

# Sensibilidad de lagos mexicanos a alteraciones en el medio ambiente: ejemplos del Eje Neovolcánico\*

Sarah E. Metcalfe

School of Geography and Earth Resources,  
University of Hull, Reino Unido

Sarah L. O'Hara

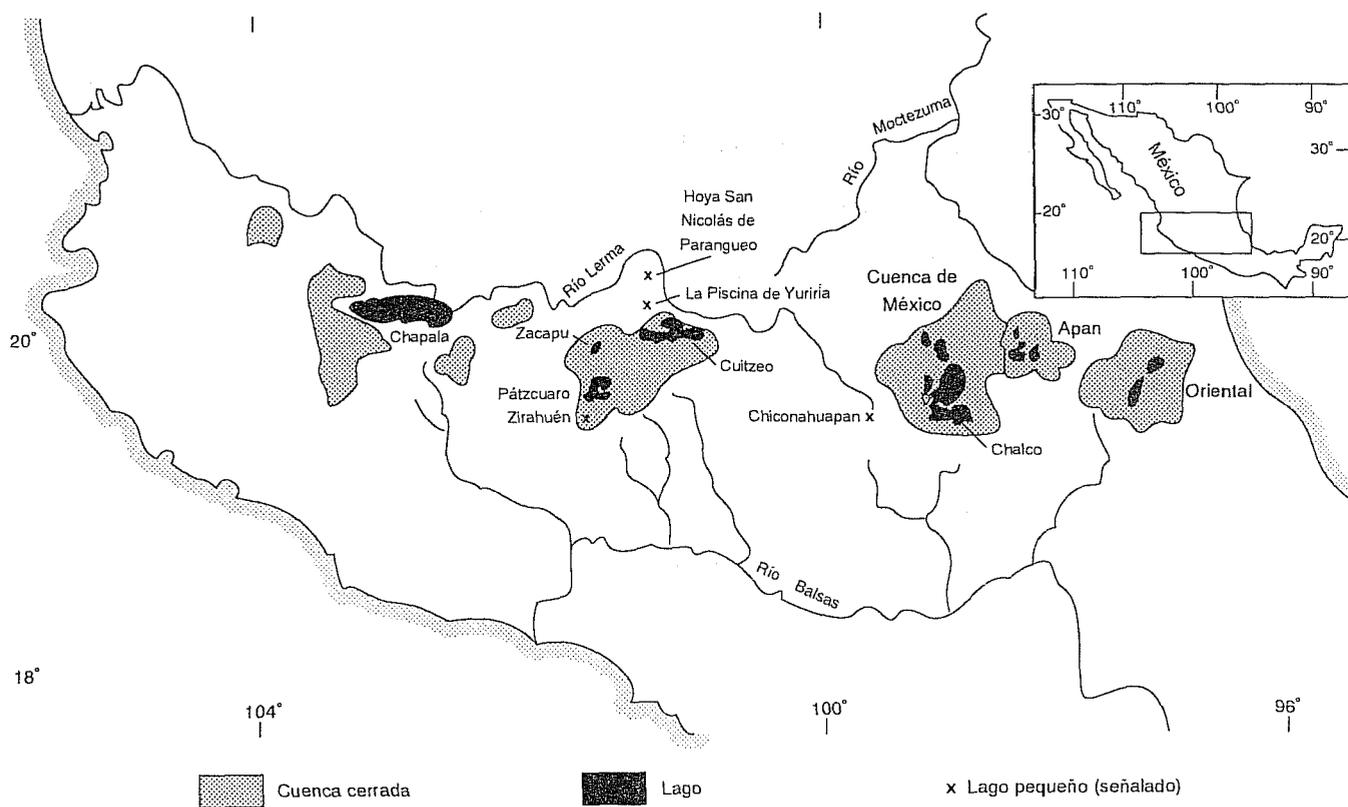
Department of Geography,  
University of Sheffield, Reino Unido

*Las investigaciones paleolimnológicas sobre diversos valles con lagos de la región central del Eje Neovolcánico de México (19°N) han revelado una serie de alteraciones en la captación y eutroficación de esos lagos. Para los últimos 4000 años, los registros con que se cuenta son muy completos. En este artículo se presentan los resultados de tres valles localizados a lo largo del corte transversal norte-sur: la Piscina de Yuriria (Guanajuato), Zacapu (Michoacán) y Pátzcuaro (Michoacán). Los cambios en el tipo de sedimentos, la susceptibilidad magnética ( $\chi$ ), la química del sedimento y el contenido de diatomeas se han utilizado para reconstruir las variaciones del balance entre las fuentes de sedimento alóctono y autóctono, los cambios en la composición del agua y el estado de los nutrientes del lago. Las fluctuaciones climáticas a lo largo del Holoceno tardío parecen haber sido poco importantes, aunque significativas para la explotación de la captación individual. La fase más seca parece haber ocurrido cerca del año BP 1100. La sensibilidad a la variación climática se incrementa hacia el norte a lo largo del área de estudio. Los tres valles registran un cierto número de episodios de alteraciones en la captación, el más reciente data del año BP <1100, que resulta ser el más pronunciado. El último episodio de alteraciones también estuvo acompañado de una clara aceleración en la eutroficación de todos los lagos. Las alteraciones importantes de tipo antropogénico son anteriores a la llegada de los españoles a México y resaltan la sensibilidad de los sistemas de lagos y de su captación a las actividades humanas.*

El Eje Neovolcánico (ENV) cruza México aproximadamente a los 19°N, creando un cinturón de altiplanicies volcánicas que data principalmente del Cuaternario (Demant, 1981). La actividad volcánica que originó estas altiplanicies también dio forma a una serie de valles de lagos, algunos de los cuales son o han estado hidrológicamente cerrados (véase ilustración 1). En la parte central del Eje, en los estados de Michoacán y sur de Guanajuato, se encuentran valles que anteriormente formaban parte del sistema de drenaje del

río Lerma (Barbour, 1973). Los lagos de esa zona son el Cuitzeo, el de Pátzcuaro y el Zirahuén. En la región sur de Guanajuato hay un grupo distinto de lagos, ubicado en los volcanes extintos y los cráteres formados por la explosión del valle de Santiago, los cuales incluyen las Hoyas de San Nicolás de Parangueo y Rincón de Parangueo. Entre ellos, los lagos de los cráteres del valle de Santiago y los valles de drenaje interno en Michoacán forman un corte transversal norte-sur, a lo largo de un importante gradiente climático. La precipitación

1. Mapa de localización del Eje Neovolcánico y las principales cuencas de lagos



se incrementa de norte a sur de <700 mm por año a >1000 mm. La altitud, en general, aumenta a lo largo del mismo corte transversal. En el libro *Síntesis Geográfica de Guanajuato* (Anon, 1980) y en el volumen correspondiente a Michoacán (Anon, 1985), pueden encontrarse mayores detalles sobre la geología, clima e hidrología de la región.

Se sabe poco de las culturas preclásicas y clásicas de Michoacán y el sur de Guanajuato, aunque parece que esta región estuvo densamente poblada (Freddolino, 1973, C. Arnauld, com. pers.). Uno de los grupos preclásicos reconocidos es la cultura chupícuar, que tomó su nombre de un sitio cercano al lago de Cuitzeo (Michoacán). Su periodo principal de ocupación fue entre 500 a.C. y 400–500 d.C. (Porter, 1956) ó 350 a.C. a 300 d.C. (Piña Chan, sin fecha). En la región sur de Guanajuato se ha identificado la misma tradición cultural. Los habitantes del Posclásico en el área fueron los purépechas o tarascos, quienes controlaban la región cuando los españoles llegaron en 1521 (Freddolino, 1973). Los orígenes de este grupo son oscuros, pero en la época de la conquista eran rivales de los aztecas o mexicas, considerados como la "potencia" regional.

En este artículo se presentan datos de tres valles que yacen en el corte transversal norte-sur a lo largo del ENV: la Piscina de Yuriria (Guanajuato), Zacapu (Michoacán) y Pátzcuaro (Michoacán) (véase ilustración 1). Los resultados de las investigaciones paleolimnológicas en estos valles revelan una serie de episodios, de alteraciones recientes en la captación y eutroficación. Los efectos, tanto del cambio climático como del impacto humano, son evidentes y ponen de relieve la sensibilidad de estos sistemas a las perturbaciones del medio ambiente.

**La Piscina de Yuriria, Guanajuato**

Es el sitio localizado en la región más septentrional (20°13'N) del área de estudio. El lago se localiza en un cráter pequeño cuya edad se desconoce, aunque dataciones *K-Ar* recientes en otros cráteres en el valle de Santiago sugieren una antigüedad de 11.9 a 2.4 millones de años (Urrutia Fucuguachi, com. pers.). El valle es pequeño (0.75 km<sup>2</sup>), topográficamente cerrado y se ubica a una altitud de 1740 msnm. El clima del área es subhúmedo/semiárido, con una precipitación anual promedio de 600–800 mm. Queda muy poca

vegetación natural en la región debido a los desmontes hechos durante periodos prolongados.

El pueblo de Yuriria cubre el lado norte del cono, extendiéndose hacia el lago artificial de Yuriria. Se sabe que a finales del siglo XV, el rey purépecha Tangaxoan II se anexó ahí una colonia y cambió el nombre de la población a Yuririapúndaro ("Lago de Sangre") (Gómez de Orozco, 1972; Guzmán Cintora, sin fecha).

Durante la década de 1980, el lago del cráter sufrió una desecación progresiva. En 1982 tenía una profundidad de 1.5 m, un pH de 11, una conductividad eléctrica (CE) de 26,000  $\mu\text{s/cm}$  en el centro y era muy salino (15%). El agua era hiperalcalina (alcalinidad 65–70 meq  $\text{l}^{-1}$ ) y de tipo  $\text{Na} - \text{CO}_3 - \text{Cl}$ . El nivel de nutrientes en el agua era bastante alto ( $\text{NO}_3 = 7.8 \text{ mg l}^{-1}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5 = 2.5 \text{ mg l}^{-1}$ ). Un muestreo obtenido en 1985 reveló que la concentración de  $\text{Na}$  y  $\text{Cl}$  era todavía más alta (Hales, com. pers.) Alrededor del lago se encuentra una serie de manantiales, casi todos secos. Aquellos que aún producen agua tienen un pH cercano a 7.5, una CE de 500  $\mu\text{s cm}^{-1}$  y una composición de  $\text{Na} - \text{CO}_3/\text{HCO}_3$ . El agua de estos manantiales se utilizaba para irrigar los terrenos sembrados en la pared interior del cráter. La química del lago es compatible con la concentración de evaporación de los manantiales. Para 1989, el fondo del lago estaba seco.

