

Lagos cráter de la región de los Tuxtlas: limnología, flora algal y estudio paleolimnológico de la deforestación reciente

Gabriela Vázquez
Margarita Caballero
Socorro Lozano
Alejandro Rodríguez

INTRODUCCIÓN

La Sierra de los Tuxtlas es un campo volcánico localizado en las costas del Golfo de México. La actividad volcánica en esta zona se remonta al mioceno tardío, hace unos 11 000 000 de años, y ha continuado hasta tiempos recientes (Nelson y González-Caver, 1992). La sierra de los Tuxtlas tiene dos volcanes principales, ambos de alrededor de 1680 msnm, hacia el sur el volcán Santa Martha y hacia el norte el San Martín; este último ha tenido dos erupciones históricas una en 1664 y la otra 1793 (Moziño, 1870). En áreas de reciente actividad volcánica, como los Tuxtlas, se encuentran lagos de origen volcánico como el lago de Catemaco, que es el principal cuerpo de agua de esta región y que se localiza entre ambos volcanes. Hay otros lagos como Escondida y Zacatal de origen tectónico-volcánico y que junto con Catemaco son los más estudiados de la región, desde un punto de vista geomorfológico y limnológico (Torres-Orozco *et al.*, 1996).

Alrededor del volcán San Martín existen más de 200 volcanes de ceniza y cerca de 40 cráteres de explosión, llamados *maars*, que son relativamente jóvenes, con edades de menos de 800 000 años (Nelson y González-Caver, 1992). Dentro de estos cráteres pueden formarse cuerpos de agua, los cuales en general tienen una superficie pequeña, con forma circular (~2 km de diámetro) y pueden ser muy profundos (>50 m) (Vázquez *et al.*, 2004). Sus cuencas de aporte se caracterizan por tener paredes verticales que rodean al cuerpo de agua y que pueden llegar a tener alturas hasta de 100 m. Cada lago tiene diferente estado de conservación de la vegetación y uso del suelo en sus paredes, lo que ha influido en su estado trófico, sus características fisicoquímicas, así como en la composición de la comunidad fitoplanctónica. En la zona de los Tuxtlas existen 13 lagos de este tipo, cinco de los cuales son el objeto de estudio de este trabajo: Majahual, Chalchoapan, Manantiales, Verde y Mogo; y que se encuentran en las faldas del volcán San Martín (Figura 1). En este capítulo se presentan los resultados obtenidos sobre diferentes aspectos limnológicos y de la comunidad fitoplanctónica de estos cinco lagos (Vázquez *et al.*, 2004 y 2005); así mismo se reportan los resultados de un estudio paleolimnológico realizado en el lago Verde (Caballero *et al.*, 2006), el cual documenta la evolución del lago y su entorno durante los últimos 350 años.

ÁREA DE ESTUDIO

La región de los Tuxtlas se encuentra en el sur del estado de Veracruz, 18°20'N, 95°07'W, y forma parte de las cuencas de los ríos Papaloapán y Coatzacoalcos (Vázquez *et al.*, 2004). La red hidrológica asociada al volcán es de tipo radial y

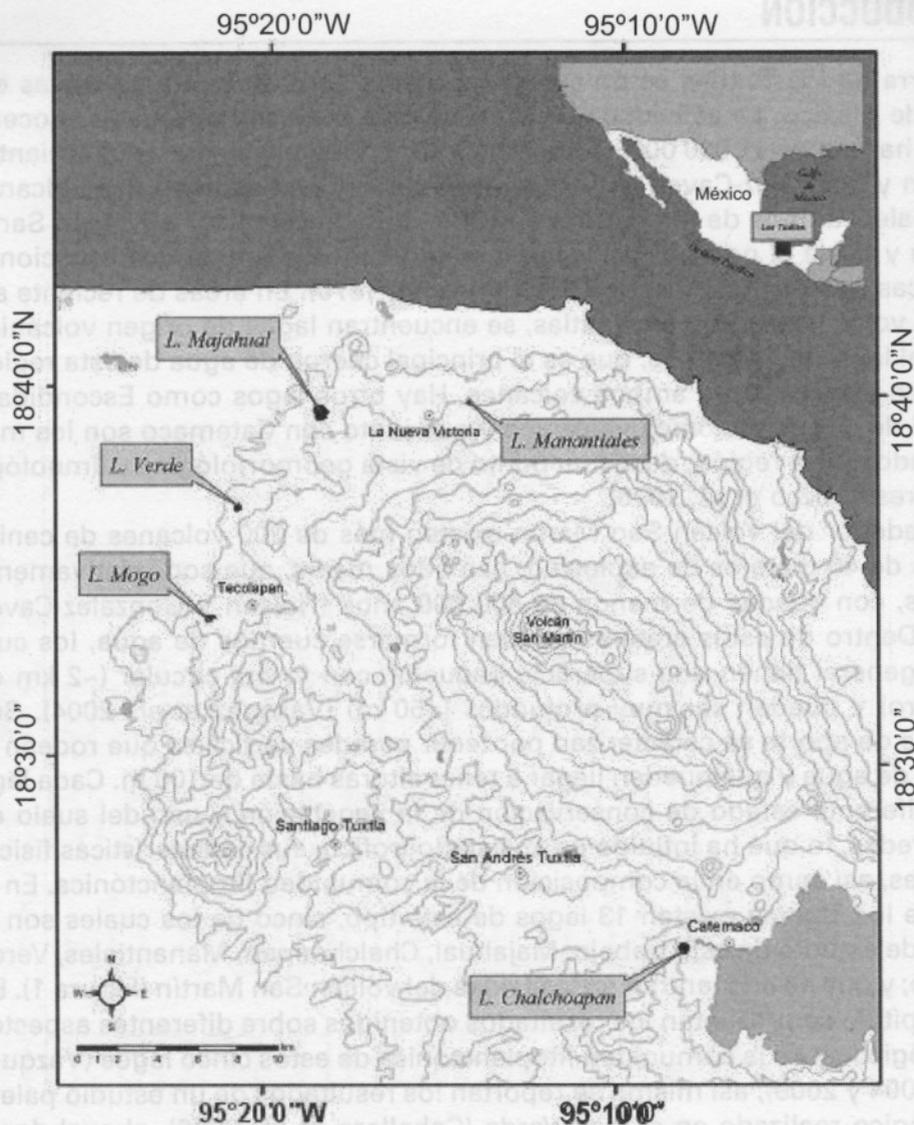


Figura 1. Volcán San Martín, los Tuxtlas, Veracruz, con la ubicación de los cinco lagos cráter (*maars*).

está formada por muchos ríos y arroyos cortos, los cuales son permanentes a partir de los 300 y 400 msnm; en las partes más altas, por el tipo de suelo que es muy poroso, tienden a ser intermitentes.

