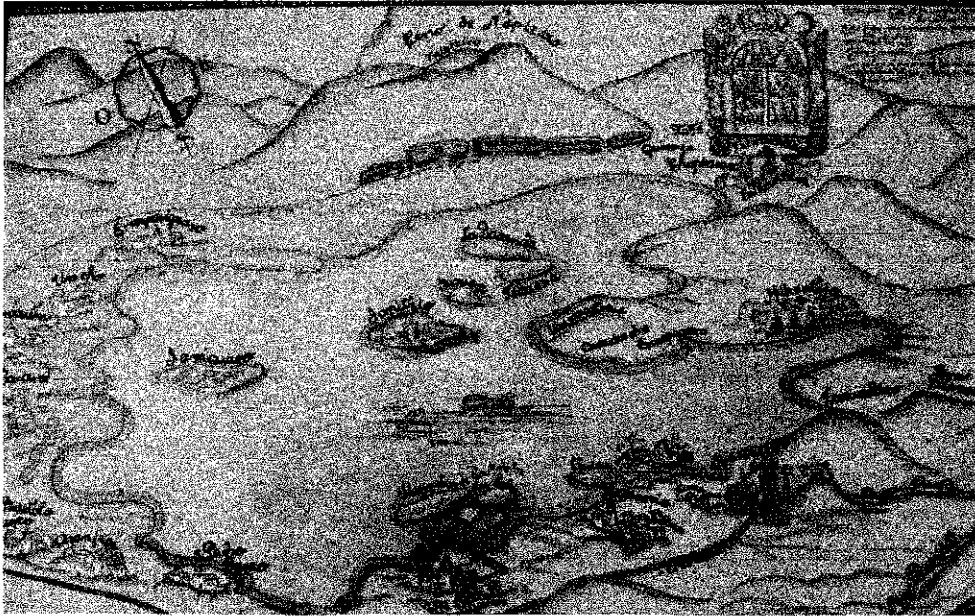
ANEXOS

“En realidad, toda teoría que no cambia en el plazo de sesenta años ya no es, por ese mismo hecho, igual a la teoría originaria del maestro; es una repetición fosilizada, y al ser una repetición es realmente una deformación.”

Erich Fromm (1900-1980)

EVIDENCIAS GRAFICAS SOBRE EL CAMBIO MORFOMÉTRICO EN EL LAGO DE PÁTZCUARO

Anexo 1: Pinturas y fotografías

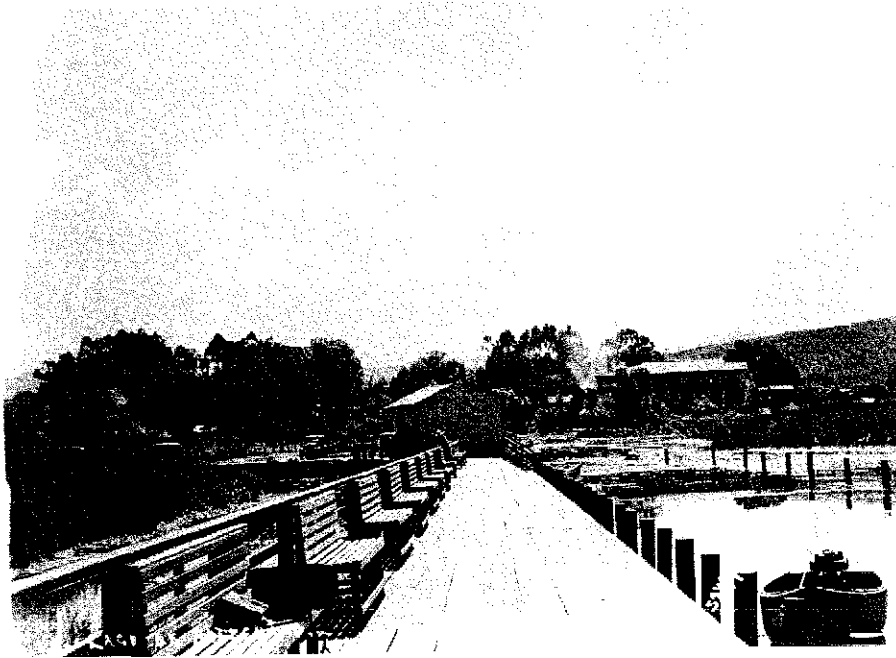


1a. Pintura del Lago de Pátzcuaro (Septiembre 1933) desde la perspectiva del Cerro del Estribo (Fernández 1936).



1b. Fotografía del lago de Pátzcuaro (1999) obtenida desde el Cerro del Estribo
Comentario: las islas de Urandén, en el margen sur del lago aparecen dentro del cuerpo de agua en 1a e integradas a tierra firme en 1b. Los canales producto del dragado alrededor de las islas mantienen artificialmente una apariencia insular.





2a. El embarcadero no. 2 (Aterio o Puerto de Chirimoyas) de Pátzcuaro a finales de la década de los 1930



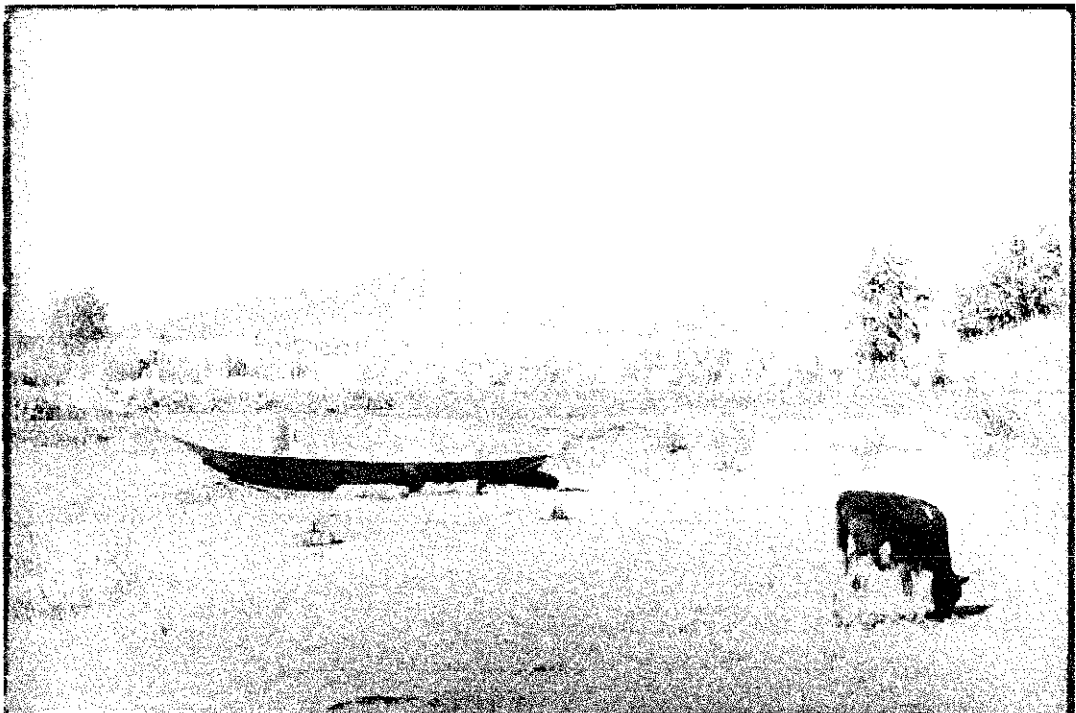
2b. El embarcadero principal de Pátzcuaro (1999)

Comentario: las partes con agua fueron reemplazadas por asfalto ante la evidente pérdida de nivel en el agua

