INFRAESTRUCTURA CIENTÍFICA Y DESARROLLO TECNOLÓGICO

Manual para el muestreo de sedimentos lacustres para estudios paleoambientales

Margarita Caballero Miranda

Universidad Nacional Autónoma de México

2026

geofísica UNAM

INFRAESTRUCTURA CIENTÍFICA Y DESARROLLO TECNOLÓGICO

Manual para el muestreo de sedimentos lacustres para estudios paleoambientales

Margarita Caballero Miranda

Universidad Nacional Autónoma de México

2026

geofisica UNAM

Universida Nacional Autónoma de México
Serie infraestructura científica y desarrollo tecnológico

Instituto de Geofísica
Unidad Editorial

Manual para el muestreo de sedimentos lacustres para estudios paleoambientales

Margarita Caballero Miranda

Editora académica: Galia González Hernández
Editora técnica: Andrea Rostan Robledo
Diseño: Samantha Fernanda Pita Uraga

Primera edición: enero, 2026
DR. ©Universidad Nacional Autónoma de México.

Unidad Editorial
Instituto de Geofísica

Universidad Nacional Autónoma de México
Av. Universidad No. 3000, Col. Copilco, Alcaldía Coyoacán,
C.P. 04510, CDMX
Instituto de Geofísica
Circuito de la, Investigación Científica s/n, C.U., Coyoacán,
C.P. 04150, CDMX

ISBN: 978-607-642-277-9

Esta edición y sus características son propiedad de la Universidad Nacional Autónoma de México.
Prohibida la reproducción total o parcial por cualquier medio sin la autorización escrita del titular de los derechos patrimoniales.

Impreso y hecho en México.

Contenido

1.Introducción **6**
2.Naturaleza de los sedimentos lacustres **6**
3.Muestreo de sedimentos superficiales **6**
Cuadro de texto 1: Etiquetado 7
3.1. Muestreo directo 7
3.2. Muestreo con draga 7
3.3. Muestreo con nucleadores 8
3.4. Muestreo con trampas de sedimento 8
4. Nucleos sedimentarios **9**
4.1. Nucleadores de suelos 10
4.2. Núcleos cortos (< 1 m) 11
4.3. Núcleos largos (> 1 m) 12
5. Descripción y muestreo de los sedimentos **14**
Cuadro de texto 2: bandeamientos, laminaciones y "varvas" 17
6. Afloramientos o trincheras **21**
7. Casos de estudio **22**
7.1. Ejemplo de secuencias sedimentarias largas 22
7.2 Ejemplo de secuencias sedimentarias cortas 24
8. Agradecimientos **27**
9. Referencias bibliográficas **27**

1.Introducción

En el fondo de todos los lagos diariamente se acumulan partículas que derivan tanto de la columna de agua como del entorno o cuenca hidrográfica. Al paso del tiempo estas partículas forman capas que se acumulan continuamente y llegan a formar secuencias estratigráficas complejas, de decenas o cientos de metros de espesor. Una secuencia sedimentaria lacustre que no ha sido alterada por procesos tectónicos representa un registro geológico continuo que conserva un orden cronológico bien definido: las capas más antiguas se encuentran en la parte más profunda mientras que las más jóvenes están cerca de la superficie, conforme a la ley de superposición sedimentológica. De esta forma, mediante el estudio de las características de las capas que forman a estos sedimentos, es posible obtener información relativa a las condiciones específicas que existieron en el lago y en su entorno durante los diferentes intervalos de tiempo en los que se acumularon (Cohen, 2003; Smol, 2009). Los sedimentos lacustres son, por lo tanto, excelentes archivos geológicos y su estudio constituye la base de diversas disciplinas científicas que tienen como objetivo reconstruir la evolución de los lagos (paleolimnología) y los cambios de las características ecológicas, climáticas y ambientales, tanto del lago como de su entorno en el tiempo (paleoecología, paleoclimatología, etc.). Los sedimentos lacustres son el objeto de estudio del Laboratorio de Paleolimnolgía del Instituto de Geofísica de la UNAM.