CLIMA

Se caracteriza por tener una temporada de lluvias que se extiende durante el verano y parte del otoño. En verano, los vientos alisios, que fluyen del noreste, traen gran cantidad de humedad. El relieve topográfico de la zona afecta la distribución de humedad, generando un gradiente entre la zona costera, donde puede llover más de 3000 mm por año y la zona continental, donde la lluvia es del orden de 1500 mm por año (Soto y Gamma, 1997). Hacia finales del verano e inicios del otoño las tormentas tropicales y huracanes traen abundantes lluvias a esta zona. Durante el invierno, los vientos fríos del norte, conocidos como Nortes, traen algo de humedad y una marcada disminución en la temperatura, bajando cerca de 14°C la temperatura media mensual que normalmente es de 32°C en verano a 18°C en invierno.

VEGETACIÓN

La vegetación en la sierra de los Tuxtlas se caracteriza por su alta biodiversidad, la cual ha sido ampliamente estudiada (Sousa, 1968; Ibarra-Manríquez y Sinaca-Colín, 1995; González-Soriano *et al.*, 1997; Ibarra-Manríquez *et al.*, 1997; Castillo-Campos y Laborde, 2004) y hoy es protegida en la Reserva de la Biosfera los Tuxtlas. Esta reserva representa uno de los últimos relictos de selva alta perenifolia en México y es el límite norte de este tipo de vegetación en el continente americano (Dirzo *et al.*, 1997; Castillo-Campos y Laborde, 2004).

De manera muy breve se pueden definir tres asociaciones vegetales principales en la región: 1) **Selva Tropical**, que se distribuye de forma altitudinal entre 0 y 700 msnm, es estructuralmente compleja y muy diversa, dominada por árboles de hasta 40 m de altura, lianas, epifitas y palmeras; la mayor parte de este tipo de vegetación que todavía se preserva está por arriba de la cota de los 400 msnm. 2) **Vegetación Secundaria**, se establece cuando la selva tropical es perturbada de manera natural —por fuegos naturales, caída de árboles, etc.— y en ella dominan especies como *Cecropia obtusifolia*, *Trema micrantha*, *Myriocarpa longipes*, *Urera caracasana*, *Piper* y *Solanum* spp. 3) **Bosque Mesófilo**, que se distribuye en las zonas más elevadas, por arriba de los 700 msnm, y es dominado por géneros de climas templados como son *Liquidambar*, *Ulmus*, *Quercus*, *Hedyosmum*, *Pinus*, *Carpinus* y *Clethra* (Álvarez del Castillo, 1977).

La vegetación natural de esta zona ha sido afectada intensamente durante las últimas décadas por actividades agrícolas y ganaderas. Datos históricos documentan las elevadas tasas de deforestación durante las décadas de 1960 a 1980, y para 1990 cerca 80% de la zona había sido ya deforestada (Dirzo y

García, 1992; Guevara *et al.*, 2004). Después de la deforestación, la cubierta vegetal que se establece es dominada por plantas herbáceas indicadoras de perturbación, la mayoría de las cuales pertenecen a las familias Asteraceae, Leguminosae, Poaceae, Solanaceae, Rubiaceae y Euphorbiaceae (Ibarra-Manríquez *et al.*, 1997; Castillo-Campos y Laborde, 2004).

MORFOMETRÍA Y BATIMETRÍA

Majahual es el lago más profundo con 53 m seguido por Chalchoapan y Manantiales con 36 y 53 m, y los lagos Verde y Mogo que son muy someros, con cuatro metros (Tabla 1). De los lagos profundos, Majahual tiene los mayores valores de volumen, longitud máxima y anchura máxima y el más pequeño es Manantiales. La profundidad de los someros, Verde y Mogo, fluctúa alrededor de los cuatro metros, aunque tienen un área, longitud y ancho mayores que Manantiales. Por su origen volcánico, todos los lagos tienen una forma casi circular indicada por la relación —longitud máxima:ancho máximo— que

Tabla 1. Parámetros morfométricos de los cinco lagos cráter estudiados en la región de los Tuxtlas, Veracruz. (Modificado de Vázquez *et al.*, 2004).

	Lagos				
	Majahual	Manantiales	Chalchoapan	Verde	Mogo
Altitud (m)	149	194	386	149	124
Ubicación	18° 39' N	18° 39' N	18° 24' N	18° 36' N	18° 33' N
	95° 18' W	95° 14' W	95° 08' W	95° 20' W	95° 21' W
Profundidad máxima (m)	53.0	36.0	43.0	4.0	4.0
Longitud máxima (m)	810.0	290.0	590.0	380.0	590.0
Ancho máximo (m)	740.0	270.0	570.0	350.0	410.0
Perímetro (km)	2.7	0.9	1.7	1.2	1.6
Área (ha)	49.0	6.0	26.0	12.0	17.0
Volumen (hm ³)	16.0	1.4	5.9	0.2	0.3
Profundidad media (m)	32.6	22.1	22.9	1.9	1.8
Profundidad relativa (%)	6.7	12.8	7.5	1.1	0.9
Relación longitud máxima: ancho máximo	1.09	1.07	1.03	1.08	1.43
Desarrollo de volumen (%)	1.8	1.8	1.6	1.3	1.3

prácticamente es de uno (Tabla 1). El Mogo es el que tiene el contorno más irregular y presenta un valor de 1.43 (Figura 2). La forma de la cubeta puede evaluarse a través del desarrollo de volumen que es el cociente entre el volumen del lago y el volumen de un cono con una base cuya área es igual al área del lago y la altura es igual a la máxima profundidad del lago (Håkanson, 1981). En este caso mientras más cercano sea el valor a 1 es más cercano a la forma cónica, mientras más lejano de uno, la forma de la cuenca se acerca a una parábola elíptica.

El desarrollo de volumen de los lagos profundos, Majahual, Manantiales y Chalchoapan varía de 1.58 a 1.84, mientras que los lagos someros Verde y Mogo tienden a la forma cónica ya que tienen un desarrollo de volumen de 1.3 (Tabla 1). La profundidad relativa da una medida de la estabilidad de la