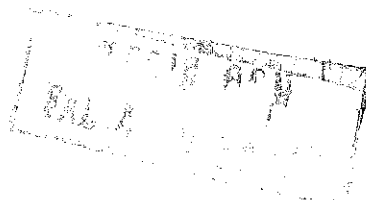
VENIS CON
FALLA DE ORIGEN



3a. El muelle viejo de Pátzcuaro a finales de los años 1930

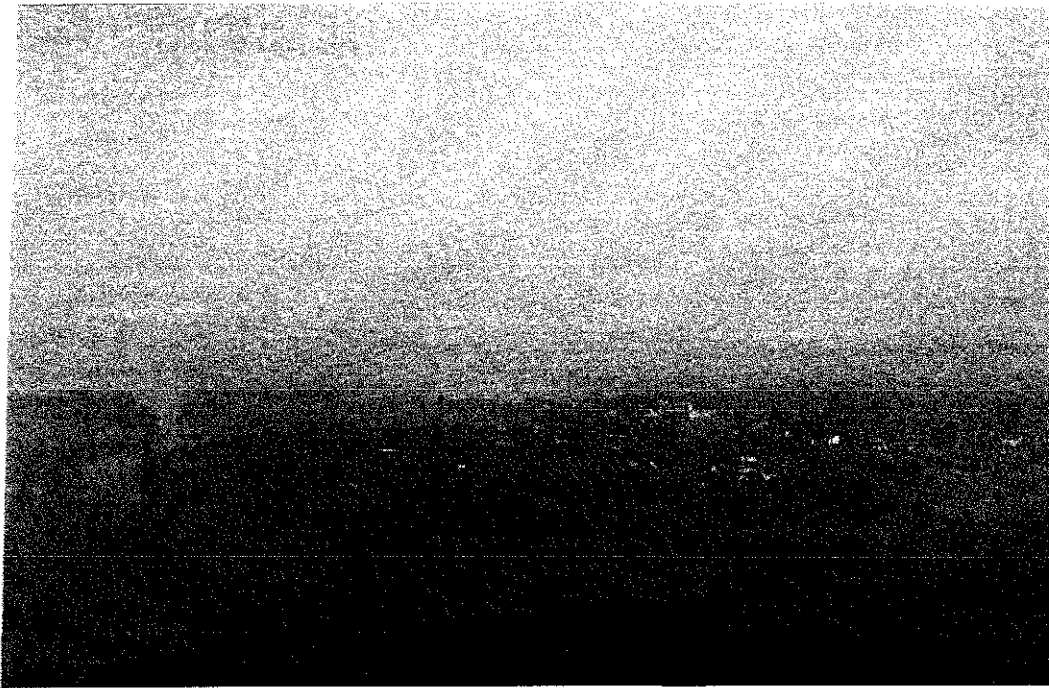


3b. El muelle viejo de Pátzcuaro en la actualidad, el canal que se aprecia en la fotografía es producto del dragado





4a. La isla de Urandén (ca. 1932). En la Isla de Janitzio todavía no aparece la estatua de Morelos.



4b. La isla de Urandén en la actualidad. El canal a su alrededor es producto de la excavación con dragas, de otra manera la zona estaría integrada a tierra firme.

TIENE CON
MAYOR DE OMBRA

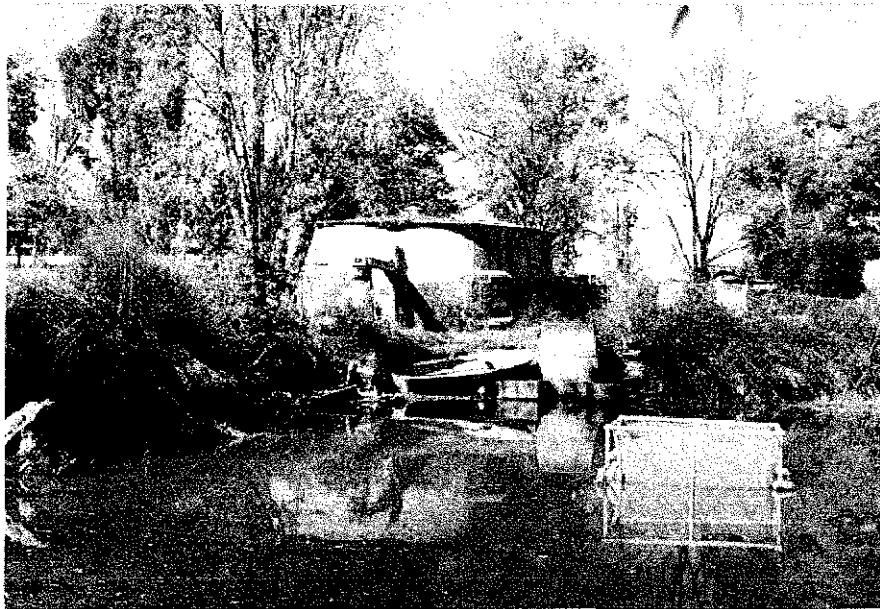


5a. Isla de San Pedrito ca. 1932



5b Isla de San Pedrito denominada como tal a finales de los 1930 y actualmente fuera del lago por recesión en el nivel del agua

RENTAL
SANTA ANA, CALIF.



6 Depósito original de agua de la Estación Limnológica de Pátzcuaro que eventualmente quedó aislado por la recesión en el nivel del lago a lo largo del tiempo



7 Embarcadero de la Isla de Jarácuaro construido a finales de los 1930, como vestigio de la existencia de un nivel de agua superior en aquella época



SONOR'S *Perfiles*

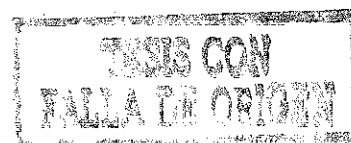
8a. Durante el movimiento ascendente de agua ocurrido en los 1970, el Biól. Mateo Rosas Moreno instaló corrales para el cultivo de carpa enfrente de la radiodifusora Radio Laser.



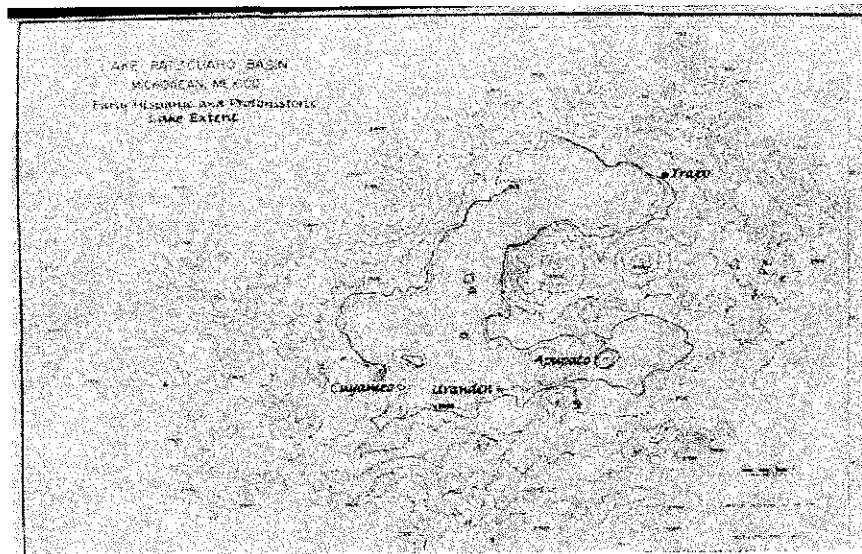
8b. El lugar situado frente a la radiodifusora Radio Laser actualmente.