Como parte de la investigación efectuada por el Tropical Palaeoenvironments Research Group (Oxford) se tomaron dos núcleos de la Piscina de Yuriria, utilizando un muestreador Livingstone modificado. En 1981, se reunió un núcleo de 4 m y en 1985 se obtuvo otro de 14 m. Aquí se presentan los resultados del primero.

El núcleo de 4 m ha sido datado por MSA en ocho niveles. Para la porción más profunda, de 380–385 cm, se estima una edad aproximada de BP 4100  $\pm$  200 (RIDDL-62) y para la muestra más alta (44–46 cm) una fecha aproximada de BP 875  $\pm$  90 (OxA-1963). Sin embargo, hubo una inversión en la porción superior del núcleo, con la datación más reciente (año BP 570  $\pm$  80) (OxA-1964) proveniente de 74–75 cm. Las únicas fechas que han sido ajustadas para  $^{13}\text{C}$  son de los años BP 4100  $\pm$  200 y 2849  $\pm$  120 (RIDDL-62). Para las otras fechas proporcionadas por el Oxford Radiocarbon Accelerator Laboratory, hubo variaciones ligeras entre las fechas ajustadas y las no ajustadas.

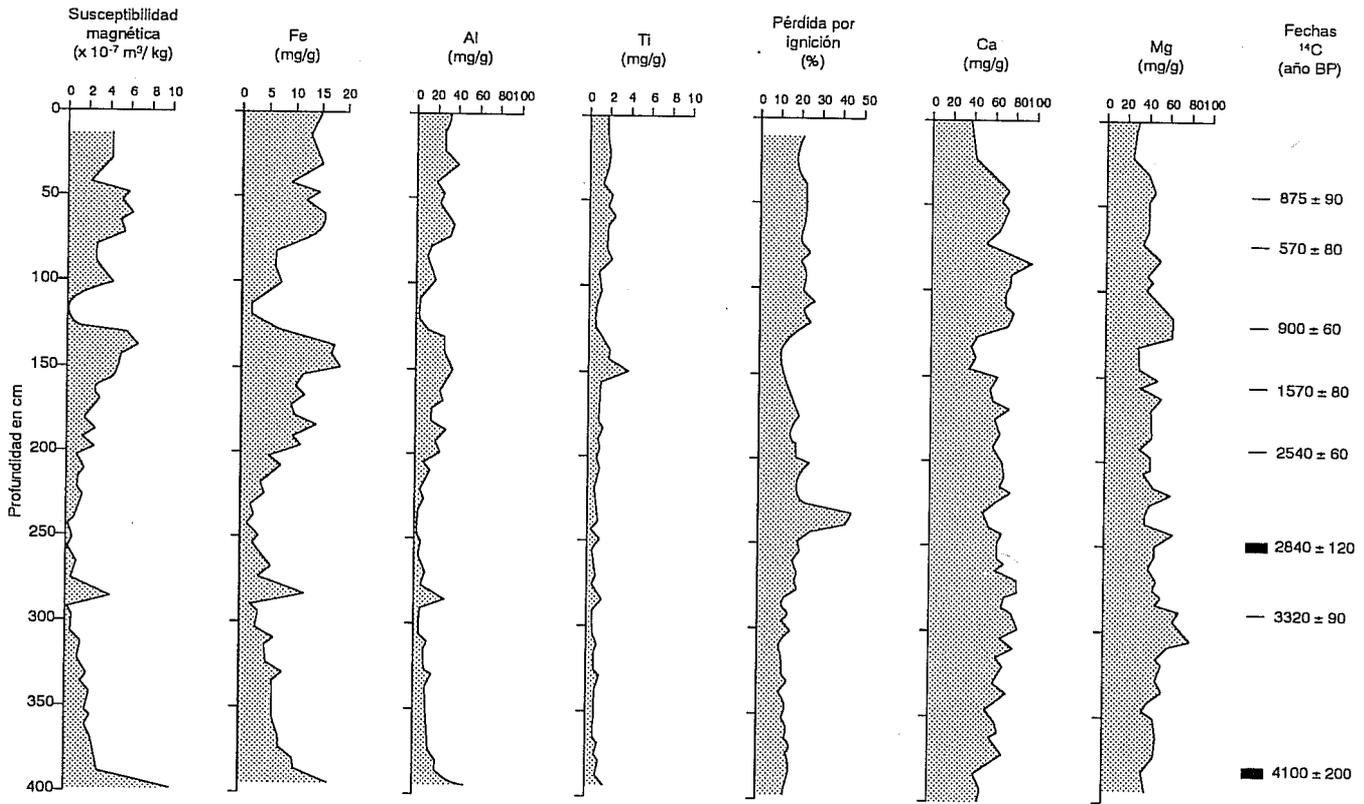
Los sedimentos del núcleo fueron principalmente diatomáceas suaves *gyttja* con un contenido de carbonato <30% (calcita endogénica y pruebas

ostrácodo). Philip Hales, de la Escuela de Geografía, Oxford, ha realizado una serie de análisis en los sedimentos, de los cuales se presenta una selección en este artículo. La mayor parte de los análisis elementales y las medidas de susceptibilidad magnética ( $\chi$ ), proporciona una evidencia clara de periodos de alteraciones en la captación. Los altos niveles de  $\text{Al}$ ,  $\text{Fe}$ ,  $\text{Ti}$  y  $\chi$  reflejan material de detrito (i. e., sedimento alóctono) que entra al lago por captación (Engstrom y Wright, 1984). Por su parte, los intervalos donde el  $\text{Ca}$  y  $\text{Mg}$  son más abundantes, probablemente reflejan una estabilidad en la captación, con producción de sedimento autóctono en forma predominante. Con base en estas suposiciones, ha sido posible identificar cuatro periodos de alteraciones de captación (véase ilustración 2): el de los 10 cm más bajos, antes del año BP 4100; entre 290–270 cm (aproximadamente años BP 3320–2840); entre 180 y 130 cm (años BP 2540 a 900) y uno final, arriba de 80 cm y que data del periodo a partir del año BP 900. Basado en la calibración de Stuiver y Pearson, el BP 2540 equivale a 786 a.C. (Preclásico) y BP 900 a 1160 d.C. (Posclásico).

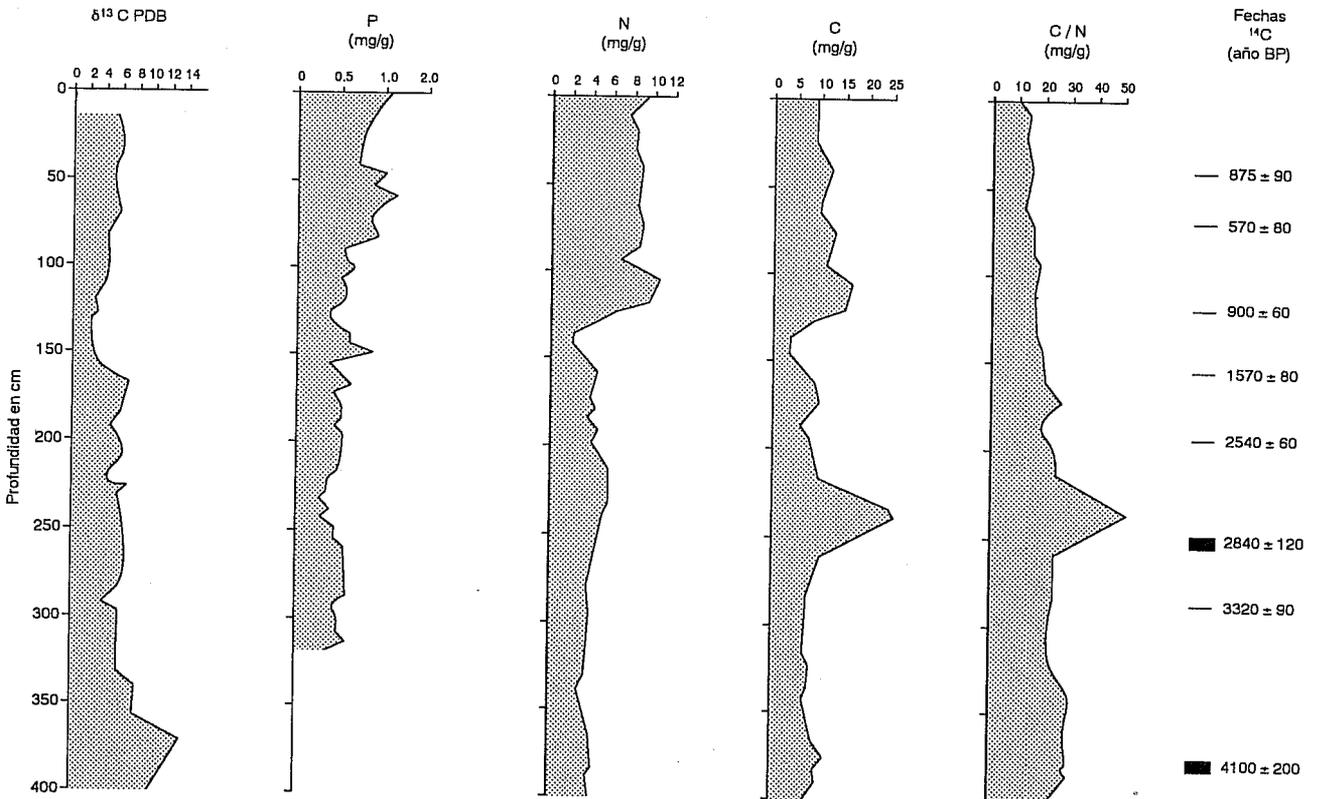
También se llevó a cabo el análisis de nutrientes de la muestra ( $\text{P}$ ,  $\text{N}$  y  $\text{C}$  orgánico total) y de las proporciones  $\text{C/N}$  y  $\delta^{13}\text{C}$  (la mayor parte carbonato) (véase ilustración 3). En general, el  $\text{P}$  y  $\text{N}$  tuvieron valores altos, arriba de los 130 cm de la muestra. Las proporciones altas de  $\text{C/N}$  reflejan altas velocidades de descomposición. Los valores de  $\delta^{13}\text{C}$  en la muestra son muy positivos, aunque debe hacerse notar que aun cuando las medidas del Oxford Radiocarbon Accelerator Laboratory, todavía están enriquecidas, son menos extremas. El  $\delta^{13}\text{C}$  puede ser un indicador de paleoproduktividad, debido a que las altas velocidades de fotosíntesis pueden producir valores de  $\delta^{13}\text{C}$  enriquecidos, en especial si las algas y las plantas sumergidas utilizan el bicarbonato disuelto pero no el  $\text{CO}_2$  atmosférico. También se han reportado enriquecimientos extremos en salmueras en estado de evaporación.