Para las investigaciones que se realizan dentro del Laboratorio de Paleolimnología, y en general para las ciencias de la reconstrucción paleoambiental, es fundamental contar con muestras de sedimentos lacustres para su estudio, sin embargo, estas secuencias sedimentarias son de difícil acceso. En muchas ocasiones porque se encuentran bajo tirantes de agua de muchos metros, pero incluso en lagos someros o en lagos antiguos que se encuentran secos (paleolagos) obtener una secuencia sedimentaria lacustre implica perforar trincheras o pozos de varios metros de profundidad, dependiendo de la edad de la cuenca lacustre, su tasa de sedimentación y el alcance temporal del estudio planteado.

En este manual se ofrece una serie de alternativas para el muestreo de sedimentos lacustres con el objetivo de realizar estudios paleoambientales y está dirigido a investigadores jóvenes, estudiantes de posgrado y de licenciatura en disciplinas afines a las Ciencias de la Tierra (limnología, biología, geología, paleontología, ecología, etc.), que deseen incursionar en el estudio de los sedimentos lacustres y en la Paleolimnologia.

2.Naturaleza de los sedimentos lacustres

Los sedimentos lacustres son una mezcla de partículas derivadas de diferentes fuentes y procesos, que en general, dependiendo de su origen, pueden dividirse en dos grandes categorías: autóctonos vs. alóctonos. Las partículas autóctonas derivan de procesos biológicos y químicos que ocurren dentro del lago; estas incluyen partículas orgánicas derivadas de la actividad biológica en todos los niveles de las cadenas tróficas dentro del lago. Las partículas autóctonas también pueden ser inorgánicas, se derivan fundamentalmente de procesos químicos o bioquímicos que favorecen la precipitación de minerales en la columna de agua o en la transición agua-sedimento. El mineral que más comúnmente precipita en la columna de agua es la calcita, pero en condiciones especiales también se pueden depositar minerales como el yeso o la pirita, entre otros (O'Sullivan & Reynolds, 2008).

Las partículas alóctonas se derivan principalmente de la erosión de las rocas y los suelos de la cuenca de captación, a este tipo de partículas también se les denomina terrígenas o clásticas. La naturaleza de estas partículas está estrechamente relacionada con la geología de la cuenca de captación del lago, ya que tendrán diferentes características aquellas derivadas de rocas volcánicas frente a, por ejemplo, rocas calizas o metamórficas. El transporte de las partículas terrígenas hacia el lago depende en gran medida de la erosión asociada con la escorrentía superficial. A mayor escorrentía corresponde una mayor erosión y flujo de partículas de la cuenca al lago. Entre las partículas alóctonas también se pueden incluir fragmentos de diversos tamaños de materia orgánica terrestre como hojarasca, troncos, raíces etc., así como partículas transportadas por el aire como pueden ser granos de polen, polvos, o materiales de origen volcánico. Las partículas, al entrar al lago, se clasifican u ordenan por tamaños y peso. Las partículas más grandes y pesadas no pueden ser transportadas grandes distancias por las corrientes, pero las más pequeñas y ligeras son fácilmente transportadas al permanecer en suspensión. De esta manera, las partículas mayores o más pesadas (gravas, arenas gruesas) se depositan en los abanicos aluviales, en la desembocadura de los ríos y, en general, hacia las orillas o periferia del cuerpo lacustre. Mientras que las más finas o ligeras (arenas finas, limos y arcillas) predominan hacia la zonas centrales y profundas del lago.