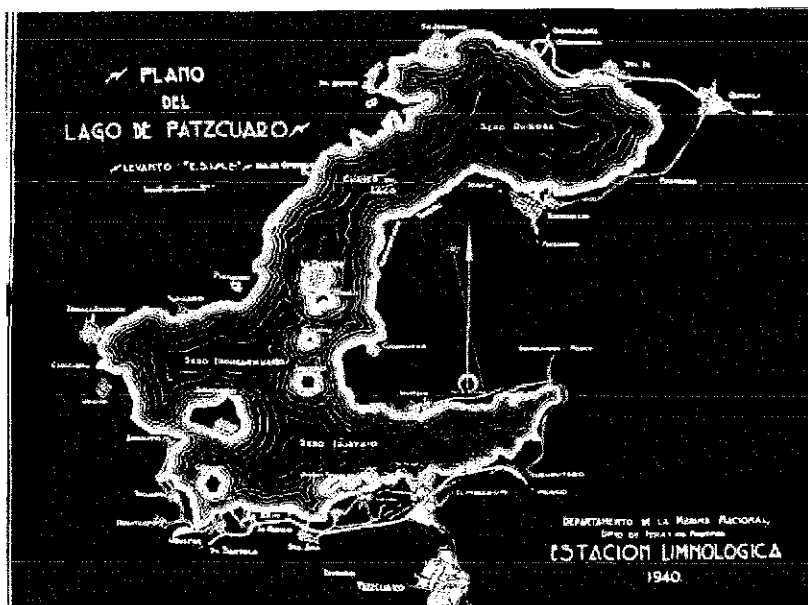
9. Regla de niveles en Santa Fe de la Laguna establecida por la Secretaría de Recursos Hidráulicos durante el movimiento ascendente de nivel ocurrido a entre las década de los 1960 y el trancurso de los 1970, actualmente fuera del lago por la recesión en el nivel del agua



Anexo 2. Mapas geográficos

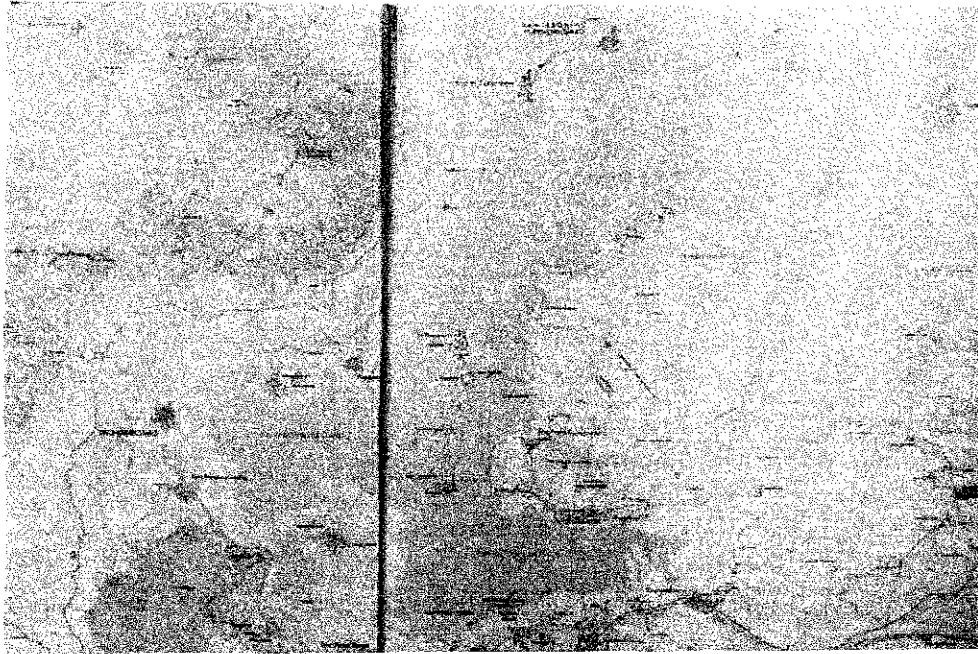


Gorenstein y Pollard (1983). Reconstrucción geográfica del lago a partir de pinturas de finales del siglo XVI



De Buen (1941). Mapa geográfico obtenido a través de un levantamiento de campo con teodolitos. Prácticas de campo de los estudiantes de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica del Instituto Politécnico Nacional (1938-39)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Mapa de las cartas topográficas de CETENAL (1987) a partir de fotografías aéreas de 1974

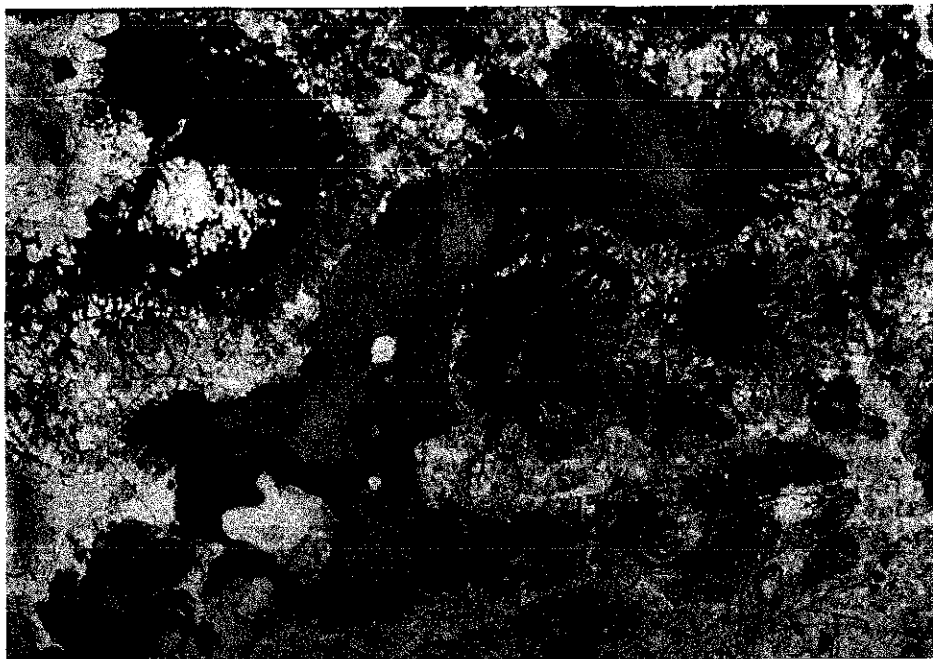
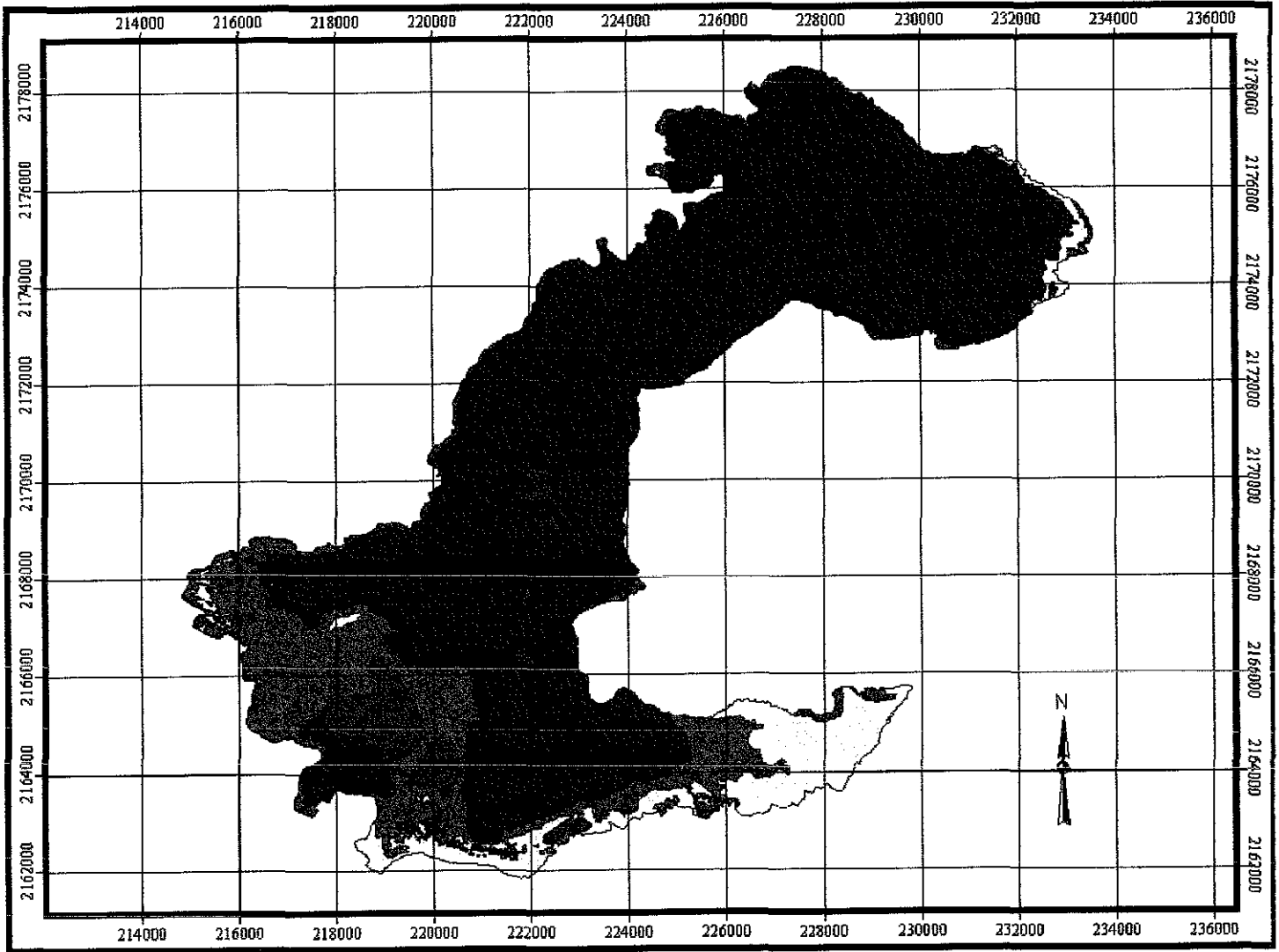