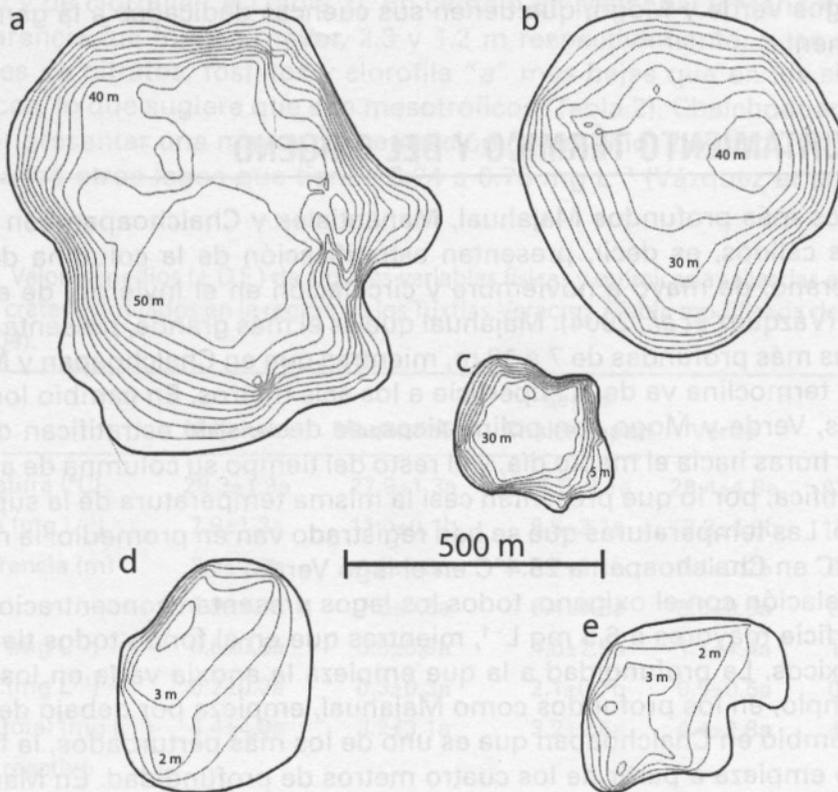


Figura 2. Batimetría de los cinco lagos cráter incluidos en el presente estudio, en la región de los Tuxtlas, Veracruz a) Majahual, b) Chalchoapan, c) Manantiales, d) Verde y e) Mogo.

columna de agua y, por tanto, de la tendencia a la estratificación de los lagos, que se calcula a partir de la relación entre la profundidad máxima y el diámetro medio del lago (Håkanson, 1981). De los lagos profundos, Majahual es el de menor profundidad relativa (6.72%), y Manantiales el de mayor profundidad relativa (12.72%). Los lagos más someros, Verde y Mogo tienen la menor profundidad relativa.

Por su origen volcánico la cuenca de aporte de estos lagos está formada por las paredes del cráter en el que se encuentran, las cuales presentan diferentes altitudes, pendientes y usos de suelo (Vázquez *et al.*, 2004). Majahual tiene paredes con una altitud de alrededor de 50 m, por lo que la superficie del lago no está muy protegida de la acción del viento; presenta un alto porcentaje de terrenos dedicados a la ganadería y conserva una franja de vegetación en todo el perímetro del cuerpo de agua. El lago Manantiales es el de las paredes de cono más altas, 100 m, y cubiertas con selva alta perennifolia y acahuales. Los sistemas más alterados por los diferentes usos de su cuenca son Chalchoapan, que tiene zonas extensas de cultivos de maíz y de pastoreo, y los lagos Verde y Mogo, que tienen sus cuencas dedicadas a la ganadería, básicamente.

COMPORTAMIENTO TÉRMICO Y DEL OXÍGENO

Los lagos más profundos Majahual, Manantiales y Chalchoapan son monomícticos cálidos, es decir, presentan estratificación de la columna de agua en el verano, de mayo a noviembre y circulación en el invierno, de enero a febrero (Vázquez *et al.*, 2004). Majahual que es el más grande, presenta las termoclinas más profundas de 7 a 13 m, mientras que en Chalchoapan y Manantiales la termoclina va de la superficie a los seis metros. En cambio los lagos someros, Verde y Mogo son polimícticos, es decir, sólo estratifican durante algunas horas hacia el medio día, y el resto del tiempo su columna de agua no se estratifica; por lo que presentan casi la misma temperatura de la superficie al fondo. Las temperaturas que se han registrado van en promedio: la mínima de 25.5°C en Chalchoapan a 28.4°C en el lago Verde.

En relación con el oxígeno, todos los lagos presentan concentraciones en la superficie mayores a 6.5 mg L⁻¹, mientras que en el fondo todos tienden a ser anóxicos. La profundidad a la que empieza la anoxia varía en los lagos, por ejemplo, en los profundos como Majahual, empieza por debajo de los 14 m; en cambio en Chalchoapan que es uno de los más perturbados, la falta de oxígeno empieza a partir de los cuatro metros de profundidad. En Manantiales hay un comportamiento diferente ya que en primavera y verano se llega a registrar un aumento de oxígeno a 2 o 3 metros de profundidad, relacionado posiblemente con una acumulación de algas en esa zona. En este lago, la

morfometría puede estar jugando un papel importante para este comportamiento del oxígeno, ya que como se había mencionado, es el que presenta la máxima profundidad relativa, además de que la cuenca de aporte presenta paredes muy altas, casi de 100 m de altura y cubiertas de vegetación, lo que protege al lago de las corrientes del viento, permitiendo que la columna de agua sea estable.

VARIABLES FÍSICO-QUÍMICAS, GRADO DE EUTROFIZACIÓN

En relación con el estado trófico de los lagos se tiene un gradiente de eutrofización, que va de los más eutróficos que son Chalchoapan, Mogo y Verde, a los mesotróficos Majahual y Manantiales (Vázquez *et al.*, 2004). Las principales características que indican el alto grado de eutrofización de Chalchoapan, Mogo y Verde son la baja transparencia, que fluctúa de 0.2 m en Chalchoapan a 0.5 m en lago Verde; así como altas concentraciones de nitratos, fosfatos, amonio y de clorofila "a" (Tabla 2). En cambio en Majahual y Manantiales, la transparencia fue mucho mayor, 2.3 y 1.2 m respectivamente, y las concentraciones de nitratos, fosfatos y clorofila "a" más bajas que en los sistemas eutróficos, lo que sugiere que son mesotróficos (Tabla 2). Chalchoapan sobresale por presentar una mayor concentración de amonio, 2 mg L^{-1} , en comparación a los otros lagos que tienen 0.24 a 0.76 mg L^{-1} (Vázquez *et al.*, 2004).

Tabla 2. Valores medios (\pm D.E.) de algunas variables físicas y químicas analizadas en los cinco lagos cráter estudiados en la región de los Tuxtlas, Veracruz. (Tabla modificada de Vázquez *et al.*, 2004).

	Lagos				
	Majahual	Manantiales	Chalchoapan	Verde	Mogo
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	28.3 \pm 1.9a	27.9 \pm 1.3a	25.5 \pm 3.1a	28.4 \pm 4.8a	27.5 \pm 4.3a
Oxígeno (mg L^{-1})	7.9 \pm 1.3a	11.0 \pm 0.1b	6.5 \pm 2.1a	12.3 \pm 1.9b	13.1 \pm 1.5b
Transparencia (m)	2.3 \pm 0.3a	1.2 \pm 0.3c	0.2 \pm 0.1b	0.4 \pm 0.2b	0.5 \pm 0.2b
pH	7.9 \pm 1.1a	7.6 \pm 0.6a	8.4 \pm 0.5a	8.5 \pm 0.5a	8.3 \pm 0.4a
Nitratos (mg L^{-1})	0.6 \pm 0.6a	0.8 \pm 0.9a	1.6 \pm 2.5a	1.1 \pm 1.4a	1.4 \pm 2.0a
Amonio (mg L^{-1})	0.2 \pm 0.2a	0.3 \pm 0.3a	2.1 \pm 0.7b	0.5 \pm 0.5a	0.8 \pm 0.9a
Fósforo total (mg L^{-1})	4.4 \pm 4.0a	3.2 \pm 3.1a	3.2 \pm 2.6a	4.4 \pm 2.8a	4.8 \pm 3.7a
Fósforo reactivo (mg L^{-1})	0.8 \pm 0.8a	0.7 \pm 0.9a	0.9 \pm 0.7a	1.5 \pm 0.6a	1.8 \pm 0.8a

*Las cifras marcadas con b y c indican diferencias significativas entre sí y a su vez con las que están marcadas con a.