3.Muestreo de sedimentos superficiales

Para muchos estudios ambientales o paleoambientales es importante colectar y analizar los sedimentos más superficiales y recientes para usarlos como un elemento de diagnóstico y como un referente moderno del ecosistema bajo estudio. Los sedimentos modernos permiten tener un parámetro de calibración al comparar sus resultados con los de sedimentos más profundos y antiguos. Por otro lado, el análisis comparativo de sedimentos superficiales provenientes de diversos lagos es una estrategia útil para desarrollar calibraciones que posteriormente sirvan para obtener reconstrucciones paleolimnológicas o paleoambientales cuantitativas o semi-cuantitativas (Battarbee, 2000). A continuación, se describen diferentes metodologías adecuadas para recolectar muestras de sedimentos superficiales.

Cuadro de texto 1: Etiquetado

El etiquetado de muestras de sedimentos lacustres puede ser complicado por la presencia de humedad durante el muestreo y almacenamiento. Cuando las etiquetas se marcan directamente sobre el vidrio o el plástico de frascos o bolsas terminan por borrarse con el tiempo. También es muy frecuente que la humedad favorezca que la etiqueta se borre o se desprenda cuando ésta se coloca utilizando cinta de empaque, de enmascarar (*maskingtape*) o etiquetas auto-adheribles. Así mismo, las tintas de plumones indelebles de otro color que no sean negras terminan por desvanecerse con el tiempo. Una opción sencilla y económica es usar plumones de tinta negra permanente sobre un fragmento de cinta vinílica de color (no negro). Este tipo de etiqueta no se desprende ni se borra con el tiempo, ni con la humedad, ni con el roce entre muestras durante el transporte o almacenamiento. De ser posible se recomienda usar un sistema de doble etiquetado, es decir, que cada muestra tenga dos etiquetas. Por ejemplo, se puede etiquetar el cuerpo del frasco y también la tapa. En el trabajo de campo, es conveniente tener preetiquetados los frascos o bolsas, ya que en condiciones de humedad es frecuente que los plumones no escriban o que la cinta no se adhiera correctamente. En caso de no poder tener todo preetiquetado, es recomendable tener a la mano durante el muestreo un trapo para poder secar la superficie de la muestra antes de escribir la etiqueta o de adherir la cinta de aislar. También es importante que la clave que se le asigne a la etiqueta se ajuste a un código preestablecido que permita reconocer el sitio de estudio, la fecha de muestreo y la profundidad a la que se colectó la muestra.

3.1. Muestreo directo. Cuando el tirante de agua es muy somero (< 50 cm), hay poca corriente y la transparencia del agua lo permite, el sedimento superficial se puede colectar directamente en frascos de boca ancha de vidrio o de plástico con capacidad de 250 a 300 ml, con espátulas o cucharas, transfiriendo cuidadosamente solo los primeros centímetros, aunque esta profundidad depende del objetivo del estudio. Por ejemplo, para el análisis de quironómidos u otros invertebrados que viven enterrados en el sedimento, es recomendable colectar sedimento hasta capas un poco más profundas. Una opción que puede ser para estos fines ya que permite recuperar hasta 10 cm de sedimento desde la superficie, es usar jeringas gruesas de 60 ml, a las que se les ha cortado la punta. La jeringa se encaja directamente sobre el sedimento y el émbolo permite generar suficiente vacío para recuperar el sedimento, el cual, puede ser trasvasando a un frasco adecuado posteriormente. Es recomendable que la tapa de los frascos utilizados cuente con un empaque o contratapa que asegure que sean herméticos y la muestra no se derrame (Fig. 1). Para este tipo de muestras no es recomendable usar bolsas de plástico porque normalmente contienen mucha agua y están poco consolidadas, por lo que es factible que haya fugas, aun si las bolsas cuentan con un cierre plástico (ziploc). Pero ya sea en frascos o en bolsas es muy importante que las muestras se encuentren correctamente etiquetadas (ver CUADRO DE TEXTO 1). Las muestras se deben guardar en refrigeración, aunque dependiendo del objetivo de estudio se pueden congelar o fijar. Para fijar una muestra de sedimento lo más común es usar alcohol etílico (no desnaturalizado) concentrado (96%) en cantidad suficiente para que la solución final sea de ~30%. También se puede usar formol concentrado (40%) en cantidad suficiente para que la solución final sea de ~5 a 10%.