Se realizó un estudio de grupos modernos de diatomeas y de la química del agua (Metcalf y Hales, en prensa) a fin de proporcionar elementos análogos para la interpretación del material fósil. En el sondaje se determinaron grupos de diatomeas a intervalos de 10 cm y se identificaron ocho zonas (véase ilustración 4). En el núcleo se presentaron dos grupos importantes de diatomeas. En las zonas I, III, V y VIII predomina uno de *Navicula elkab*, *N. halophila* y *Nitzschia spp.*, muy similar a la flora del lago en 1982. Estos grupos

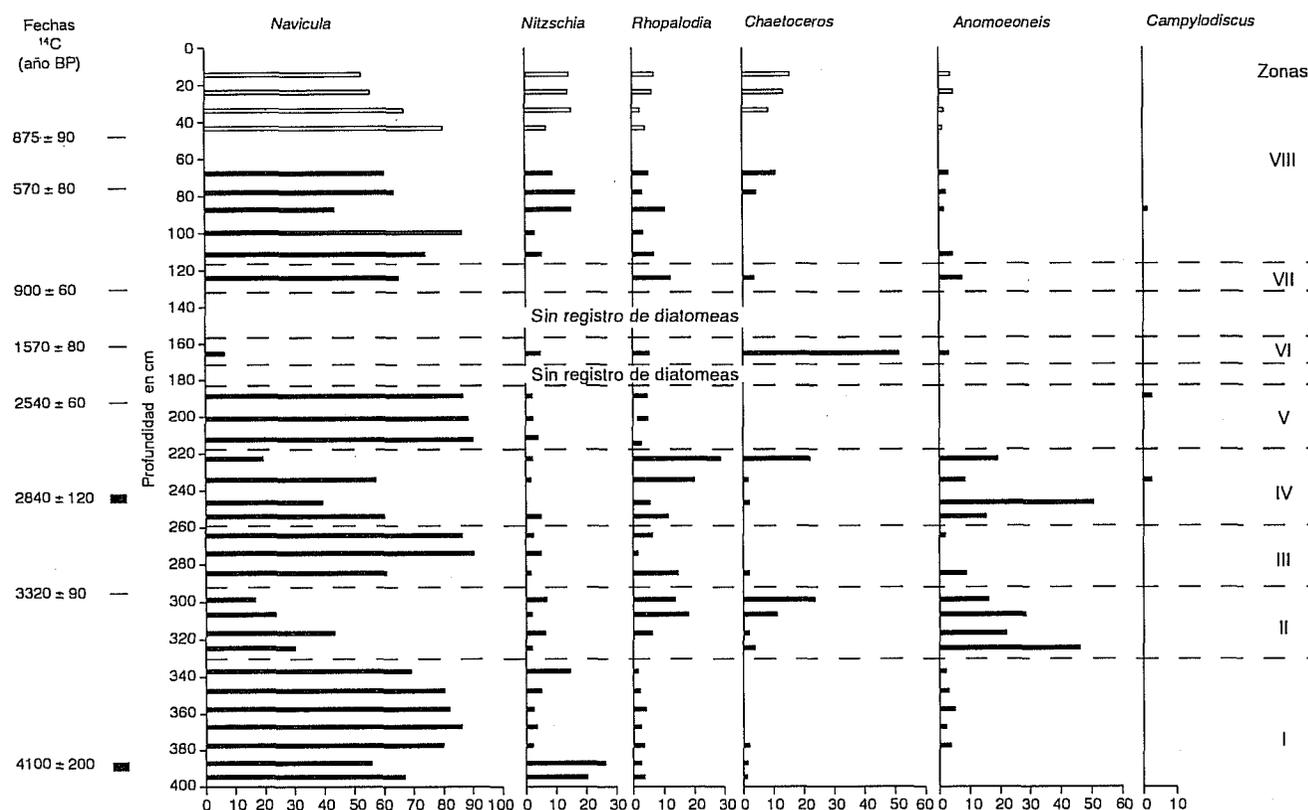
2. Susceptibilidad magnética ( $\chi$ ), pérdida por ignición y elementos más importantes, la Piscina de Yuriria



3.  $\delta^{13}\text{C}$ , nutrientes seleccionados y C/N, la Piscina de Yuriria



## 4. Géneros más importantes de diatomeas, la Picina de Yuriria



taxonómicos se encuentran en el plancton de lagos poco profundos, bien mezclados, con alcalinidad alta y una composición de  $Na - CO_3$  (Hecky y Kilham, 1973; Gasse, 1986). El segundo grupo en importancia consistió en *Anomooneis sphaerophora*, *A. costata*, *Rhopalodia gibberula* y quistes de *Chaetoceros muelleri* (zonas II y IV). Estas son especies principalmente bénticas, de alcalinidades muy altas. Algunas se encuentran sólo en agua rica en  $Cl$ . La presencia de *Chaetoceros muelleri* puede ser particularmente vital en este aspecto, ya que el *Chaetoceros* es un género esencialmente marino y el *C. muelleri* se presenta en aguas dulces ricas en  $Na - Cl$  (Gasse, 1986; Bradbury, 1989). Este grupo probablemente indica un lago menos profundo y más concentrado. La flora del sondeo fue analizada utilizando CANOCO, el cual apoyó la división en zonas efectuada de manera visual.

El registro de diatomeas del sondeo se estudia con detalle en otro artículo (Metcalf, 1990; Metcalf y Hales, en prensa), pero aquí se resumirá en el contexto del análisis de sedimento.

El agregado de la porción inferior del sondeo indica un lago poco profundo y eutrófico. Los niveles de precipitación tal vez fueron similares a los actuales. La causa de entrada de detritos en

esa época es incierta. En la zona II hay un giro en el agregado de diatomeas, que probablemente refleja el secado del lago hasta convertirse en un pantano salino rico en  $Cl$ . La estabilidad de captación durante este intervalo tal vez fue resultado de la falta de escurrimiento. Esto duró un lapso aproximado entre los años BP 4100 a 3300. La zona III indica un regreso a aguas abiertas, con condiciones más diluidas ( $CO_3 > Cl$ ). Las alteraciones en la captación quizá se debieron al incremento en la precipitación, lo que produjo un aumento en la erosión. La aparición de picos negativos de  $\delta^{18}O$  puede avalar la idea de un aumento en el escurrimiento. Estas condiciones duraron del año BP 3320 al 2840. Existe la posibilidad de que la alteración en la captación haya sido el resultado de la actividad antropogénica temprana, ya que coincide con la introducción de *Zea mays* cultivado en otras áreas de la región (Brown, 1985; Metcalf *et al.*, 1989); un análisis de polen podría confirmar lo anterior.

Entre los agregados de las zonas IV y V, hasta ca. el año BP 2500 ocurrió otra oscilación. En la zona V, la preservación de valvas se vuelve muy pobre. Entre 185 y 125 cm, el registro de diatomeas fue irregular. Una muestra tomada a 64

cm forma la zona VI. Aquí dominan valvas robustas de *C. meneghiniana* y quistes de *C. muelleri* y el agregado es de importancia dudosa. Durante este intervalo, el lago era probablemente efímero. Las condiciones de sequía (más todavía que las actuales) persistieron a lo largo del periodo de los años BP ca. 1600 a 900 (450 a.C. a 1150). El agregado de diatomea termina a los 122 cm, con un agregado casi monoespecífico dominado por *Navicula muralis*, una diatomea algal de planicies lodosas (Hustedt, 1961-66). Entonces la captación era estable y las condiciones eran probablemente de mucha sequía. La siguiente etapa fue de condiciones más húmedas y el agregado de la zona VIII es muy similar al registrado en el lago en 1982. Se nota un incremento en la abundancia de *Nitzschia spp.* en el extremo del sondaje, a 86 cm, gran parte constituida por heterótrofos *N* obligados (Cholnoky, 1968). El aumento en el porcentaje de *Nitzschia* es probablemente una señal de eutroficación. Los niveles en aumento de *N*, *P* y *C* orgánico en los sedimentos serían un fundamento para esta interpretación. En la captación se indica una alteración severa (niveles altos de  $\chi$ , *Al*, *Ti*, etc.) y la retroalimentación de *C* antiguo quizá sea el motivo de la inversión en las fechas en el extremo superior del núcleo. La datación de  $570 \pm 80$  es probablemente la última fecha confiable, la cual, de acuerdo con Stuiver y Pearson, equivale a 1380 d.C. (rango de 1289 d.C. a 1427). Por lo tanto, este importante episodio de alteración y eutroficación data del periodo Posclásico de la ocupación purépecha. Resulta interesante notar el hecho de que el nombre purépecha del pueblo se traduce como "Lago de Sangre" y Fray Matías de Escobar (1729) atribuyó el color rojo del lago a los escurrimientos de tierra roja de la captación. Es probable que el secado reciente del lago se deba a la disminución del manto regional de agua subterránea causado por el bombeo usado para sostener la irrigación agrícola de la zona. Esta desecación ha tenido un impacto considerable en la explotación del lago, que con anterioridad se utilizaba para recreación y recolección de "moscos".

El núcleo de 4 m de la Piscina de Yuriria registró una serie de cambios ambientales ocurridos durante los últimos 4000 años. Se notan tres periodos en los que el clima era aparentemente más seco que en la actualidad; de los tres, el más reciente fue el más severo. Ocurrieron cuatro periodos de erosión acelerada, algunos de los cuales pueden atribuirse a cambios de clima; el más severo, quizá estuvo asociado con alteracio-

nes antropogénicas. El lago fue eutrófico durante todo el periodo registrado, pero se presentó un enriquecimiento durante los últimos 500 años.

### Laguna Zacapu, Michoacán

El valle de Zacapu o Tzacapu (Michoacán) se localiza a 19°51'N, y es una amplia depresión rodeada de altiplanicies volcánicas. Los sedimentos lacustres cubren un área aproximada de 261 km<sup>2</sup> (Correa Pérez, 1974) (véase ilustración 5). El fondo del valle puede dividirse en dos secciones: una zona baja y pantanosa en la porción este y central, con una elevación de 1973 a 1978 msnm y, otra elevada, en la porción oeste, llamada "Lomas". El valle recibe entre 800 y 900 mm de precipitación anual (Anon, 1985). Ha sido difícil determinar la vegetación natural debido al desmonte.