Este lago es el único que tiene cultivos de maíz en sus paredes, y en los alrededores de la cuenca lacustre hay cultivo de tabaco, por lo que en época de lluvias recibe escurrimientos con altas concentraciones de sólidos suspendidos y fertilizantes (Vázquez *et al.*, 2005). Por otra parte, se ha encontrado una correlación inversa entre la transparencia y la clorofila "a", ya que los lagos con menor transparencia han sido de mayor productividad.

COMUNIDAD FITOPLANCTÓNICA

La diversidad de grupos y el número de especies de fitoplancton varían entre los lagos (Figura 3). En general, en estos lagos las algas verdes (clase Chlorophyceae) las cianobacterias (clase Cyanophyceae), y las diatomeas (clase Bacillariophyceae), son los grupos predominantes, aunque la proporción de especies de cada grupo varía en cada sistema. En Chalchoapan, la tendencia es hacia un mayor número de especies de diatomeas y cianobacterias y pocas clorofíceas. En los lagos Verde, Mogo, y Majahual, predominan las algas verdes y las cianobacterias; en cambio en Manantiales dominan las clorofíceas y diatomeas y el grupo menos representado es el de las cianofíceas (Figura 3).

De las cianobacterias *Anabaenopsis circularis*, *Aphanocapsa delicatissima* y *Snowella atomus* se han registrado tanto en los lagos con pocos nutrimentos

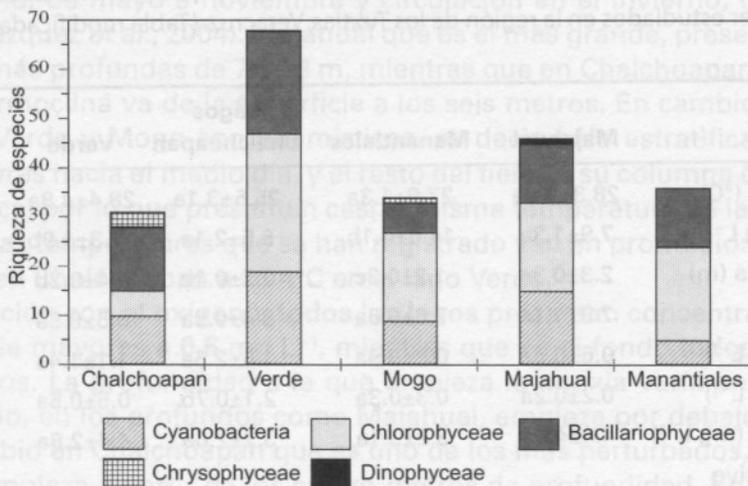


Figura 3. Número de especies por clase en cada uno de los cinco lagos cráter estudiados en la región de los Tuxtlas, Veracruz.

tos (Majahual y Manantiales) como en los eutróficos con mayor cantidad de nutrimentos (Chalchoapan, Verde y Mogo). Algunas especies de *Chroococcus*, *Merismopedia*, *Microcystis* y *Pseudoanabaena* se han observado sólo en los lagos eutróficos (Tabla 3). En particular *Microcystis aeruginosa*, que es una especie indicadora de altas concentraciones de nutrimentos, se ha encontrado en Chalchoapan en grandes cantidades (Vázquez *et al.*, 2005).

Algunas de las especies de las algas verdes que se han encontrado con mayor frecuencia en todos los lagos son *Ankistrodesmus fusiformis*, *Crucigeniella crucifera*, *Dictyosphaerium erhenbergianum*, *Kirchneriella obesa* y *Monoraphidium arcuatum*. Ha habido otras como *Eudorina unicocca*, *Pandorina morum*, *Tetraedron minimum* y *Tetraedron caudatum* que se han registrado sólo en Majahual y Manantiales. En cambio *Pediastrum duplex*, *P. tetras*, *Scenedesmus acuminatus* y *S. quadricauda* han predominado en los lagos eutróficos como Chalchoapan, Verde y Mogo. Por último, entre las diatomeas, *Achnanthes lanceolata*, *Cymbella ventricosa* y *Gomphonema intricatum* se han registrado en todos los lagos. Por el contrario *Aulacoseira granulata* y *Cocconeis placentula*, han predominado en los lagos eutróficos Verde y Mogo; mientras que *Fragilaria intermedia* y *Surirella elegans* en condiciones de menor cantidad de nutrimentos como las que se registran en Majahual y Manantiales (Tabla 3).

INFLUENCIA DE LAS CIANOBACTERIAS EN EL LAGO CHALCHOAPAN

En el lago Chalchoapan (Figura 1) se realizó un estudio más detallado sobre la comunidad fitoplanctónica en el que se analizaron los cambios de la biomasa, la diversidad, la tasa de sucesión y, su relación con el comportamiento térmico y la calidad del agua durante un ciclo anual de 2001-2002. Chalchoapan es un lago tropical eutrófico, que como se había mencionado, presenta el comportamiento térmico de un sistema monomítico cálido, es decir, su columna de agua se estratifica de febrero a diciembre, con la máxima estratificación en el verano de mayo a septiembre, cuando la temperatura del agua fluctúa de 29 a 32°C. En el invierno, en enero la temperatura disminuye a 21-22°C, por lo que la columna de agua se mezcla por completo.

En los lagos subtropicales y templados, la composición de la comunidad fitoplanctónica presenta cambios a lo largo del tiempo que, en general, van de diatomeas a principios de la primavera, cuando la estratificación inicia, hacia el dominio de algas verdes durante el verano, para cambiar a cianobacterias y dinoflagelados a finales del verano o en el otoño. También en los lagos tropicales, este patrón se puede encontrar. En particular los picos de diatomeas coinciden con la depresión de la termoclina en el invierno y después el fitoplancton puede seguir el mismo patrón que los lagos templados, cuando la

Tabla 3. Especies fitoplanctónicas más frecuentes de los cinco lagos estudiados en la región de los Tuxtlas, Veracruz.