Fig. 1. Frasco para el muestreo de sedimentos en campo. Se muestra un frasco de plástico, con boca ancha, de 250 ml de capacidad, con tapa y empaque que garantiza que sea hermético.

3.2. Muestreo con draga. Cuando el tirante de agua es mayor a unos 50 cm y hasta un máximo práctico de ~60 a 80 m, los sedimentos superficiales se pueden colectar mediante el uso de una draga. Hay diversos tipos de dragas, pero en general, todas tienen un funcionamiento similar. La más común es la draga tipo Ekman (Fig. 2), la cual consiste en una caja metálica con dos palas inferiores y un mecanismo de resortes que permiten que las palas se mantengan abiertas mientras la draga desciende sobre el sedimento sujetada por una cuerda (Fig. 2a). Los resortes tienen un mecanismo que permite que a través de un "mensajero" o disparador, las palas se cierren, capturando el

sedimento. Las dragas también cuentan con tapas móviles que cubren la parte superior, de manera que, al descender dejen circular el agua, evitando que la onda de choque altere los sedimentos al llegar a estos. Al mismo tiempo, al subir la draga, estas tapas permanecen cerradas protegiendo el sedimento mientas la draga se recupera jalando la cuerda. La forma de recuperar la draga debe ser lenta pero continua, para evitar que las tapas superiores se abran y se pierda el sedimento. Una vez recuperada la draga, conviene colocarla dentro de una charola o bandeja (Fig. 2b). Las tapas se levantan y por la parte superior se utilizan cucharas o espátulas para recuperar el sedimento más superficial en frascos. Una vez recuperado el sedimento, las muestras deben ser refrigeradas o en casos especiales, congeladas o fijadas, como se mencionó anteriormente.