Zacapu fue un importante centro ceremonial del Posclásico purépecha. Este grupo entró en el valle alrededor de 1200 d.C. (Freddolino, 1973) y con posterioridad emigró al valle de Pátzcuaro (ver adelante).

Tradicionalmente, el valle se conocía como la Ciénaga de Zacapu y antes de ser drenado estaba ocupado por pantanos y áreas de agua abierta conocidas como lagos (Noriega y Noriega, 1923). El drenado artificial comenzó a finales del siglo XIX, pero no se completó sino hasta finales de la década de 1960 (Alatorre Padilla, 1966). Lo que queda en la actualidad es la laguna Zacapu, que se ubica en el área suroeste del valle.

Un extenso muestreo efectuado en manantiales, pozas y la laguna Zacapu ha demostrado que la química del agua es similar en todo el valle.  $Mg + Ca + (Na + K)$  se presentan en proporciones casi iguales, con alto contenido de  $CO_3/HCO_3$ . La laguna tiene una profundidad máxima de 14 m y es alimentada por manantiales que nacen al pie de flujos de lava basáltica, a través de otra poza llamada La Zarcita. En 1982 la concentración de nitrato en el lago era de 8 mg l<sup>-1</sup> y 1 mg l<sup>-1</sup> de fosfato. La flora diatomácea actual tanto del lago como de sus canales tributarios y de muchas de las pozas, recibe una fuerte contaminación, y es muy común la *Nitzschia palea* (Lange-Bertholot, 1979). Las muestras de diatomea moderna tuvieron poco valor como elementos análogos para la interpretación del material fósil.

En el valle de Zacapu se han estudiado varios sitios, muchos de los cuales cubren el intervalo de los años BP 8000 a 4000, aunque los últimos 4000 años son los de interés primario para este artículo.

El análisis se centra en un sitio que cubre el periodo más reciente (sitio 3, ilustración 5).

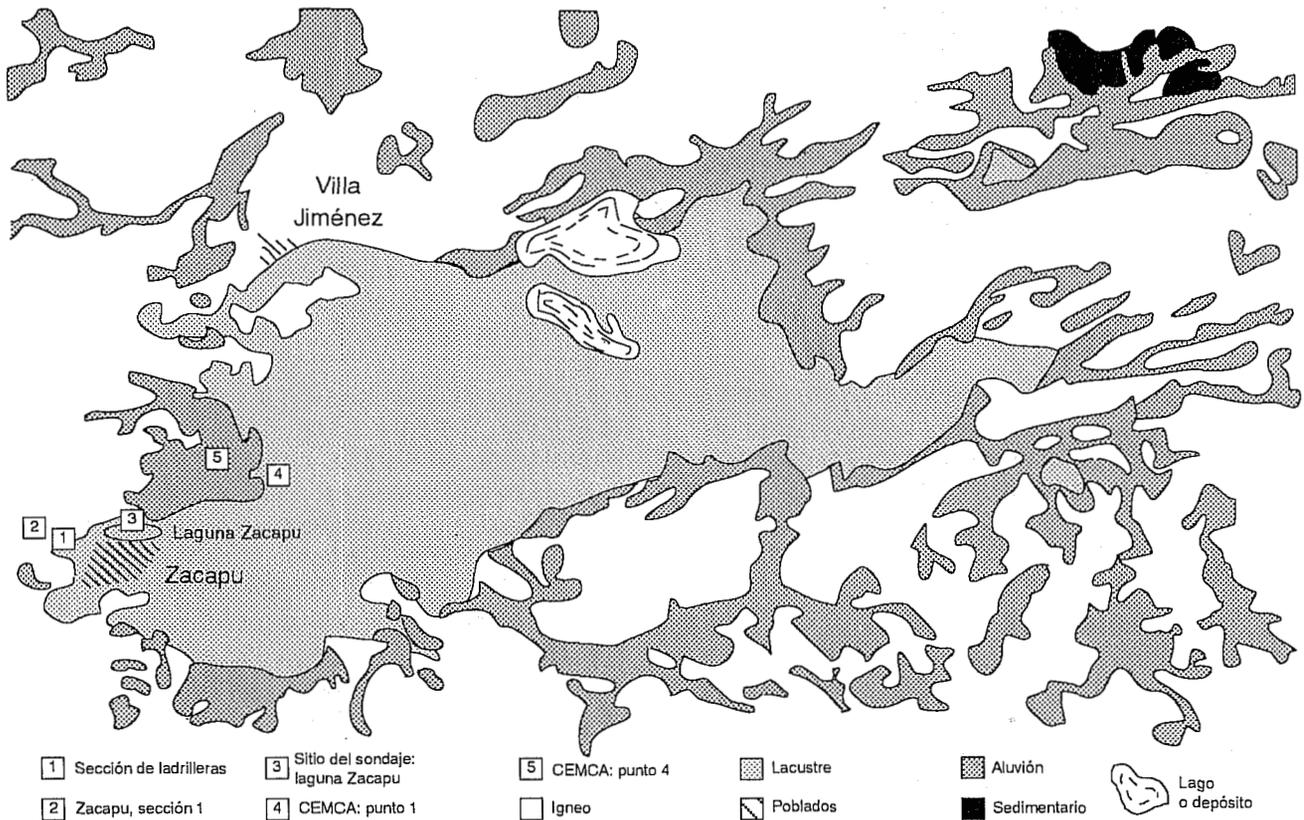
En la laguna Zacapu se tomó un núcleo de 14.3 m, utilizando un muestreador Livingstone modificado (por miembros de Tropical Palaeoenvironments Research Group, Oxford). Los sedimentos consistieron en *gyttja diatomea* suave y mostraron un desarrollo estratigráfico pobre; en algunas partes se detectaron restos de planta y pelo de raíces. Los sedimentos no resultaron adecuados para aplicar la datación por radiocarbono convencional debido a su bajo contenido de carbono, pero fueron datados por MSA. La datación se llevó a cabo en diferentes fracciones orgánicas, en 13 niveles. Las fechas obtenidas del grueso de materia orgánica fueron escogidas como las más confiables y forman las bases de este estudio. Las dificultades encontradas para fechar este sondaje se han discutido en otro artículo (Fowler, 1985; Metcalfe *et al.*, 1989). La muestra datada más profunda provino de 1365–1370 cm y se obtuvo una fecha aproximada del año BP 3800 ± 120 (OxA-1006). La muestra menos profunda, de 64.4–74.4 cm, rindió una edad del año BP 1190 ± 150 (OxA-222), pero ésta no fue la fecha más reciente (la cual provino de 266–276 cm). La dificultad

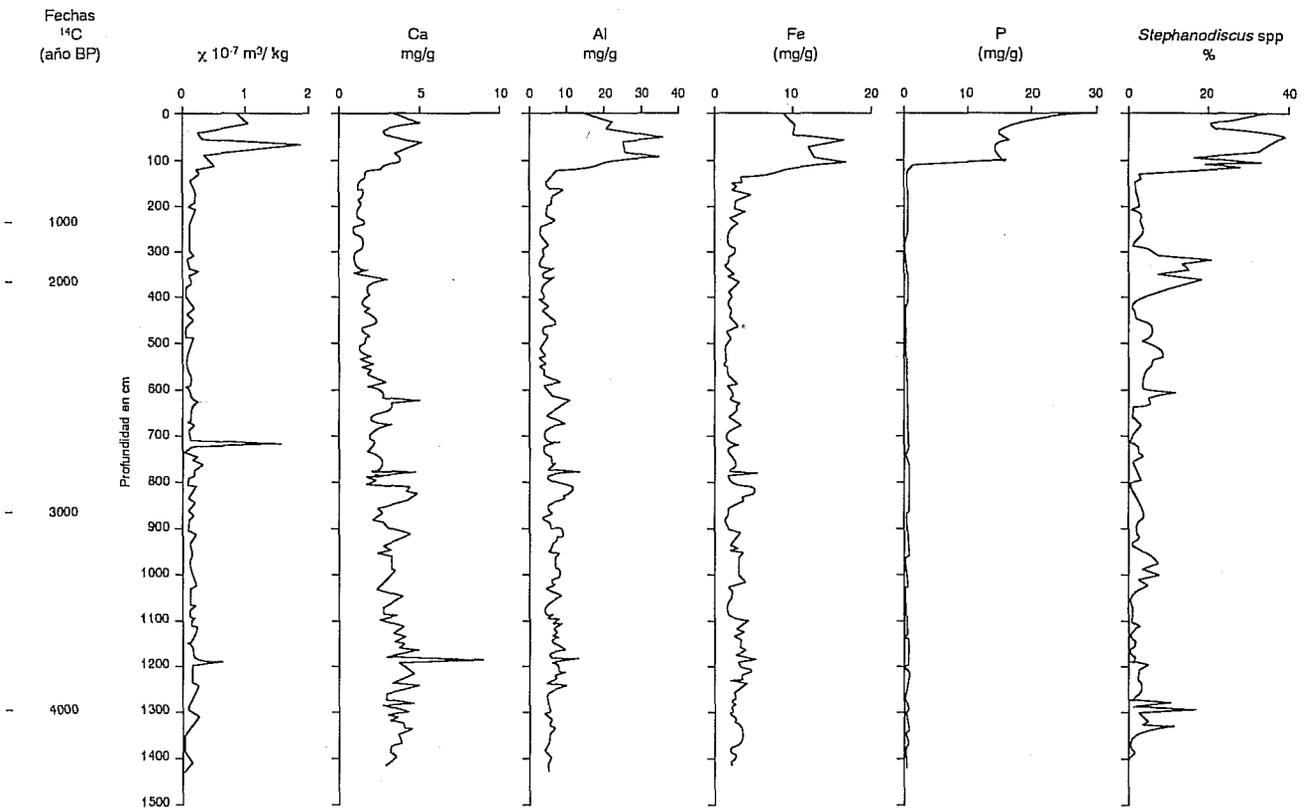
para datar este sondaje puede atribuirse, en parte, a la elevada velocidad de sedimentación, pero la autoalimentación del material proveniente de la captación también puede haber jugado algún papel. Se asume que la última fecha confiable, ascendiendo en el sondaje, es la de 266–276 cm.