Imagen de satélite del lago de Pátzcuaro (1991)

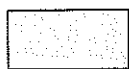



Anexo 3. Restituciones a partir de fotografías aéreas de 1969, 1974, 1986, 1991, 1995 e imagen de satélite de 2000 (Gómez-Tagle Chávez A. y Bernal-Brooks, F.W.)

Comentario: la Isla de Jarácuaro aumenta en área entre 1974 y 1995 por un descenso en el nivel del agua y asimismo desaparecen una serie de islas pequeñas en el litoral sur que se observan en el mapa reportado por De Buen (1941): Copujo, Carían, la Casa China y San Pedrito, para formar parte de tierra firme. Las islas de Urandén (Morales y Morelos) se mantienen en la actualidad como islas por el dragado de canales a su alrededor, como se demuestra a continuación:

Lago de Pátzcuaro 1969



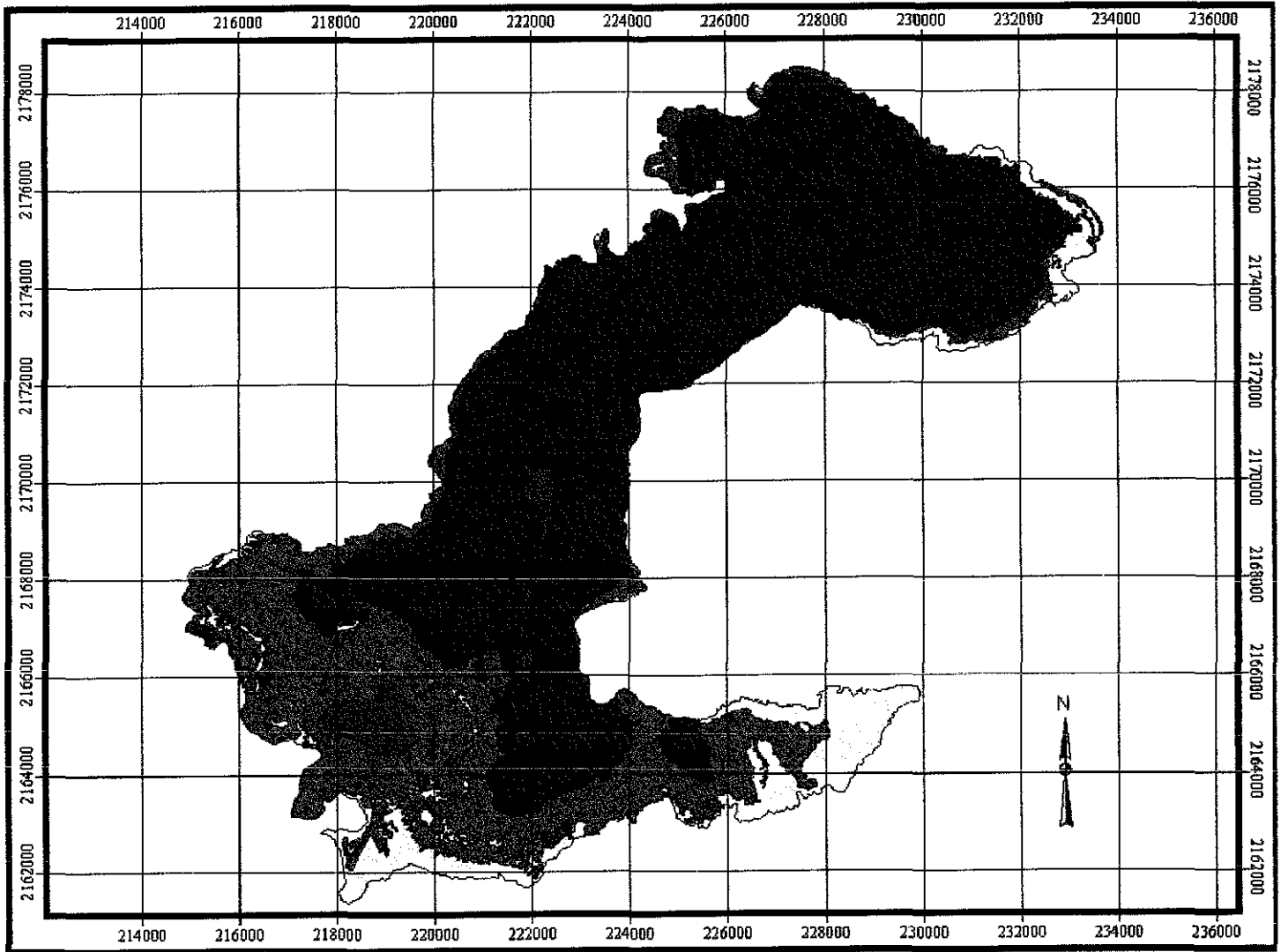
Leyenda

-  Veg Emergente
-  Veg Sumergida
-  Limnetico
-  Islas





Proyección: UTM
Esferoide: Clarke 1866
Datum: NAD27 (México)
Elaboró: A. Gómez-Tagle Ch.
Método: Fotointerpretación y análisis en SIG.
Escala 1: 111,561
Fecha: marzo-2001
Reticula: 2000 m