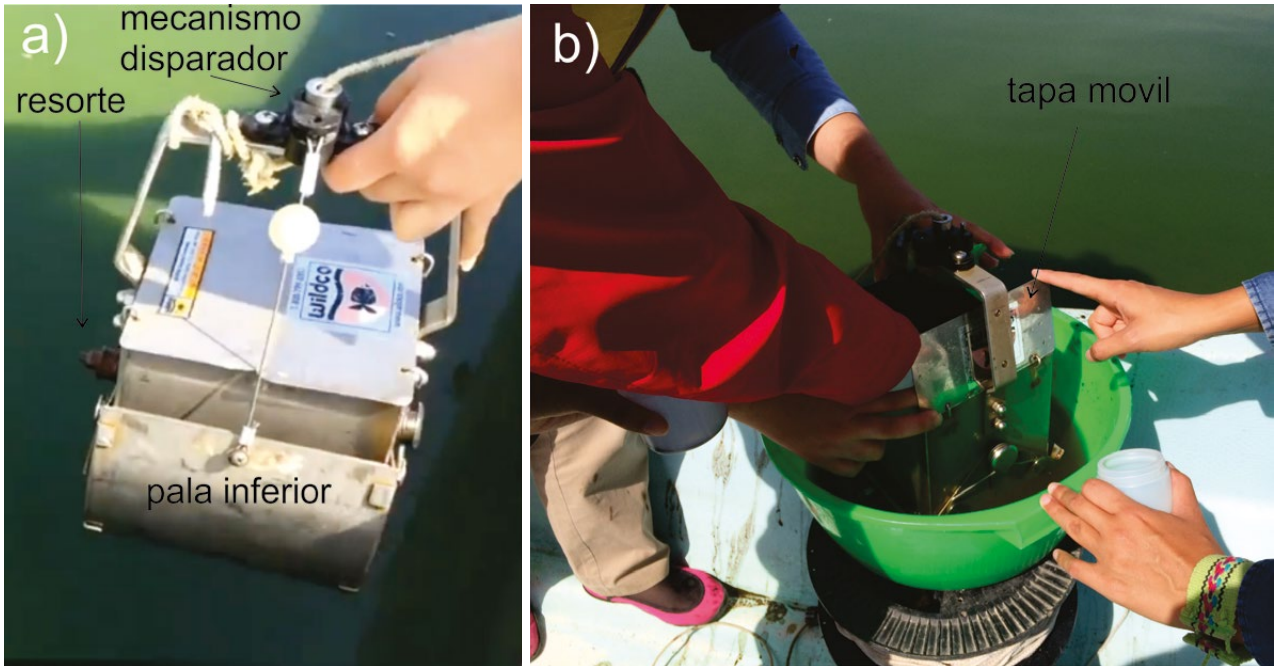


Fig. 2 Muestreo de sedimentos superficiales con el uso de una draga Ekman en el lago Zumpango, Estado de México. a) La draga preparada para el muestreo b) Draga lista para recolectar el sedimento. La operación de este tipo de dragas se demuestra en el video 1: https://www.facebook.com/LabPaleolimno/videos/682716675418612.

3.3. Muestreo con nucleadores. Para recuperar el sedimento superficial inalterado, incluyendo la transición agua-sedimento, se recomienda el uso de nucleadores. Cuando el tirante de agua es bajo (<50 cm), los nucleadores pueden ser muy sencillos, simplemente tubos de plásticos cortos (~ 50 cm) que se introducen en el sedimento empujando manualmente. Si el tirante de agua es más profundo, deben usarse equipos conocidos como nucleadores de gravedad, los que encajan el tubo por efecto de un peso que se deja caer (más detalle de este tipo de nucleadores en la sección 4.2). En ambos casos, el tubo recupera los primeros centímetros del sedimento con el agua suprayacente, garantizando que se colecte la transición agua-sedimento. Una vez recuperados los tubos se deben dejar sedimentar hasta que no se observe sedimento suspendido (es recomendable no exceder de 24 h) y se retira el agua sobrenadante con una manguera limpia, con extremo cuidado de no perturbar el sedimento. Posteriormente se procede a recuperar el sedimento con la ayuda de un émbolo, que consiste en un disco que puede ser metálico o plástico del tamaño justo al diámetro del tubo, acoplado a una varilla que permite empujarlo junto con el sedimento desde la parte inferior hacia arriba. Al empujar el émbolo se desplazará el sedimento hasta que llegue a la parte superior del tubo. En ese momento, se pueden seccionar los primeros 1 o 2 cm (o la profundidad adecuada dependiendo de los objetivos de estudio) y colocarlos en frascos; como en los casos anteriores las muestras deben ser refrigeradas, congeladas o fijadas.

3.4. Muestreo con trampas de sedimento. Esta es otra forma de estudiar los sedimentos lacustres modernos que permite obtener una visión más dinámica de los procesos sedimentarios. Las trampas de sedimento pueden tener diversos diseños, el más sencillo y económico consiste en tubos cerrados por la parte de abajo, colocados dentro de la columna de agua de forma vertical sobre el mismo punto en el lago mediante el uso de anclas y boyas (Fig. 3). Dentro de los tubos se insertan los recipientes recolectores, pueden ser tubos de un diámetro levemente menor y sellados en su parte inferior por una tapa hermética para permitir la acumulación del sedimento, o botellas cilíndricas de una altura adecuada.