Philip Hales analizó una variedad de elementos y  $\chi$  en el sondaje. Los resultados fueron más bien monótonos, excepto en los 130 cm superiores (véase ilustración 6). En esta sección superior del sondaje, se encontraron altos niveles de *Na*, *Al*, *Fe* y  $\chi$ , que probablemente reflejan una entrada de material alóctono, como resultado de una erosión acelerada. Se detectó también un incremento en el *P* total. La importancia del incremento de *C* es incierta; podría ser reflejo de un incremento en la precipitación de *CaCO<sub>3</sub>*, asociada con la floración de fitoplancton (Kelts y Hsü, 1978), pero el contenido de carbonato de los sedimentos es bajo (5 a 7%). También hay una cresta menor en la química, cerca de los 1189 cm, abajo de la datación de radiocarbono del año 3800 ± 100 BP.

El registro de diatomeas del sondaje es complejo y bastante excepcional. Los géneros presentes más importantes son: *it Nitzschia*, *Aulacoseira*,

5. Valle de Zacapu, localización de los sitios de muestreo



6. Elementos más importantes y susceptibilidad magnética ( $\chi$ ), sondaje de Zacapu

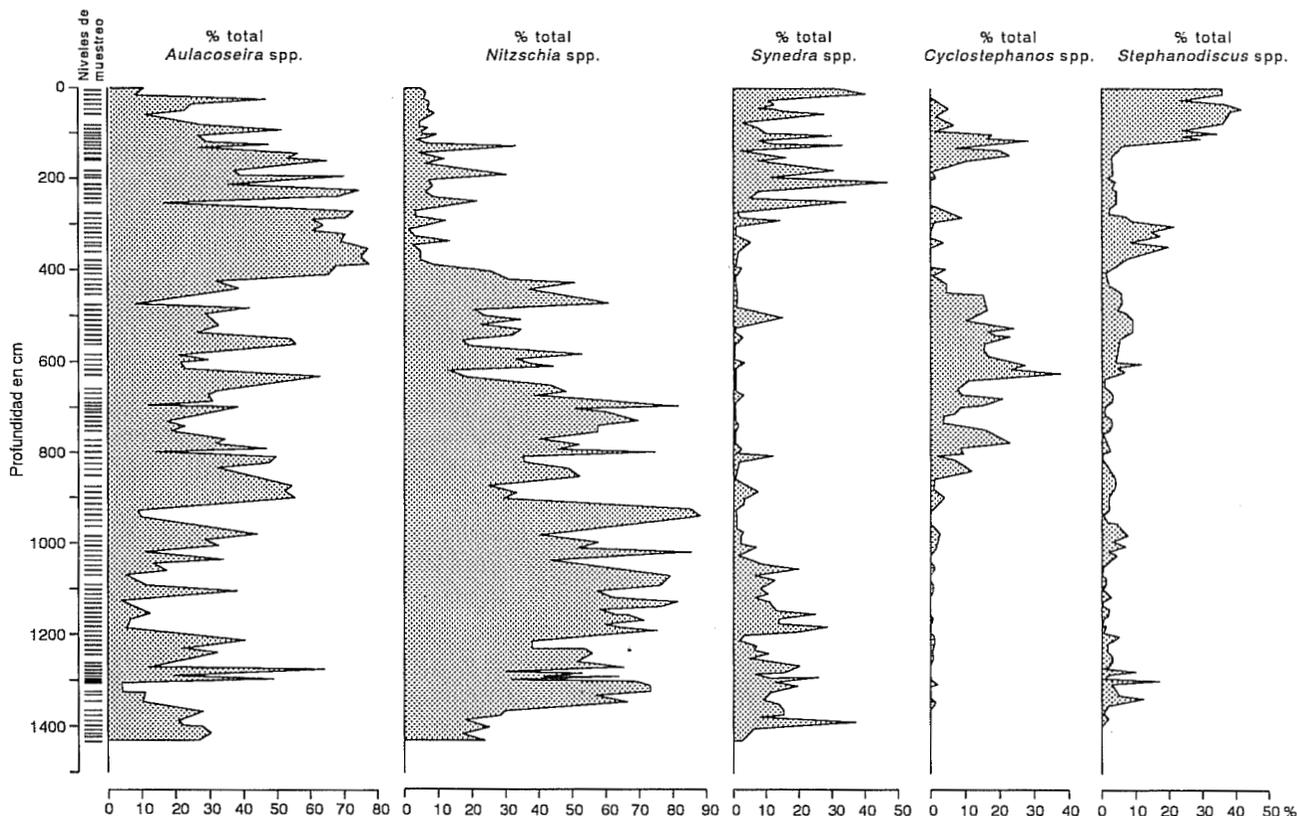
Synedra, Cyclostephanos y *Stephanodiscus* (véase ilustración 7). No fue posible identificar *Cyclostephanos* más allá del nivel genérico y las especies nuevas no han sido descritas todavía. No se cuenta con datos ecológicos modernos para estos grupos taxonómicos. Un análisis detallado de las diatomeas del sondaje y su taxonomía se encuentra en Metcalfe (1988). En términos generales, la ecología de los géneros más abundantes puede resumirse como sigue:

*Nitzschia* – existió probablemente en las condiciones más alcalinas y a una temperatura más alta que la actual. *Aulacoseira* (antes *Melosira*) – menos alcalina, más turbia, con niveles altos de sílice disponibles. *Synedra* – cuando el sílice era más abundante (Kilham *et al.*, 1986), posiblemente debido al incremento de flujo en primavera. *Stephanodiscus* – se encontraron sólo formas pequeñas de este género en sedimentos provenientes del Holoceno de Zacapu. El máximo, entre 300 y 400 cm, es de *S. minutus*, mientras el extremo superior del máximo comprende *S. subtilis* y *S. tenuis* (*S. hantzschii* fo. *tenuis*). Aunque las tres especies indican condiciones eutróficas, el *S. tenuis* en particular, está asociado aparentemente con eutrofización antropogénica. De acuerdo con Kilham *et al.*, (1986) el

*Stephanodiscus* requiere de altos niveles de *P* para ser dominante en el plancton y el punto máximo de *Stephanodiscus* aparece cuando surge un pico en la concentración de *P* en los sedimentos.

El registro de diatomeas en el sondaje muestra una serie de fluctuaciones poco importantes, a lo largo de los últimos 4000 años, con algunos de los cambios más notables registrados en los 4 m superiores de la muestra. La zona de diatomeas IX (datada en 2230 año BP a 368 – 378 cm) indica la presencia de un lago profundo (?) y algo frío, aunque éste parece haber perdido profundidad muy rápido, moviéndose hacia la porción superior de la zona. Entre las zonas IX y X se encontraron microfósiles de carrizo, con lípidos cuyo origen es de plantas superiores. Este periodo probablemente registra el nivel más bajo del lago obtenido durante el sondaje. La fecha del año 1100  $\pm$  90 BP (OxA-226) proviene de este límite (266 – 276). La edad calibrada por Stuiver y Pearson, para esta datación es 960 d.C. (rango 859 a 1050 d.C.), situando el periodo de sequía en el Clásico tardío o Posclásico temprano. Arriba del extremo superior de la zona IX (280 cm), hubo un incremento rápido en el número de diatomeas (excediendo  $10^{11}$  valvas/gramo entre 200 y 100 cm): las diatomeas

7. Géneros más importantes de diatomeas, sondaje de Zacapu



presentes indican una eutroficación cultural y el rendimiento de sedimentos evidencia un aumento en la erosión de las pendientes del valle. Todos estos factores indican una fase importante en la alteración de la captación y enriquecimiento del lago que cubre, por lo menos, los periodos Posclásico y Poshispánico.

Desafortunadamente, los sitios investigados en otras porciones del valle no cubren la parte más reciente de su historia. Sin embargo, el punto 1, en lo que anteriormente era la superficie del pantano (sitio 4, ilustración 5), denota el impacto humano temprano. La porción superior de la secuencia del punto 1 (arriba de +20 a +30 cm datado año 3480 ± 80 BP) registra un incremento en  $\chi$ , en gramíneas y una disminución en *Cheno-Ams* (S. Xelhuanti, com. pers.), lo cual sugiere la presencia humana en el valle. La fecha calibrada es alrededor de 1865 BP, que es anterior a la evidencia arqueológica más temprana de ocupación humana. Esta fecha sin embargo, concuerda con las alteraciones tempranas en otras partes de la región (Metcalf et al., 1989).

En el valle Zacapu hay, por tanto, rastros de alteraciones humanas preclásicas. Sin embargo, ocurrió una importante degradación ambiental en

el periodo Posclásico, durante la ocupación purépecha. El profesor J. Tricart ha reportado el abandono de los pueblos purépechas en el siglo XIII debido a una erosión catastrófica del suelo. El único registro importante del clima, a lo largo del Holoceno tardío, es de un periodo seco que ocurrió en el Clásico tardío, alrededor del año 1100 BP.

**Lago de Pátzcuaro, Michoacán**

El lago de Pátzcuaro (19°35'N) se ubica en un valle donde anteriormente se encontraba un río, en la actualidad obstruido por lava. La elevación del fondo del valle es 2035 msnm, y está rodeado de flujos de lava y conos volcánicos. Pátzcuaro recibe una precipitación cercana a 1000 mm anualmente (Anon, 1985). La vegetación natural del valle ha estado sujeta a alteraciones considerables, pero las pendientes superiores aún son boscosas (bosques secundarios de pinos/robles principalmente). Los suelos del bosque, llamados *caránda* o tierra colorada son fértiles por naturaleza, pero muy lábiles a la erosión.

El valle fue el centro del imperio purépecha (Tarasco) y se estima que tenía una población de

60 000 a 105 000 al momento de la conquista española (Gorenstein y Pollard, 1983). Los purépechas llegaron al valle cerca del año 1300 d.C., entrando a un área que ya estaba poblada.

En el valle se ha realizado una serie de estudios, e.g. De Buen (1944), Deevey (1944), Hutchinson et al., (1956), Gorenstein y Pollard (1983). El estudio paleoecológico publicado más reciente es el de Watts y Bradbury (1982).

El lago tiene forma de "C", y cubre un área de 130 km<sup>2</sup>, incluyendo las islas (Chacón Torres et al., 1989); tiene una profundidad máxima de 12.20 m, aunque en la porción sur en raras ocasiones excede los 4 m. A partir de los registros de profundidad máxima, parece haber comenzado a disminuir en profundidad desde la década de 1940. El pH se encuentra en un rango de 9.0 a 9.7, la CE es cerca de 800  $\mu$ S/cm y es de composición  $Na > Mg - CO_3/HCO_3$ . El lago se clasifica como eutrófico, aunque el contenido de  $NO_3$  es bajo. El fósforo, la clorofila-*a* y los sólidos suspendidos muestran claras variaciones a lo largo del lago; son relativamente bajos en el sur y se incrementan hacia el norte (Chacón Torres, 1989). Los valores de  $SiO_2$  son bajos (<11 mg l<sup>-1</sup>), en especial cuando se les compara con la Piscina de Yuriria y Zacapu.