	Lagos mesotróficos		Lagos eutróficos		
	Majahual	Manantiales	Chalchoapan	Verde	Mogo
Cianobacterias					
(Clase Cyanophyceae)					
<i>Anabaenopsis circularis</i>	x	x	x		
<i>Aphanocapsa delicatissima</i>	x			x	x
<i>Aphanothece clathrata</i>				x	
<i>Chroococcus dispersus</i>				x	
<i>Chroococcus turgidus</i>				x	
<i>Merismopedia tenuissima</i>					x
<i>Microcystis aeruginosa</i>			x		
<i>Pseudoanabaena tenuis</i>			x	x	
<i>Snowella atomus</i>	x			x	x
Algas verdes					
(Clase Chlorophyceae)					
<i>Ankistrodesmus fusiformis</i>	x		x	x	x
<i>Coelastrum reticulatum</i>	x			x	
<i>Crucigeniella crucifera</i>	x	x		x	x
<i>Crucigeniella mucronata</i>	x	x		x	
<i>Dictyosphaerium ehrenbergianum</i>	x	x		x	
<i>Eudorina unicocca</i>		x			
<i>Kirchneriella obesa</i>	x	x		x	x
<i>Monoraphidium arcuatum</i>	x		x	x	x
<i>Oocystis</i> sp.	x				
<i>Pandorina morum</i>	x	x			
<i>Pediastrum duplex</i>				x	
<i>Pediastrum tetras</i>				x	
<i>Scenedesmus acuminatus</i>				x	
<i>Scenedesmus quadricauda</i>				x	x
<i>Sphaerocystis planctonica</i>	x				
<i>Tetraedron minimum</i>	x				
<i>Tetraedron caudatum</i>		x			
Diatomeas					
(Clase Bacillariophyceae)					
<i>Achnanthes lanceolata</i>	x		x		x
<i>Aulacoseira granulata</i>				x	x
<i>Cocconeis placentula</i>			x		
<i>Cymbella ventricosa</i>	x	x	x	x	
<i>Fragilaria intermedia</i>		x			
<i>Fragilaria ulna</i>	x	x			
<i>Gomphonema intricatum</i>	x	x		x	x
<i>Surirella elegans</i>	x				

termoclina se establece. Sin embargo, en el lago Chalchoapan, esta sucesión de grupos no ha sido observada: el fitoplancton estuvo dominado por *Microcystis aeruginosa*, con más de 80% de la biomasa total durante todo el periodo de estratificación de febrero a diciembre (Vázquez *et al.*, 2005). Aparentemente, las condiciones que favorecieron el predominio de las cianobacterias fueron la alta estabilidad de la columna de agua en la máxima estratificación, las elevadas temperaturas (>30°C) y las altas concentraciones de nutrientes, en particular el amonio y los nitratos, así como la baja transparencia. Se ha encontrado que las especies de cianobacterias no fijadoras de nitrógeno como *Microcystis aeruginosa*, aprovechan el amonio, en bajas intensidades de luz (Blomqvist *et al.*, 1994).

Los efectos de la dominancia de las cianobacterias sobre la dinámica de la comunidad fueron los siguientes: durante la máxima estratificación, cuando se registró la mayor dominancia de cianobacterias, se registró la menor tasa de sucesión, indicando que el recambio de especies disminuyó durante este periodo (Figura 4a). En cambio, las mayores tasas de sucesión se dieron durante la circulación y, en el inicio y fin de la estratificación, cuando hubo muchas especies con baja biomasa. Esta variación coincidió con el comportamiento de la diversidad, que fue elevada cuando la tasa de sucesión fue alta y disminuyó notablemente en la época de máxima estratificación (Figura 4b). Las curvas de dominancia-diversidad mostraron también el efecto de las cianobacterias sobre la comunidad ya que fueron diferentes en cada periodo (Figura 4c).

En la estratificación máxima, cuando dominaron *M. aeruginosa*, *Botryococcus braunii* y *Aphanocapsa grevillei*, los cambios en la biomasa relativa de una especie a la otra fueron muy grandes. En los meses de circulación y, en el principio y fin de la estratificación, las diferencias en la biomasa de las especies fueron muy pequeñas, ya que hubo muchas especies con baja biomasa. Durante estos meses las especies que dominaron fueron *Botryococcus braunii*, *Monoraphidium contortum*, *Pandorina morum* diatomeas como *Pinularia gentilis*, *Frustulia rhomboides* y *Fragilaria ulna*, y dinoflagelados como *Peridinium* spp., y la crisofita *Trachelomonas hispida*. De octubre a diciembre también se encontraron otras especies: *Sphaerocystis planctonica*, *Merismopedia tenuissima*, *Peridinium* sp., *Trachelomonas hispida*, *Chlamydomonas* sp. y *Monoraphidium contortum*.

Se ha encontrado que los periodos de baja diversidad y baja dinámica sucesional, como la que se da en Chalchoapan en la época de estratificación, podrían estar relacionados con la presencia de especies resistentes a la predación como *Microcystis aeruginosa*, lo que provoca que la presión de los depredadores sobre otras especies aumente, disminuyendo su biomasa (Roelke y Buyukates, 2002). Por otra parte, el rompimiento de la estratificación térmica provoca que las cianobacterias se encuentren en condiciones adversas en

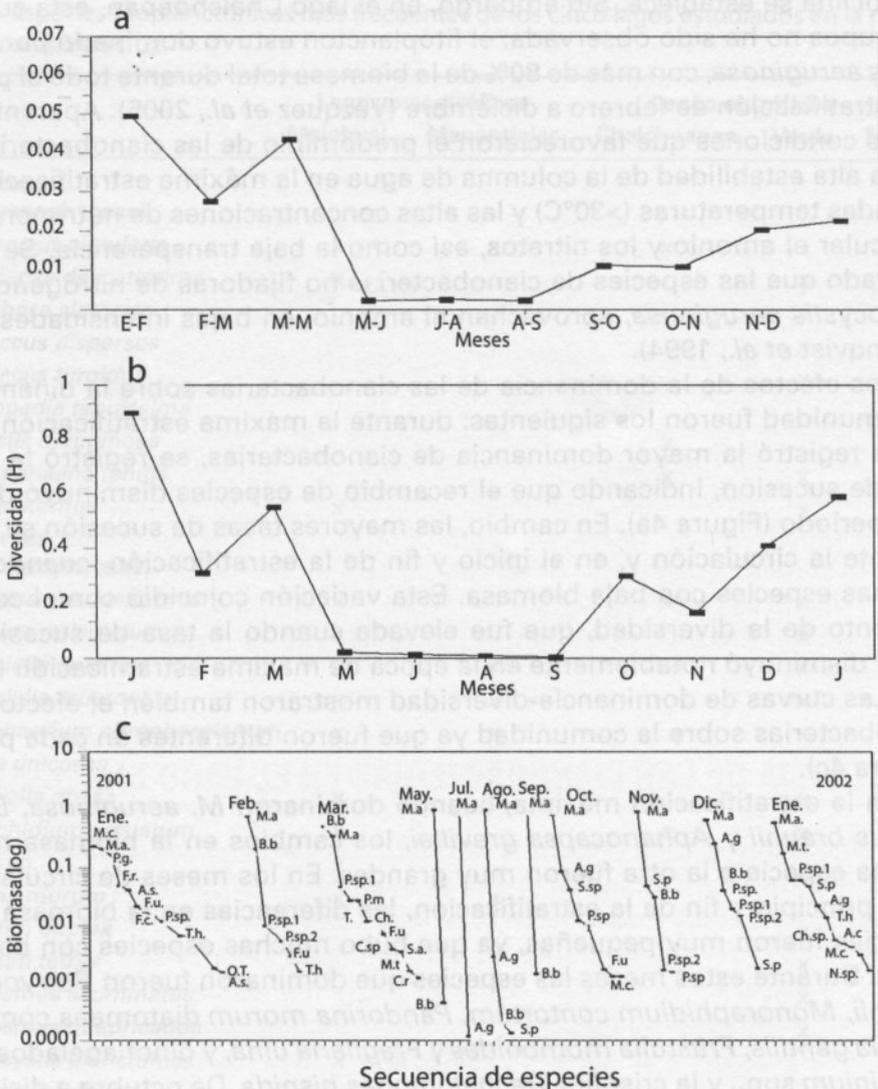


Figura 4. a) Variación de la tasa de sucesión, b) cambios mensuales de diversidad (H') y c) variación mensual de las curvas de dominancia-diversidad durante 2001-2002 en el lago Chalchoapan, los Tuxtlas, Veracruz. (Modificada de Vázquez *et al.* 2005).