Estos recipientes (ya sean tubos sellados o botellas cilíndricas) colectan el material particulado que gradualmente se sedimenta de la columna de agua hacia el fondo del lago. En este tipo de muestreo, la relación entre el diámetro y el largo del recipiente recolector es importante, ya que deben ser los suficientemente largos para impedir que la turbulencia en la columna de agua resuspenda el sedimento colectado y se pierda. La relación recomendada es una altura de por lo menos 3 y hasta 6 veces su diámetro (White, 1990). Debido a esto, este tipo de trampas de sedimento no son prácticas en el estudio de lagos someros (< 2 m), es conveniente que el lago en estudio tenga por lo menos de3 a 5 m de profundidad. Las trampas pueden consistir en uno o dos tubos paralelos, pero se pueden tener tres o más tubos de acuerdo con el diseño experimental. El ancla o peso muerto que mantiene las trampas en su lugar debe ser lo suficientemente grande y pesado para asegurar que las trampas no se desplacen de su posición. Dependiendo de los objetivos del estudio, los tubos se pueden colocar a diferentes profundidades en la columna de agua y se pueden recuperar con distintas periodicidades como podría ser mensual, estacional o anualmente. Este tipo de muestreo permite estudiar los procesos sedimentarios dentro del lago con mayor detalle, con el objetivo de identificar temporadas del año en las que se producen diferentes tipos de sedimentos, por ejemplo, si hay momentos a lo largo del ciclo anual en los que exista precipitación de carbonatos o en los que se registren florecimientos de ciertos tipos de algas. Además, este tipo de muestreo permite el cálculo de flujos sedimentarios de la columna de agua al fondo del lago, incluyendo los flujos de componentes específicos del sedimento, como podrían ser la materia orgánica, valvas de diatomeas, carbonatos, etc.

Un punto crítico es que si la boya que sostiene las trampas se deja de forma visible sobre la superficie del agua de un lago, es posible que la trampa sea robada por pescadores, lancheros, turistas, etc. Si en el lago de estudio existe esta posibilidad, se recomienda colocar la boya sumergida de 2 a 3 m y posteriormente recuperarla con una técnica que usan los pescadores y que nosotros denominamos de "rodeo". Para esto es importante tener ubicada la posición de la boya con un dispositivo GPS, con el objetivo de poder regresar al mismo punto posteriormente. Esta técnica requiere del uso de una lancha (de preferencia con motor), una segunda boya, una cuerda larga (~ 2 veces la profundidad del punto en el que se colocaron las trampas) y diversas pesas pequeñas (1 a 2 kg) colocadas a lo largo de la cuerda, la primera a una distancia igual a la profundidad del punto en el que se ubican las trampas (Fig. 3). La lancha se debe colocar sobre el punto en el que está sumergida la boya y rápidamente se deja caer la primera pesa hasta el fondo del lago. Esta pesa debe tener dos cuerdas, una atada a la segunda boya y la otra cuerda larga de la cual se conserva el extremo en la lancha. El resto de la cuerda larga se irá arrojando con las pesas a medida que la lancha se aleja de la segunda boya. Cuando se termina la cuerda, la lancha debe realizar por lo menos un par de circunvoluciones alrededor de la boya, manteniendo la distancia constante. Al final, la lancha se acerca a la segunda boya y se jala de la cuerda, que gradualmente va a atrapar la boya que se encuentra sumergida, lo que permite extraer las trampas. Una vez recuperada la trampa, se debe dejar sedimentar su contenido hasta que no se observe ningún material en suspensión (pueden ser varias horas) y, posteriormente retirar con sumo cuidado el exceso de agua que cubre al sedimento con una manguera limpia. Hay que tener mucho cuidado al realizar esta operación para retirar solo agua y no sedimento. Una vez que se ha reducido el volumen de agua dentro de la trampa, el sedimento se trasvasa a una probeta graduada de tamaño adecuado. Nuevamente se deja sedimentar de 12 a 24 h y, de esta manera, se puede medir el volumen de sedimento acumulado. Dependiendo del objetivo del trabajo, una vez medido el volumen del sedimento en húmedo también se puede determinar la masa recuperada en húmedo y en seco; para ello es necesario secar todo el sedimento recuperado o una fracción representativa y posteriormente pesarlo.