Se han reunido 20 núcleos cortos, con longitudes que van desde 1.42 hasta 2.85 m (véase ilustración 8): 6 en la porción sur, 8 en la porción central y 6 de la porción norte del lago; se han analizado para  $CaCO_3$ , pérdida por ignición (PPI), susceptibilidad magnética ( $\chi$ ), tamaño de partículas, contenido de humedad, densidad gruesa y, en algunos casos, química del sedimento. Aquí se describen muestras representativas de cada sección.

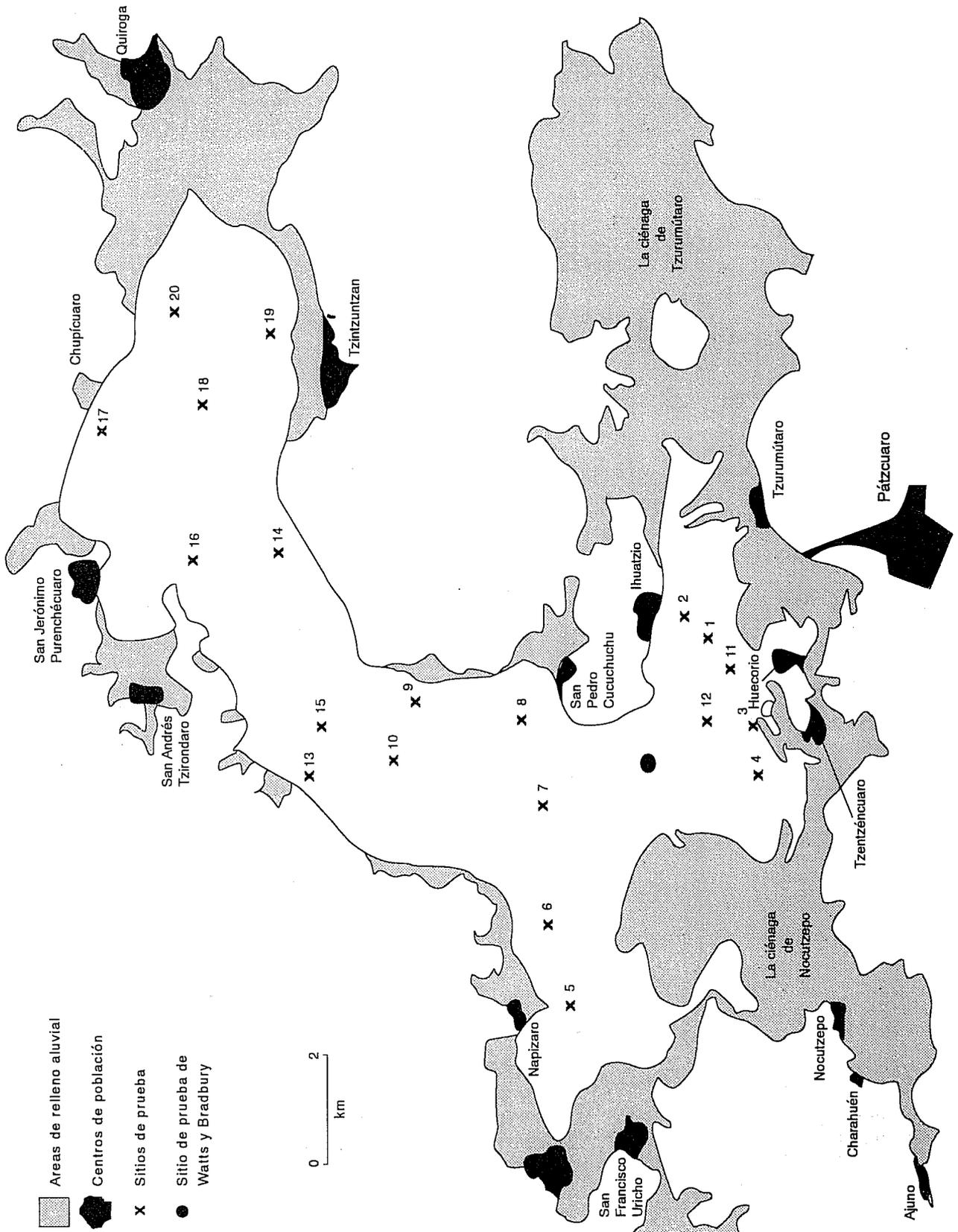
La muestra LP11, reunida en la parte sur del lago, consiste en 1.89 m de *gyttja* orgánica rica, pruebas ostrácodas, sedimentos de cieno y arcillas (véase ilustración 9). Se tienen tres dataciones por radiocarbono, obtenidas al fechar las pruebas ostrácodas por MSA: año 3640  $\pm$  70 BP (OxA-2819) a 174-175 cm, 2650  $\pm$  60 BP (OxA-2818) a 130-131 cm y 1190  $\pm$  70 BP (OxA-2817) a 79-80 cm. Estas fechas muestran que la velocidad de acumulación en este sitio se ha incrementado de 3.4 por 100 años entre los años 2650 y 1190 BP, a un estimado de 6.6 cm por 100 años, durante los últimos 1190 años. Los picos en  $CaCO_3$  corresponden a capas ricas en ostrácodas (véase ilustración 9). La PPI denota una disminución general en el sondaje. La  $\chi$  muestra picos entre 166-146 cm y 123-80 cm y también es alta a los 70 cm del extremo superior. Los niveles altos

de  $\chi$  corresponden a depósitos de arcilla. En el sondaje se identifican tres fases importantes de alteración. Cerca del año 3600 BP hubo un marcado cambio en el ambiente sedimentario, con reducción en la materia orgánica, en el  $CaCO_3$  y en el tamaño de las partículas, así como un pico pequeño en  $\chi$ . En la captación se apreció un corto lapso de desestabilización. En un segundo periodo, entre los 120 cm y 80 cm, se registra una alteración en la captación mucho más severa. La datación del año 2650 BP, inmediatamente abajo de esta unidad, proporciona una fecha máxima para el comienzo de este episodio de erosión. Entre 70 y 80 cm se encontró una capa rica en sedimentos ostrácodos. Durante la acumulación de estos sedimentos, hubo relativamente poca entrada de material de captación en el lago. Un tercer episodio de entrada de captación comenzó cerca del año 1000 BP y ha permanecido hasta el presente.

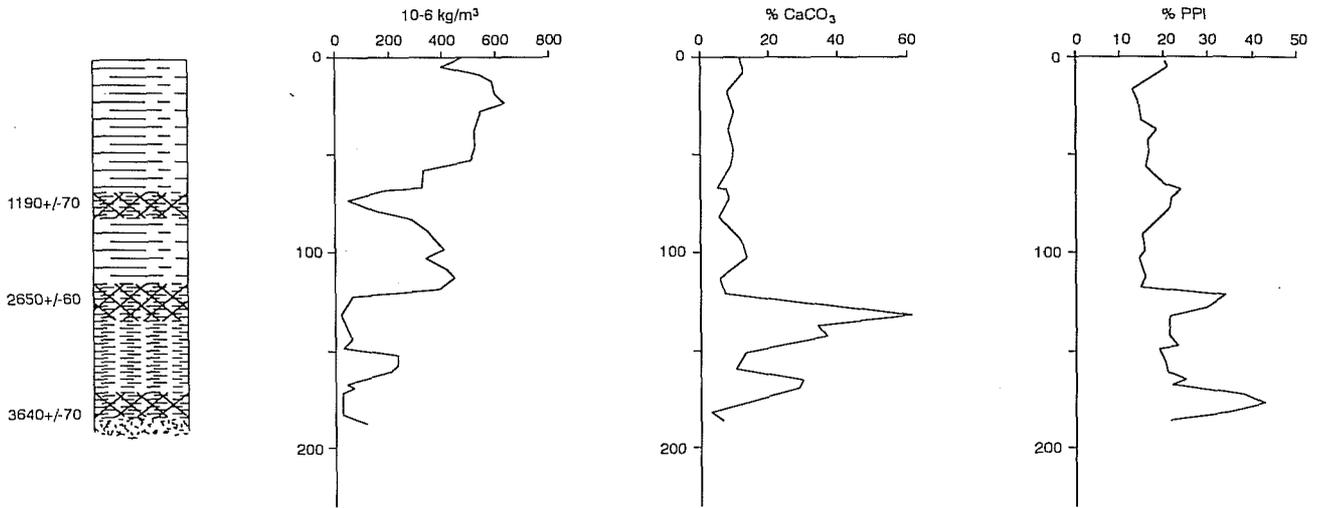
Para la porción central del valle, el presente estudio también incluyó un análisis de las muestras reunidas por Bradbury y Saporito. Su sondaje, de 14.2 m, se obtuvo en el sureste de la isla de Janitzio, en los límites de las porciones sur y centro del lago (véase ilustración 8). Este sondaje ya fue analizado para polen, diatomeas (Bradbury, datos sin publicar) y geoquímica (Saporito, 1975). Los 3.6 m superiores del sondaje también se analizaron para  $\chi_t$ ,  $\chi_{fd}$  y química adicional. Este estudio, conocido como "sondaje maestro", es el representativo de esta porción del valle. Los 3.6 m superiores del "sondaje maestro" (véase ilustración 10) están compuestos de *gyttja* orgánica rica, sedimentos ostrácodos ricos en cieno y arcilla; esta estratigrafía es semejante a la observada en LP11. La PPI es alta en *gyttja* en la porción inferior de esta sección, pero es en general baja, especialmente en las unidades de arcilla. Se registran tres picos en  $\chi$  (véase ilustración 10), el más bajo es pequeño, y los otros dos muy grandes, a 1.9 m en el fragmento superior del núcleo.