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Lago de Pátzcuaro 1974

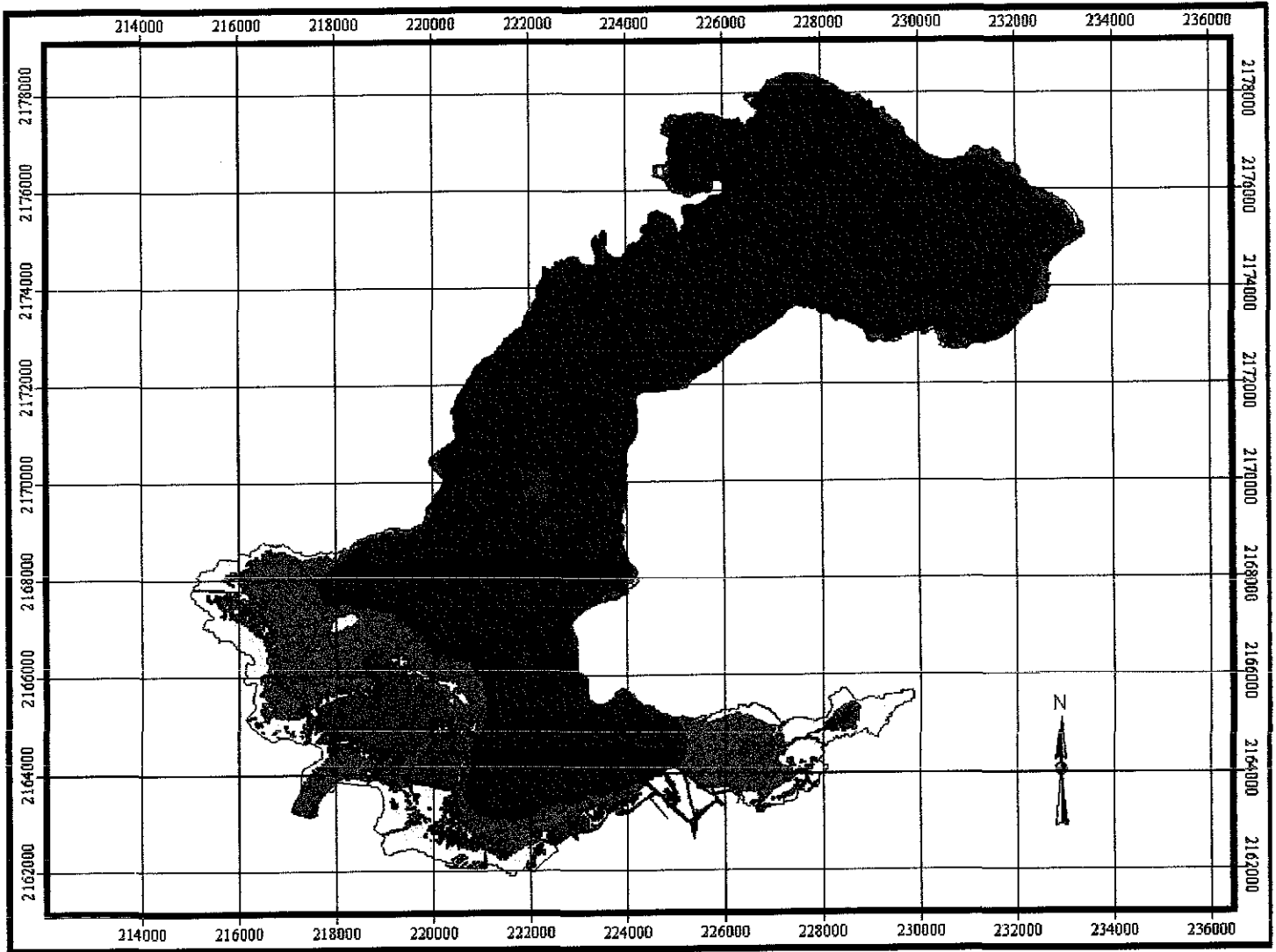


Leyenda





-  Veg Emergente
-  Veg Sumergida
-  Limnetico
-  Islas

Proyección: UTM
Esferoide: Clarke 1866
Datum: NAD27 (México)
Elaboró: A. Gómez-Tagle Ch.
Método: Fotointerpretación y análisis en SIG.
Escala 1: 111,561
Fecha: marzo-2001
Retícula: 2000 m

Lago de Pátzcuaro 1986

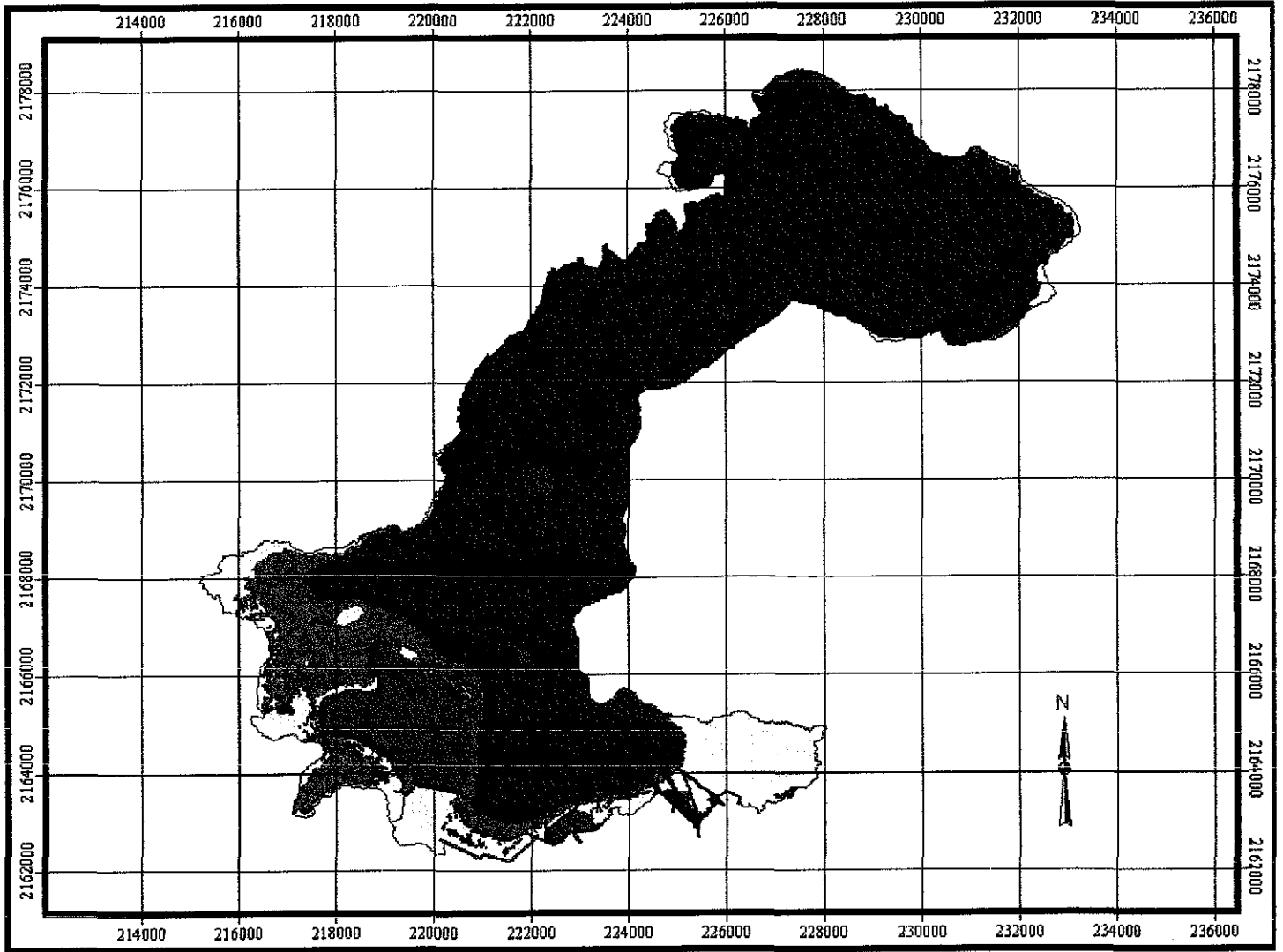


Leyenda





-  Veg Emergente
-  Veg Sumergida
-  Limnetico
-  Islas

Proyección: UTM
Esferoide: Clarke 1866
Datum: NAD27 (México)
Elaboró: A. Gómez-Tagle Ch.
Método: Fotointerpretación y análisis en SIG.
Escala 1: 111,561
Fecha: marzo-2001
Retícula: 2000 m