la columna de agua, lo que puede provocar que pierdan dominancia (Paerl, 1988). La reducción de *Microcystis aeruginosa* se asoció con la reducción del epilimneo en la circulación, es decir, un incremento en la velocidad del viento y las bajas temperaturas.

PALEOLIMNOLOGÍA RECIENTE DE LAGO VERDE

En lago Verde (Figura 1), se realizó un estudio paleolimnológico y paleoambiental que relaciona el estado actual del lago, su flora algal moderna, en especial la de diatomeas, con la flora preservada en los sedimentos superficiales y a lo largo de una secuencia sedimentaria de alrededor de 1 m de longitud, a partir de la cual se reconstruye la evolución reciente del lago en el marco de la marcada deforestación que ha sufrido esta zona (Caballero *et al.*, 2006). Para realizar esta reconstrucción se realizaron estudios de propiedades magnéticas, polen, diatomeas y partículas de carbón en el sedimento lacustre. La secuencia se fechó mediante el método de radiocarbono, por la correlación con otra secuencia paralela fechada por 210-Pb y por el pico de actividad de Cs que correlaciona con el máximo en los ensayos de armas nucleares hacia 1962-1964. Como ya se expuso antes el lago Verde está localizado dentro de una pequeña cuenca, altamente deforestada, de 0.45 km². Es un lago pequeño, somero, eutrófico y turbio, cuya flora algal está dominada por diatomeas en el invierno, cianobacterias en verano y clorofitas en el otoño. Dado que el sedimento que se acumula en el fondo de un lago es un "depósito" en donde terminan todos los restos de las algas y otros organismos que viven en el agua, además de ser un hábitat importante para muchas especies, el estudio de los sedimentos lacustres es una herramienta importante para reconstruir el pasado de un lago. En este estudio primero se hace una valoración sobre que tan similar es el conjunto de algas recuperado de los sedimentos superficiales del lago con el conjunto moderno de algas que vive en él y, más tarde, una reconstrucción de la historia del lago y su cuenca de captación durante los últimos 350 años aproximadamente.

En los sedimentos superficiales de lago Verde estudiados se observa la preservación diferencial de los tres grupos algales. Las cianobacterias Chroococcales, que son tan abundantes en el lago, están representadas de manera deficiente en el sedimento. Las clorofitas sí se preservan, pero el conjunto de especies que se recupera del sedimento difiere del que se tiene en la columna de agua, quizás porque no se tienen documentados todos los posibles florecimientos en la columna a lo largo del ciclo anual. El grupo mejor representado en el sedimento superficial es el de las diatomeas; las especies presentes en el sedimento reflejan bien el conjunto de diatomeas presentes en la columna de agua, ambos dominados por las mismas especies: *Achnanthisidium minutissimum*, *Fragilaria capucina* y *Aulacoseira granulata*. La abundancia total de diatomeas y la abundancia relativa de las especies en el sedimento es más o menos estable a lo largo del año y no muestra la variabilidad estacional de la columna de agua, por lo que se puede concluir que el conjunto de diatomeas del sedimento superficial refleja bien las condiciones generales del lago, pero no tiene suficiente resolución para detectar la variabilidad de muy corto plazo

como la estacional. Comparando la abundancia de las especies entre columna de agua y sedimento superficial se puede llegar a la conclusión —apoyada por la literatura— de que *A. minutissimum* es una especie bentónica-ticoplanctónica (Schoeman, 1973; Gasse, 1986; Whitmore, 1989; Ehrlich, 1995), mientras que *F. capucina* y *A. granulata* son de hábitat planctónico (Gasse, 1986; Kramer y Lange-Bertalot, 1991; Ehrlich, 1995; Stoermer *et al.*, 1996). El conjunto de las tres especies refleja las características actuales del lago. *F. capucina* es indicadora de altos niveles de nutrimentos, en particular fósforo (Bennion, 1994). *A. minutissimum* es pionera después de una perturbación (Peterson y Stevenson, 1992; Hodgson *et al.*, 1997), en este caso la intensa tala reciente y *A. granulata* tolera aguas más turbias y eutróficas que otras especies del mismo género como *A. ambigua* (Kilham *et al.*, 1986; Bennion, 1994).

En la secuencia sedimentaria estudiada (Figura 5) la ceniza que marca la base corresponde a la erupción histórica del volcán San Martín de 1664. Los datos en su conjunto son consistentes y permiten dividir el registro en dos zonas al nivel de los 30 cm, lo que en tiempo corresponde de 1664 a 1963 para la primera zona y de 1963 a 2001 para la segunda. Los datos de diatomeas en los sedimentos del núcleo, superficiales y muestras de plancton fueron analizados mediante un análisis de correspondencia AC. Los valores del eje 1 del (AC) también sustentan la división del núcleo en dos zonas. La primera zona, de 1664 a 1963, está caracterizada por valores altos del eje 1 del (AC) y está dominada por *Aulacoseira ambigua*, *A. granulata* y *A. muzzanensis*, que en conjunto indican condiciones de menor cantidad de nutrimentos (mesotrofia) aguas menos turbias y un poco más profundas que en la actualidad. El polen indica la recuperación de la vegetación tropical después de la caída de la ceniza de 1664, con el lago rodeado de selva tropical, la cual estuvo mejor representada entre 1800 y 1963. La etapa entre 1785 a 1885, fue dominada por *Fragilaria* spp., con algunas plantas acuáticas como *Pachira aquatica* que sugieren un nivel de agua un poco más somero que el resto del intervalo entre 1663 y 1964. En el año de 1921 se detecta la primera presencia de polen de *Zea mays* en el registro, asociado a un máximo de *A. granulata*, esto indica una primera fase de impacto humano durante la cual es probable que se hayan deforestando pequeñas áreas para practicar la agricultura.