Los 3.6 m de la fracción superior del "sondaje maestro" cubren los últimos 5000 a 6000 años de acumulación de sedimento. La *gyttja* orgánica rica en la base de la sección tiene valores bajos de  $\chi$ , lo cual indica poca entrada de sedimento proveniente de la captación durante la acumulación de estos depósitos. Justo arriba de la fecha 3640  $\pm$  80 se presenta un pequeño pico de  $\chi$ . La temporalidad de esta alteración menor coincide con la primera aparición de *Zea mays* (maíz) en el registro de polen (véase ilustración 10), siendo un probable indicador de agricultura sedentaria en

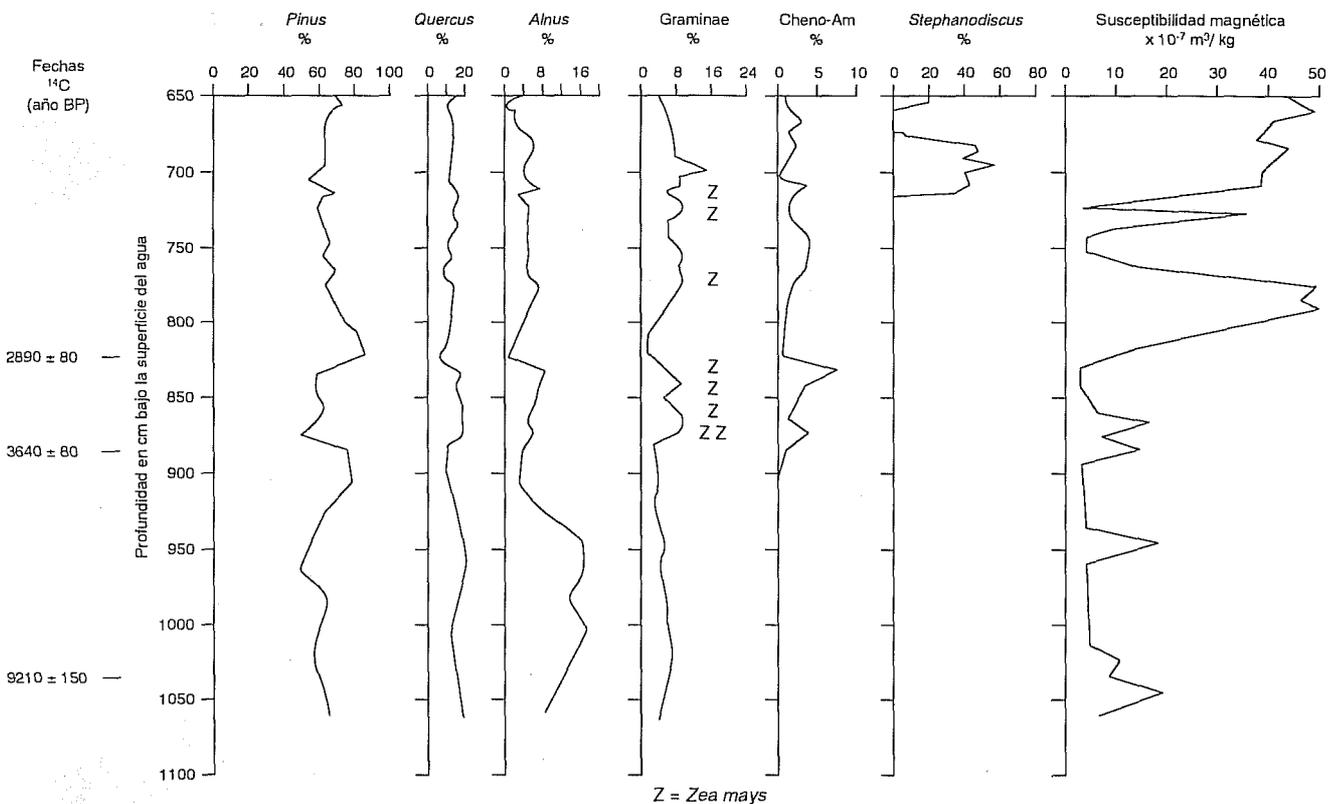
8. Localización de los sitios de sondaje, lago de Pátzcuaro



9. LP11, susceptibilidad magnética ( $\chi$ ), carbonato y pérdida por ignición, lago de Pátzcuaro



10. Sondaje maestro del lago de Pátzcuaro



el valle. Es casi sincrónico con un hecho similar registrado en LP11.

Un segundo episodio erosional, pero mucho más pronunciado, ocurrió en esta parte del valle al comienzo del año 2500 BP. Las entradas de sedimento han continuado casi sin interrupción hasta el presente, con el inicio de la fase

más reciente que comenzó hace cerca de 1000 años.

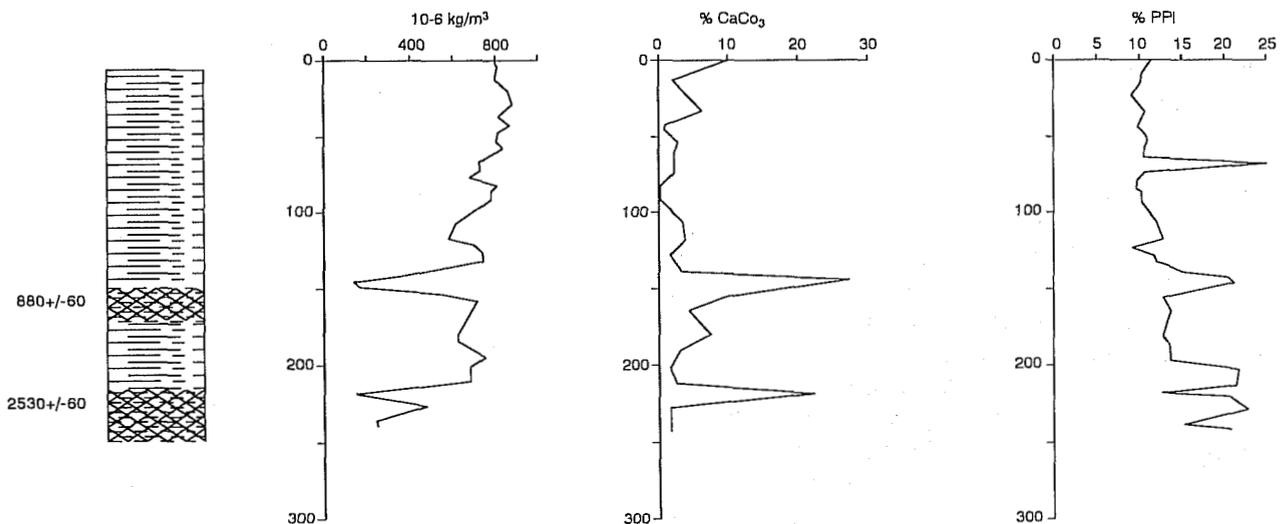
Al utilizar los datos sin publicar de Bradbury sobre diatomeas provenientes del "sondaje maestro", se comprueba que la abundancia relativa del planctónico *Aulacoseira granulata* sigue el mismo patrón que  $\chi$  y juntos proporcionan un indicador

claro de la turbidez en el lago. La ilustración 10 muestra la curva de abundancia de *Stephanodiscus spp.*, que proporciona evidencia de una fuerte eutroficación a lo largo de los últimos 900 años (Bradbury, com. pers.)

En la porción norte del lago, la LP19 se considera como representativa del sondaje. Se recuperó un sondaje de 2.4 m de longitud consistente en una capa basal ostrácoda que yace sobre 59 cm de arcilla; se encontró otra capa entre 145 y 156 cm, tapada por 145 cm de arcilla lisa (véase ilustración 11). Todos los sitios muestreados en la porción norte mostraron estratigrafías muy similares. Las dos capas de ostrácodos han sido datadas: año 2530 ± 60 BP (OxA-2823) a 233 cm y año 880 ± 60 BP (OxA-2822) a 149-150 cm. Aquí de nuevo, se registró un gran incremento en la velocidad de sedimentación en este sitio, aumentando de 4.4 cm en intervalos de 100 años a 16.6 cm por 100 años en los 150 cm superiores del sondaje. El contenido de materia orgánica en estos sedimentos es en general bajo, especialmente en los estratos arcillosos. La LP19 se caracteriza por un alto nivel de  $\chi$ , con tres picos distintos (véase ilustración 11). Hay un pico pequeño entre 215-223 cm, uno grande arriba de éste (650 - 700 x 10<sup>-6</sup> kg m<sup>-3</sup>) y un tercero arriba de los 150 cm. Es notoria la marcada disminución en  $\chi$  a los 150 cm, que coincide con la unidad de sedimentos ricos en ostrácodos. El tamaño de las partículas es fino, en particular arriba de 120 cm, donde la media es menor a 3  $\mu$ m. Es posible que este material tan fino sea el resultado del lavado de las pendientes del valle, porque la erosión en las barrancas produce sedimentos más gruesos.

El registro del valle de Pátzcuaro puede resumirse brevemente como sigue: el contenido de carbonato de los sedimentos es variable. En la porción sur del valle, el CaCO<sub>3</sub> presenta una concentración más alta en la base de los sondajes, mientras en el centro y norte hay dos picos de carbonato que pueden correlacionarse a lo largo del valle. Estas capas ostrácodas, ricas en carbonato, son la señal climática principal en esta porción del registro, con picos que reflejan condiciones muchos más secas. La susceptibilidad magnética es un claro indicador de la historia de la erosión del valle. Los sondajes provenientes de la porción sur del valle tienen más picos en  $\chi$  que aquellos del norte, aunque sólo los picos superiores indican una entrada importante de sedimento. Los sondajes del centro y norte registran dos grandes picos en  $\chi$ . Al compararlos, los registros de alteraciones muestran tres fases. La primera fase menor, registrada únicamente en la porción sur del valle, ocurrió cerca del año 3500 BP. Los sondajes de otras porciones del valle probablemente fueron muy cortos para capturar este evento. Cerca del año 2500 BP se presentó el primer episodio importante de erosión, afectando principalmente las porciones norte y centro del valle, con la entrada de muy poco sedimento a la porción sur. La gran mayoría del sedimento entrante al lago en ese momento fue material no intemperizado. Esta fase fue interrumpida por una sequía marcada que ocurrió cerca del año 1300 BP y resultó ser el depósito de carbonatos. Los grandes depósitos de sedimentos terminaron cerca del año 1000 BP, con una erosión acelerada que afectó a todo el valle. Inicialmente, el material intemperizado se depositó,

11. LP19 susceptibilidad magnética ( $\chi$ ), carbonato y pérdida por ignición, lago Pátzcuaro



pero después fue reemplazado por sedimentos no intemperizados, posiblemente debido a que toda la capa de suelo ya había sido removida. Durante este periodo, el lago se fue haciendo cada vez más eutrófico. Las dos fases más recientes fueron más o menos continuas, aunque la reducción en los escurrimientos durante las épocas de climas más secos disminuyó la entrada de sedimentos al fondo del valle. El último pico de alteración se explica por la alta densidad de población en el valle durante el periodo previo al arribo de los españoles. Pollard (1972) sugiere una densidad de 7000 personas por km<sup>2</sup> cerca de Tzintzuntzan al momento de la Conquista.