Lago de Pátzcuaro 1991



Leyenda

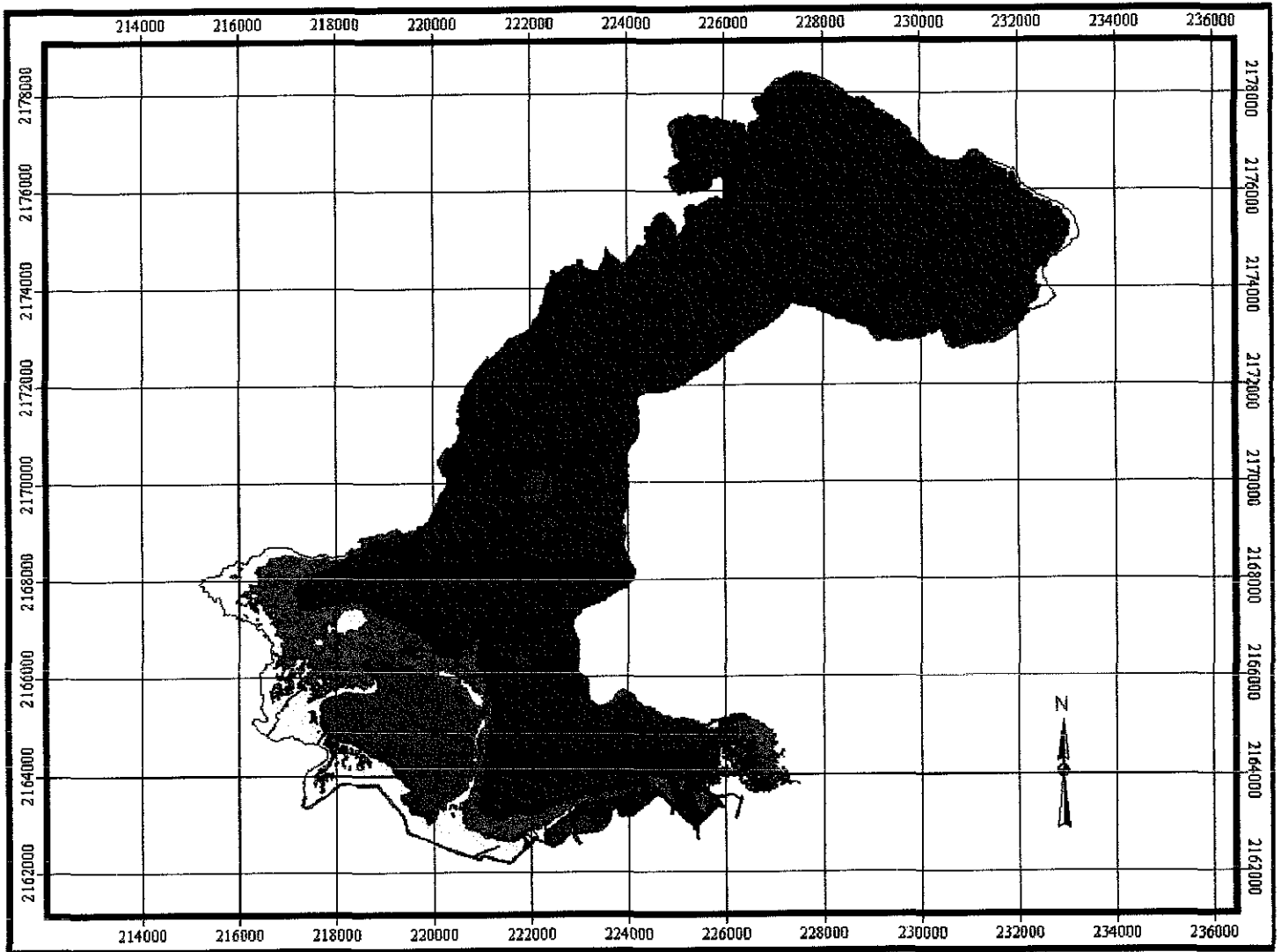
-  Veg Emergente
-  Veg Sumergida
-  Limnetico
-  Islas

TESIS CON
FALLA DE CUBIEN





Proyección: UTM
Esferoide: Clarke 1866
Datum: NAD27 (México)
Elaboró: A. Gómez-Tagle Ch.
Método: Fotointerpretación y
análisis en SIG.
Escala 1: 111,561
Fecha: marzo-2001
Retícula: 2000 m