La segunda zona, de 1963 a 2001, está marcada por un cambio en los valores del eje 1 del AC hacia valores más bajos y un cambio en el conjunto de diatomeas, con una disminución en *A. granulata* y *A. muzzanensis*, que prácticamente desaparecen; un aumento en *A. minutissimum* acompañada entre los 30 y los 10 cm (1963-1998) por especies perifíticas —su hábitat preferencial es fijo sobre un sustrato— y aerófilas —su hábitat preferencial es en ambientes inundados temporalmente— algunas de ellas indicadoras de los más altos niveles de nutrimentos. Este conjunto indica que entre 1963 y 1998 el lago sufrió el máximo impacto humano. Los datos de polen indican un cambio

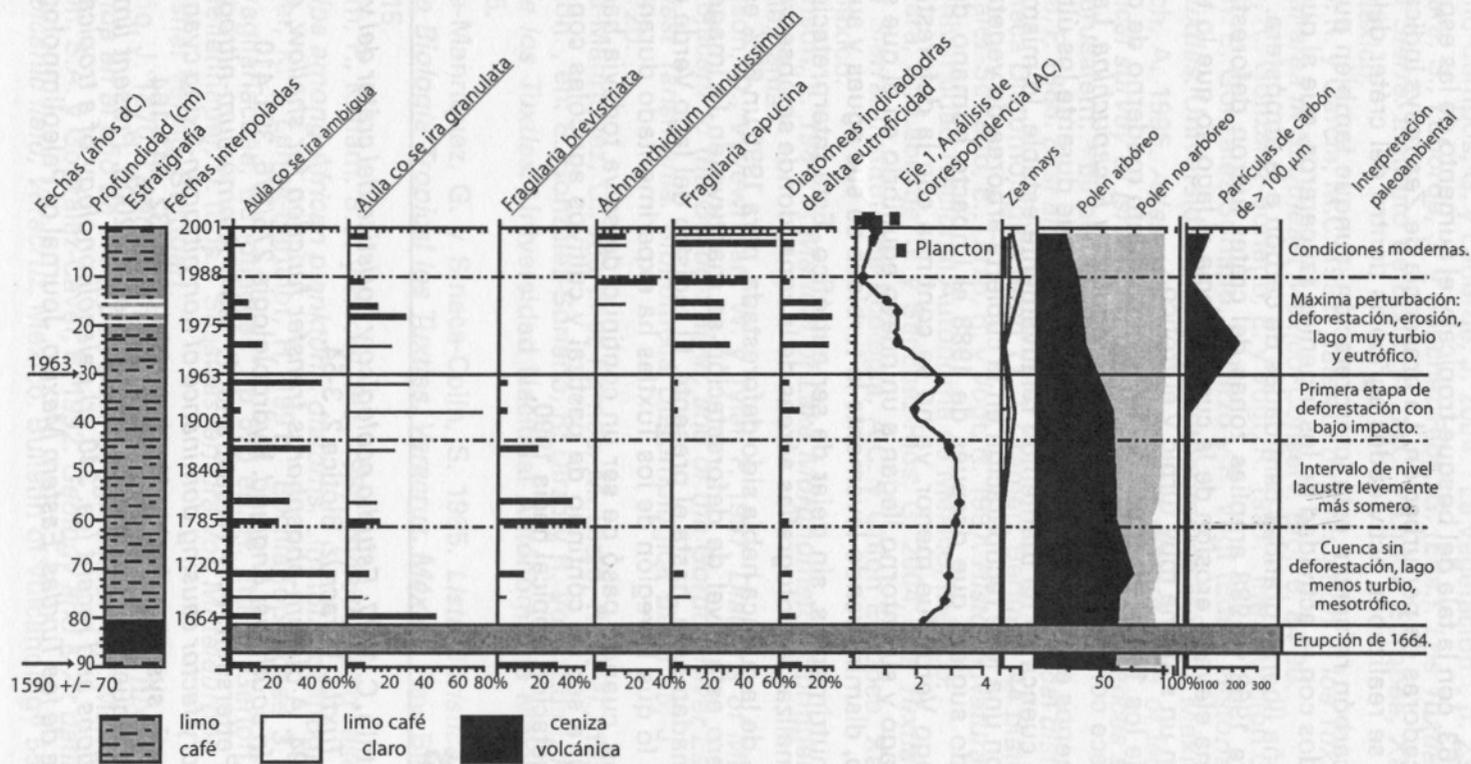


Figura 5. Datos resumidos de la estratigrafía de microfósiles (diatomeas, polen, carbón), valores del eje 1 del AC, e interpretación paleoambiental del núcleo VRUI, lago Verde, los Tuxtlas, Veracruz. (modificado de Caballero *et al*, 2006).

brusco hacia 1963, con la tala del bosque tropical y el aumento de las especies herbáceas indicadoras de perturbación. La presencia de *Zea mays* indica que en este tiempo se realizaban actividades agrícolas dentro del cráter del lago y los picos de carbón refuerzan esta interpretación, aunque también pueden estar relacionados con la actividad de los ingenios azucareros, que al quemar el bagazo de caña liberan grandes cantidades de carbón a la atmósfera. Todo indica que entre 1963 y 1988 amplias zonas del cráter fueron deforestadas, favoreciendo una elevada erosión de la cuenca hacia el lago, lo que lo transformó al lago en un sistema muy turbio y eutrófico.

Por arriba de los 10 cm, después de 1998, el conjunto moderno de diatomeas se establece con *A. minutissimum*, *A. granulata* y *F. capuchina*. La presencia más o menos estable de este conjunto, indica que durante los últimos 10 a 15 años la cuenca se ha mantenido relativamente estable, lo mismo refleja el polen con una leve recuperación en la cubierta arbórea de vegetación secundaria. Todo sugiere que después de 1988 el impacto humano dentro del cráter de lago Verde fue menor, ya no se continúa con la deforestación del cráter y el lago y su entorno llegan a un nuevo equilibrio en el que se recupera un poco, disminuyendo levemente la turbidez de sus aguas y su concentración de nutrimentos, sin dejar de ser eutrófico. Esta interpretación es sustentada al analizar las fotografías aéreas de la zona, donde se observa que en 1980 un 40% de la cuenca había sido deforestada, para 1990 un 60% estaba deforestada, pero este nivel de deforestación se mantuvo en la imagen de 1994 y, aproximadamente, hasta el presente. El registro del lago Verde es un claro reflejo de lo que la región de los Tuxtlas ha experimentado durante las últimas décadas, cuando pasó de ser un continuo de selva todavía hacia la década de 1950, a ser un continuo de pastizal y cultivos agrícolas con islas aisladas de vegetación tropical hacia 1990.

REFERENCIAS

- Álvarez del Castillo, C. 1977. *Estudio ecológico y florístico del cráter del volcán San Martín Tuxtla, Veracruz*. Biótica 2, 3-54.
- Bennion, H. 1994. *A diatom-phosphorus transfer function for shallow, eutrophic ponds in southeast England*. Hydrobiologia 275/276, 391-410.
- Blomqvist, P., Pettersson, A. y Hyenstrand, P. 1994. *Ammonium-nitrogen: A key regulatory factor causing dominance of non-nitrogen-fixing cyanobacteria in aquatic systems*. Archiv für Hydrobiologie 132, 141-164.
- Caballero, M., Vázquez, G., Lozano-García, M.S. et al., 2006. *Present limnological conditions and recent (ca. 340 yr) palaeolimnology of a tropical lake in the Sierra de los Tuxtlas, Eastern Mexico*. Journal of Paleolimnology 35, 83-97.