## Conclusiones

Las investigaciones efectuadas en los valles de lagos del ENV han revelado una serie de episodios con alteraciones en la captación y la eutroficación de los lagos durante los últimos 4000 años. La temporalidad de estos episodios es similar en los tres valles estudiados. Sin embargo, varía la sensibilidad de las captaciones ante las variaciones climáticas y las alteraciones antropogénicas. De los tres lugares estudiados, la Piscina de Yuriria, el más seco, parece ser el más sensible a los cambios climáticos. El periodo de sequía que más afectó a este lago, ocurrió entre los años 1570 y 900 BP. La evidencia de un lago cercano, La Hoya en San Nicolás de Parangueo (valle de Santiago), sugiere que este periodo seco puede haber sido la causa de una migración de la población (Metcalf et al., 1989). El registro de Zacapu indica sólo variaciones menores en el ambiente durante el Holoceno tardío, excepto para el periodo cercano al año 1100 BP. La sequía, fuertemente indicada en la Piscina de Yuriria, también se registra aquí. La Laguna Zacapu muestra un registro de eutroficación muy claro, probablemente de origen antropogénico, a lo largo de los últimos 1000 años o menos. La cronología de las alteraciones en la captación en Pátzcuaro es muy similar a la de la Piscina de Yuriria, aunque el primer episodio en Yuriria no está cubierto por los sondeos de poca profundidad de Pátzcuaro. Nuevamente, se registra eutroficación del lago en los sedimentos de la porción superior y en la actualidad forma parte de un importante problema de contaminación.

El primer periodo de alteración (relativamente de poca intensidad) podría estar asociado con la propagación del cultivo de maíz cerca del año 3500 BP. El segundo episodio de erosión acelerada, mucho más pronunciado, comenzó cerca del

año 2500 BP (la Piscina de Yuriria y Pátzcuaro) y el tercero se inició cerca del año 900 BP (la Piscina de Yuriria, Zacapu y Pátzcuaro). Es posible que ambos fueran interrumpidos por el comienzo de condiciones más secas, alrededor del año 1300 BP (posiblemente antes en el norte).

Las alteraciones importantes de la captación y la eutroficación de los lagos son anteriores a la llegada de los españoles a México. La erosión acelerada comenzó antes de la ocupación purépecha (Posclásico), presumiblemente debido al impacto de los habitantes del Preclásico y Clásico. Los resultados que se presentan aquí denotan la sensibilidad de los sistemas de lagos a las actividades humanas y su captación en el Eje Neovolcánico, y ello debe tenerse en mente al considerar una explotación futura.

## Nota

Ambas autoras agradecemos el apoyo obtenido por las becas de investigación NERC, bajo la supervisión del Dr. Alayne Street-Perrott (School of Geography, Oxford). O'Hara agradece también el apoyo de Conacyt (México), St. Hilda' College, Oxford (Muriel Wise Fund) y PESCA, Pátzcuaro. Un último reconocimiento de ambas a Phillip Hales por el uso de los datos geotérmicos.

\* Ponencia presentada en las Semanas Internacionales de Limnología, Guadalajara, México organizadas por la CNA; traducción: Luz María Moñoz de Cote Gudiño.

## Referencias

- Alatorre Padilla, J. "Estudio y operación del sistema de drenaje en suelos orgánicos de la Ciénaga de Zacapu", *Revista Ingeniería Hidráulica*, SARH, 20, 33-48, 1966.
- Alvarado Díaz, J., Zubieta Rojas, T., Ortega Murillo, R., Chacón Torres, A. y Espinoza Gómez, R. "Hipertroficación en un lago tropical somero (Lago de Cuitzeo, Michoacán, México)". *Boletín del Departamento de Biología, UMSNH*, 1, 1-22, 1985.
- Anon. *Síntesis Geográfica de Guanajuato*. Secretaría de Programación y Presupuesto, México, 198 pp., 1980.
- Anon. *Síntesis Geográfica del Estado de Michoacán*. Secretaría de Programación y Presupuesto, México, 316 pp., 1985.
- Barbour, C. D. "A biogeographical history of *Christoma* (Pisces: *Atherinidae*) a species flock from the Mexican plateau", *Copeia* 3, 533-556, 1973.
- Bradbury, J. P. "Late Quaternary lacustrine paleoenvironments in the Cuenca de México", *Quaternary Science Reviews* 8, 75-100, 1989.
- Brown, R. B. "A Summary of late-Quaternary Pollen Records from Mexico west of the Isthmus of Tehuantepec", en V. M. Bryant y R. G. Holloway (eds.). *Pollen Records of Late Quaternary North American Sediments*, pp. 71-93. American Association of Stratigraphic Palynologist, Dallas, 1985.
- Chacón Torres, A. *A Limnological study of Lake Pátzcuaro*, Michoacán, México. PhD Thesis, University of Stirling, 1989.

- Chacón Torres, A., Ross, L. G. y Beveridge, M. C. "Lake Pátzcuaro, Mexico: Results of a new morphometric study and its implications for productivity assessments", *Hydrobiología* 184, 125-132, 1984.
- Cholnoky, B. J. *Die Ökologie der Diatomeen in Binnengewässern*, Cramer, Leire, 699 pp., 1968.
- Correa Pérez, G. *Geografía del Estado de Michoacán*, Tomo I, Geografía Física, Gobierno del Estado, Morelia, 454 pp., 1974.
- De Buen, F. "Los lagos Michoacanos II. Pátzcuaro", *Revista de la Sociedad Mexicana de Historia Natural*, 5, 99-125, 1944.
- Deevey, E. S. "Pollen analysis and Mexican archaeology: An attempt to apply the method", *American Antiquity*, 10, 135-149, 1944.
- Demant, A. *L'Axe Neo-volcanique TransMexicaine, Etude Volcanologique et Pétrographique et Signification Géodynamique*, Thèse d'Etat, Université de Droit et d'Economie et des Sciences d'Aix Marseille, Faculté des Sciences et techniques de St. Jérôme, 1981.
- Engstrom, D. R. y Wright Jr., H. E. "Chemical Stratigraphy of Lake Sediments as a record of Environmental Change", en E. Y. Haworth y J. W. G. Lund (ed.), *Lake Sediments and Environmental History: Studies in Palaeoecology in Honour of Winifred Tutin*, pp. 11-67, Leicester University Press, Leicester, 1984.
- Fowler, A. J. *Radiocarbon Dating of Lake Sediments and Peats by Accelerator Mass Spectrometry*, Doctoral Thesis, University of Oxford, 1985.
- Freddolino, M. K. *An Investigation into the Pre-Tarascan Cultures of Zacapu, Michoacán*, Doctoral Thesis, Yale University, 1973.
- Gasse, F. East "African Diatoms, Taxonomy, Ecological distribution", *Bibliotheca Diatomologica*, 11, Cramer, 1986.
- Gómez de Orozco, F. *Crónicas de Michoacán*, UNAM, México, 214 pp., 1972.
- Gorenstein, S. y Pollard, H. *The Tarascan Civilisation: The Late PreHispanic Cultural System*, Vanderbilt University Publications in Anthropology 28, Nashville, 199 pp., 1983.
- Guzmán Cintora, J. J. *Yuririapúndaro*, publicada por cuenta propia, México, 192 pp., sin fecha.
- Hecky, R. E. y Kilham, "P. Diatoms in alkaline, saline lakes, ecology and geochemical implications", *Limnology and Oceanography*, 18, 53-71, 1973.
- Hustedt, F. "Die Kieselalgen Deutschlands, Osterreichs und der Scheweiz", en L. Rabenhorst (ed.), *Kryptogamen-Flora von Deutschland, Osterreich und der Schwiez*, 7, Parte 3. 816 pp., 1961-1966.
- Hutchinson, G., Patrick, R. y Deevey, E. "Sediments of Lake Pátzcuaro, Michoacán, México", *Geological Society of America Bulletin*, 67, 1491-1504, 1956.
- Kelts, K. y Hsü, K. J. "Freshwater Carbonate Sedimentation", en A. Lerman (ed.), *Lakes, Chemistry, Geology, Physics*, pp. 295-323, Springer Verlag, Nueva York, 1978.
- Kilham, P., Kilham, S. S. y Hecky, R. E. "Hypothesized resource relationships among African planktonic diatoms", *Limnology and Oceanography*, 31, 1169-1181, 1986.
- Lange-Bertholot, H. "Pollution tolerance of diatoms as a criterion for water quality estimation", *Nova Hedwigia Beiheft*, 64, 285-304, 1979.
- Metcalfe, S. E. "Diatoms in a core from Laguna Zacapu, Michoacán, Mexico", en F. Round (ed.), *Proceedings of the 9th International Diatom Symposium*, Bristol 1986, pp. 251-264, 1988.
- Metcalfe, S. E. "Navicula elkab O. Muller- a species in need of redefinition?", *Diatom Research*, 5, 419-423, 1990.
- Metcalfe, S. E., Street-Perrott, F. A., Brown, R. B., Hales, P. E., Perrott, R. A. y Steininger, F. M. "Late Holocene human impact on lake basins in Central Mexico", *Geoarchaeology*, 4, 119-141, 1989.
- Metcalfe, S. E. y Hales, P. E. "Holocene diatoms from a Mexican crater lake-la Piscina de Yuriria", en P. Kocielek (ed.), *Proceedings of the 11th International Diatom Symposium*, San Francisco 1990, en prensa.
- Noriega, E. y Noriega, A. *La Deseccación de la Ciénaga de Zacapu y las Leyes Agrarias, caso especial en el país*, 1923.
- Piña Chán, R. *Acerca de Viejo Cuitzeo*, INAH, México, 72 pp., sin fecha.
- Pollard, H. P. *Prehispanic Urbanism at Tzintzuntzan*, Michoacán, PhD Dissertation, Columbia University, 1972.
- Porter, M. N. "Excavations at Chupícuaro, Guanajuato, Mexico", *Transactions of the American Philosophical Society* 46, 517-637, 1956.
- Saporito, M. S. *Chemical and Mineral Studies of a core from Lake Pátzcuaro, Mexico*, MSc Thesis University of Minnesota, 1975.