19/4

Lago de Pátzcuaro 1995

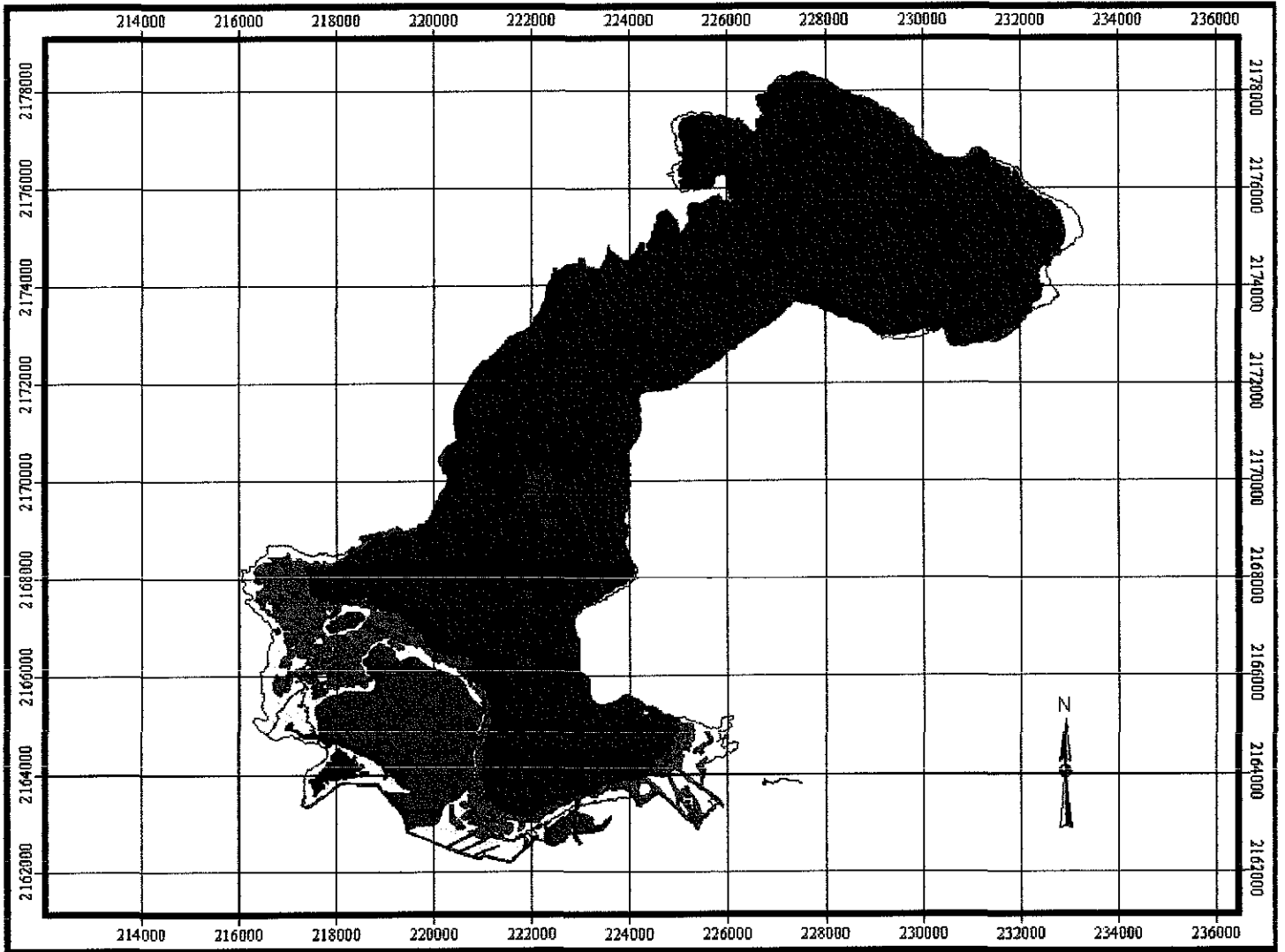


Leyenda

-  Veg Emergente
-  Veg Sumergida
-  Limnetico
-  Islas

Proyección: UTM
Esferoide: Clarke 1866
Datum: NAD27 (México)
Elaboró: A. Gómez-Tagle Ch.
Método: Fotointerpretación y análisis en SIG.
Escala 1: 111,561
Fecha: marzo-2001
Reticula: 2000 m





Lago de Pátzcuaro 2000



Escala gráfica



Leyenda

-  Veg Emergente
-  Veg Sumergida
-  Limnetico
-  Islas

Trabajo con
FALLA DE NIGEN

Proyección: UTM
 Esferoide: Clarke 1866
 Datum: NAD27 (México)
 Elaboró: A. Gómez-Tagle Ch.
 Método: Fotointerpretación y análisis en SIG.
 Escala 1: 111,561
 Fecha: marzo-2001
 Retícula: 2000 m

Entidad	Año					
	1969	1974	1986	1991	1995	2000
Vegetación Emergente	937.44	1,168.31	1,038.14	1,214.35	769.41	849.77
Vegetación Sumergida	1,943.34	3,334.21	1,961.33	1,115.03	1,053.15	838.22
Limnético	8,114.38	7,103.65	7,499.66	7,459.46	7,529.20	7,217.84
Islas	397.06	267.5	483.58	615.3	716.84	851.4
Total Acuático	10,995.16	11,606.17	10,499.13	9,788.84	9,351.76	8,905.83
Total	11,392.22	11,873.67	10,982.71	10,404.14	10,068.60	9,757.23

1969						
Sectores	Acuático	V. Emergente	V. Sumergida	Limnético	Islas	Total
Erongarícuaro	1,379.880	43.770	868.520	467.590	126.970	1,506.850
Jarácuaro	301.190	51.100	93.790	156.300	18.350	319.540
Ihuatzio	2,434.120	755.190	678.410	1,000.520	132.070	2,566.190
Quiroga	3,110.750	87.380	100.880	2,922.490	0.000	3,110.750
Cuello	1,911.780	0.000	39.200	1,872.580	0.000	1,911.780
Islas	1,857.220	0.000	162.320	1,694.900	119.670	1,976.890
Total	10,994,940	937.440	1,943.120	8,114.380	397.060	11,392.000

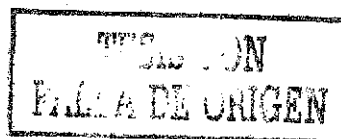
1974						
Sectores	Acuático	V. Emergente	V. Sumergida	Limnético	Islas	Total
Erongarícuaro	1,475.130	91.790	1,096.090	287.250	100.030	1,575.160
Jarácuaro	428.570	173.600	254.970	0.000	14.960	443.530
Ihuatzio	2,620.040	679.150	1,292.800	648.090	42.730	2,662.770
Quiroga	3,224.390	208.150	265.130	2,751.110	0.000	3,224.390
Cuello	1,986.010	2.950	95.590	1,887.470	0.310	1,986.320
Islas	1,871.810	12.670	329.410	1,529.730	109.470	1,981.280
Total	11,605.950	1,168.310	3,333.990	7,103.650	267.500	11,873.450

1986						
Sectores	Acuático	V. Emergente	V. Sumergida	Limnético	Islas	Total
Erongarícuaro	1,286.620	325.260	728.780	232.580	140.010	1,426.630
Jarácuaro	231.720	103.820	127.900	0.000	15.700	247.420
Ihuatzio	2,202.820	569.570	703.110	930.140	175.630	2,378.450
Quiroga	3,020.750	15.640	187.590	2,817.520	0.260	3,021.010
Cuello	1,959.990	0.000	23.970	1,936.020	0.000	1,959.990
Islas	1,797.230	23.850	189.980	1,583.400	151.980	1,949.210
Total	10,499.130	1,038.140	1,961.330	7,499.660	483.580	10,982.710

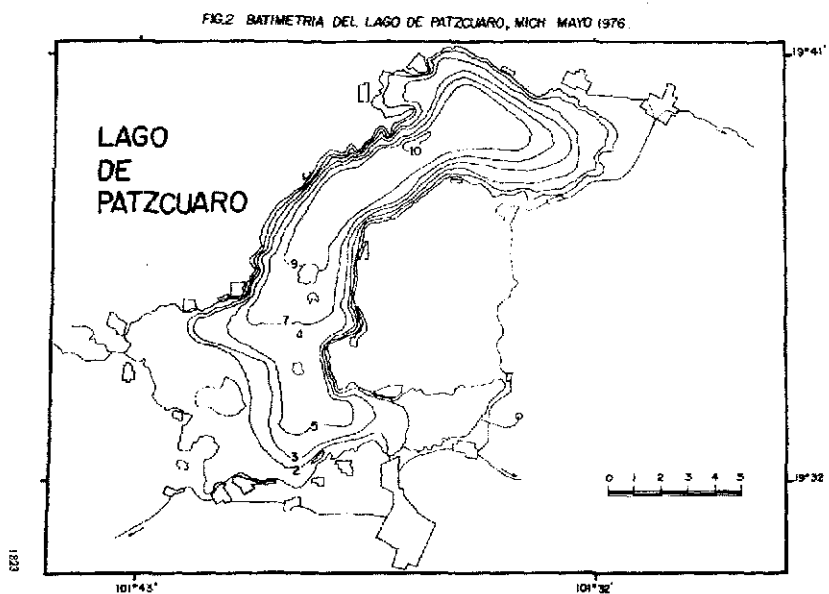
1991						
Sectores	Acuático	V. Emergente	V. Sumergida	Limnético	Islas	Total
Erongarícuaro	1,144.700	301.620	600.280	242.800	158.660	1,303.360
Jarácuaro	211.740	95.660	116.080	0.000	14.510	226.250
Ihuatzio	1,870.810	706.230	237.570	927.010	244.180	2,114.990
Quiroga	2,961.010	87.990	41.370	2,831.650	0.600	2,961.610
Cuello	1,872.090	0.000	12.720	1,859.370	0.000	1,872.090
Islas	1,728.490	22.850	107.010	1,598.630	197.350	1,925.840
Total	9,788.840	1,214.350	1,115.030	7,459.460	615.300	10,404.140