- Castillo-Campos, G. y Laborde, J. 2004. "La vegetación", p. 231-265, en: Guevara, S., Laborde, J. y Sánchez-Ríos, G. (Eds.). *Los Tuxtlas, El Paisaje de la Sierra*. Instituto de Ecología, A.C. y Unión Europea, Xalapa, Veracruz, México.
- Dirzo, R. y García, M.C. 1992. *Rates of deforestation in los Tuxtlas, a neotropical area in Southeast Mexico*. *Conserv. Biol.* 6, 84-90.
- Dirzo, R., González-Soriano, E. y Vogt, R. 1997. "Introducción General", p. 3-7, en: E. González-Soriano, R. Dirzo y R. Vogt (Eds.). *Historia Natural de los Tuxtlas*. Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Ehrlich, A. 1995. *Atlas of the inland-water diatom flora of Israel. The geological survey of Israel and the Israel academy of sciences and humanities*. Jerusalem: +60 plates. 166p.
- Gasse, F. 1986. *East african diatoms, taxonomy, ecological distribution*. Bibliotheca Diatomologica Band 11, J. Cramer., Berlin: + 44 plates. 201p.
- González-Soriano, E., Dirzo, R. y Vogt, R. 1997. *Historia Natural de los Tuxtlas*. Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Guevara, S., Laborde, J. y Sánchez-Ríos, G. 2004. *Los Tuxtlas. El Paisaje de la Sierra*. Instituto de Ecología, A.C. y Unión Europea, Xalapa, Veracruz, México.
- Håkanson, L. 1981. *A Manual of Lake Morphometry*. Springer-Verlag, Berlin, Alemania.
- Hodgson, D., Vyvewrman, W. y Tyler, P. 1997. *Diatoms of Meromictic Lakes Adjacent to the Gordon River, and of the Gordon River Estuary in South-west Tansmania*. Bibliotheca Diatomologica Band 35, J. Cramer, Berlin, 172p.
- Ibarra-Manríquez, G., Martínez-Ramos, M. Dirzo, R. et al., 1997. "La Vegetación", en: E. González-Soriano, R. Dirzo y R. Vogt (Eds.). *Historia Natural de los Tuxtlas*. Universidad Nacional Autónoma de México, México, 61-85.
- Ibarra-Manríquez, G. y Sinaca-Colín, S. 1995. *Lista florística de la Estación de Biología Tropical los Tuxtlas, Veracruz, México*. *Rev. Biol. Trop.* 43, 75-115.
- Kilham, P., Kilham, S.S. y Hecky, R.E. 1986. *Hypothesized resource relationships among African planktonic diatoms*. *Limnol. Oceanogr.* 31, 1169-1181.
- Kramer, K. y Lange-Bertalot, H. 1991. "Bacillariophyceae 3. Teil: Centrales, Fragilariaceae, Eunotiaceae". p 576 en: H. Ettl, J. Gerloff, Heyning, H. y Mollenhauer, D. (Eds.). *Süßwasserflora von Mitteleuropa Vol. 2/3*. Gustav Fisher Verlag, Stuttgart.
- Moziño, J. 1870. *La erupción del volcán de San Martín Tuxtla (Veracruz), ocurrida en el año de 1793*. *Bol. Soc. Geogr. Estad. Rep. México* 2, 62-70.
- Nelson, S.A. y González-Caver, E. 1992. *Geology and K-Ar dating of the Tuxtla volcanic field, Veracruz, Mexico*. *Bulletin of Vulcanology* 55, 85-96.

- Paerl, H.W. 1988. *Nuisance phytoplankton blooms in coastal, estuarine, and inland waters*. *Limnol. Oceanogr.* 33, 823-847.
- Peterson, C.G. y Stevenson, R.J. 1992. *Resistance and resilience of lotic algal communities: importance of disturbance timing and current*. *Ecology* 73, 1445-1461.
- Roelke, D. y Buyukates, Y. 2002. *Dynamics of phytoplankton succession coupled to species diversity as a system-tool for study of Microcystis population dynamics in eutrophic lakes*. *Limnol. Oceanogr.* 47, 1109-1118.
- Schoeman, F.R. 1973. *A systematic and ecological study of the diatom flora of Lesotho with special reference to the water quality*. Vand W. Printers, Pretoria: pp. + 10 plates. 355p.
- Soto, M. y Gamma, L. 1997. "Climas", en: Dirzo, R., González-Soriano, E. y Vogt, R. (Eds.). *Historia Natural de los Tuxtlas*. Universidad Nacional Autónoma de México, México, pp. 7-23.
- Sousa, M. 1968. *Ecología de las leguminosas de los Tuxtlas, Veracruz*. Anales Instituto de Biología, UNAM. México 39, Serie Botánica (1), 121-160.
- Stoermer, E.F., Emmert, G., Julius, M.L. et al., 1996. *Paleolimnologic evidence of rapid recent change in Lake Erie's trophic status*. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 53, 1451-1458.
- Torres-Orozco, R.B., Jiménez-Sierra, C. y Pérez-Rojas, A. 1996. *Some limnological features of three lakes from Mexican neotropics*. *Hydrobiologia* 341, 91-99.
- Vázquez, G., Favila, M.E., Madrigal, R. et al., 2004. *Limnology of crater lakes in los Tuxtlas, Mexico*. *Hydrobiologia* 523, 59-70.
- Vázquez, G., Jiménez, S., Favila, M.E. et al., 2005. *The relationship between seasonal dynamics of phytoplankton and the cyanobacterial dominance in a eutrophic crater lake (los Tuxtlas, México)*. *Ecoscience* 12 (4), 485-493.
- Whitmore, T. 1989. *Florida diatom assemblages as indicators of trophic state and pH*. *Limnol. Ocenogr.* 34, 882-895.

LAS AGUAS INTERIORES DE MEXICO

CONCEPTOS Y CASOS

Guadalupe de la Lanza Espino



AGT EDITOR, S.A.

Guadalupe de la Lanza Espino
Departamento de Zoología; Instituto de Biología
Universidad Nacional Autónoma de México

Salvador Hernández Pulido
Instituto de Biología; Universidad Nacional Autónoma de México

Coordinador editorial: Abelardo Rojas Flores
Composición tipográfica: José Jaime Gutiérrez Aceves

La presentación y arreglo en conjunto de LAS AGUAS INTERIORES DE MÉXICO: CONCEPTOS Y CASOS, SON propiedad del editor. Ninguna parte de esta obra puede ser reproducida o transmitida, mediante ningún sistema o medio electrónico o mecánico (incluyendo el fotocopiado, la grabación o cualquier método para recuperar y almacenar información), sin la autorización por escrito del editor.

Derechos reservados
© 2007, AGT Editor, S. A.
Progreso 202 Planta Alta, Col. Escandón
México, 11800, D.F.

Primera edición, septiembre 2007
ISBN: 978-468-463-137-3
Impreso y hecho en México
Printed and made in Mexico