1995						
Sectores	Acuático	V. Emergente	V Sumergida	Limnético	Islas	Total
Erongarícuaro	1,089.450	373.72	460.15	255.58	166.3	1,255.750
Jarácuaro	149.610	124.76	24.85	0.00	24.56	174.170
Ihuatzio	1,609.290	196.9	346.64	1065.75	325.73	1,935.020
Quiroga	2,924.680	55.81	78.95	2789.92	0.6	2,925.280
Cuello	1,865.250	0.00	16.33	1848.92	0.00	1,865.250
Islas	1,713.480	18.22	126.23	1569.03	199.65	1,913.130
Total	9,351.760	769.410	1,053.150	7,529.200	716.840	10,068.600

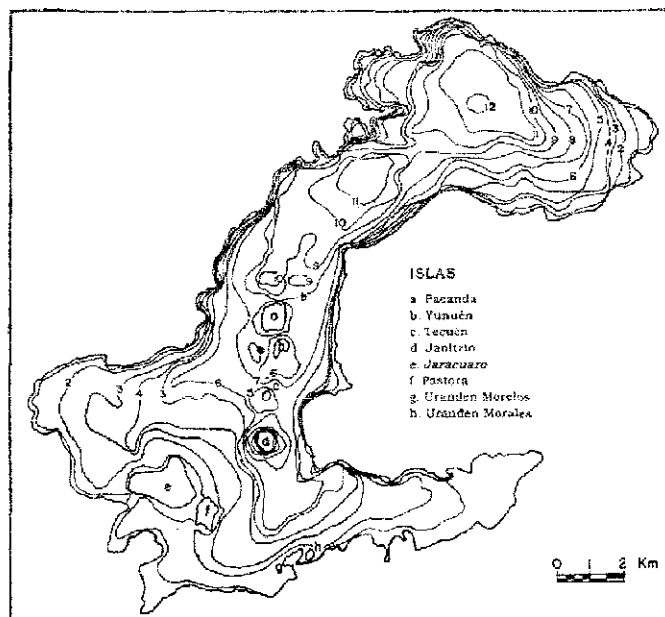
2000						
Sectores	Acuático	V. Emergente	V. Sumergida	Limnético	Islas	Total
Erongarícuaro	968.85	310.27	416.36	242.22	200.92	1,169.77
Jarácuaro	132.97	75.11	10.59	47.27	41.2	174.17
Ihuatzio	1,359.19	318.2	280.22	760.77	361.64	1,720.83
Quiroga	2,906.74	99.91	46.85	2,759.98	0.6	2,907.34
Cuello	1,866.20	1.99	20.05	1,844.16	0.68	1,866.88
Islas	1,671.88	44.29	64.15	1,563.44	246.36	1,918.24
Total	8,905.83	849.77	838.22	7,217.84	851.4	9,757.23


 INSTITUTO NACIONAL
 PARA EL ORIGEN

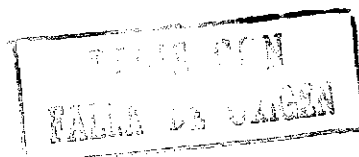
Anexo 4. Mapas batimétricos

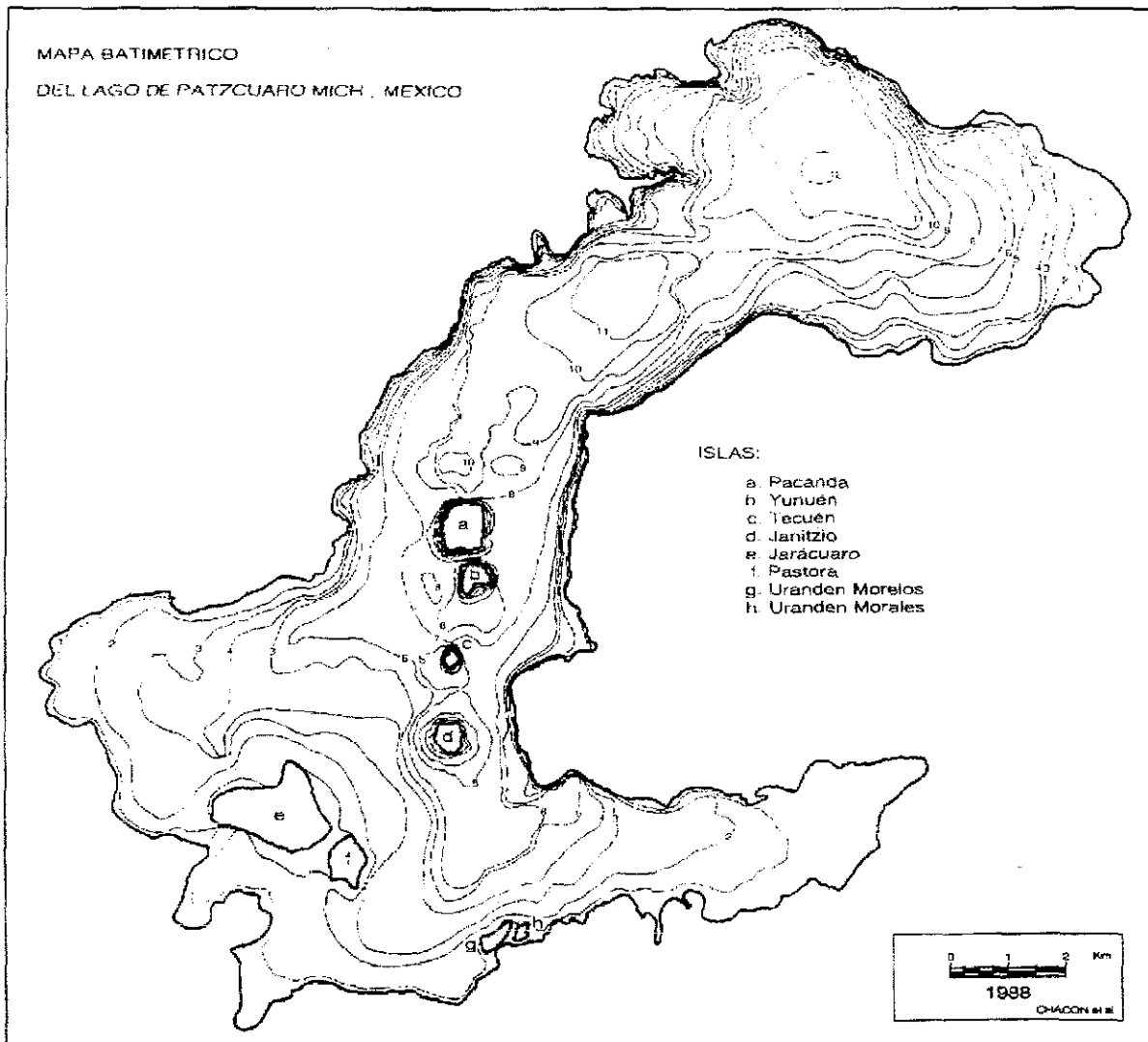


Télez y Motte (1980)



SARH (1984)





Chacón et al. (1989)

Comentario: La información batimétrica proporcionada por Téllez y Motte (1980) parece contener desviaciones importantes con respecto a la situación real. Por otro lado, los datos de profundidades en 2 y 3 fueron ensamblados sobre la imagen del lago de 1974 en lugar de una aproximada a 1986 (ver Anexo 3). Los contornos de profundidad reportados por SARH (1984, citado por Orbe y Acevedo 1996) aparecen en el mismo lugar en Chacón (1989). Ningún mapa batimétrico reporta a que altitud sobre el nivel del mar se encontraba el nivel del lago durante el levantamiento de campo.

COPIA CON
FALLA DE ORIGEN