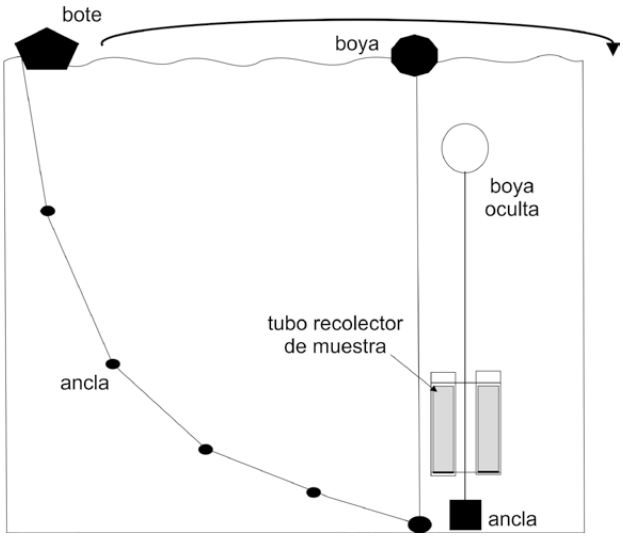


Fig. 3. Esquema de los elementos que conforman una trampa de sedimento y de la maniobra "rodeo" recomendada para recuperar una trampa con boya oculta.

4. Nucleos sedimentarios

La perforación de núcleos o testigos es la forma más usada para obtener secuencias sedimentarias lacustres para estudios paleolimnológicos y paleoambientales. Un núcleo sedimentario es una columna de sedimento obtenida a partir de enterrar tubos de metal o plástico en un punto dentro del lago. Este tipo de muestreo permite obtener una visión

limitada a un punto de la secuencia estratigráfica del lago; por lo que una buena estrategia es perforar varios núcleos en diferentes ubicaciones dentro de la cuenca lacustre, que permitan documentar las variaciones laterales en la estratigrafía. A pesar de esto, los estudios paleoambientales con frecuencia se realizan a partir del análisis de solamente una secuencia sedimentaria debido al tiempo y al dinero que se requiere para obtenerlas y analizarlas. Por esta razón, es recomendable realizar estudios geofísicos previos de sísmica o sonar para tener una idea de la estructura lateral de los sedimentos y poder seleccionar el o los puntos que presenten la columna estratigráfica más completa o representativa del lago (Cohen, 2003). Si no se cuenta con este tipo de estudios o se trata de un lago pequeño, la ubicación del sitio de perforación debe ser un lugar relativamente céntrico del lago, alejado de las entradas de sedimento como podría ser la boca de un río o de algún punto de contaminación como un poblado, etc.

Otro aspecto importante de los estudios realizados utilizando núcleos sedimentarios es que el diámetro del tubo que se utilice en la perforación, pone una limitación física con respecto a la cantidad de sedimento de que se dispone para cada capa que se desee estudiar, y restringe el número o el tipo de estudios que se podrán realizar. Un diámetro más grande permite obtener una mayor cantidad de sedimento, pero hay que recordar que también impone mayores requisitos técnicos para su manipulación en campo, dado que presentará mayor resistencia a ser enterrado y posteriormente extraído. El diámetro del tubo utilizado en la perforación siempre debe ser considerado en el diseño experimental de proyecto.

Existen diversas técnicas de perforación de sedimentos que se utilizan dependiendo de las condiciones del muestreo, el tipo de lago en estudio, el alcance temporal del estudio que se pretende realizar, o el presupuesto con el que se cuente. Aquí se detallan las más comunes y en las que se tiene experiencia a través de los estudios realizados dentro del Laboratorio de Paleolimnología de la UNAM.

4.1. Nucleadores de suelos. Cuando se desea explorar la naturaleza del sedimento en un ambiente con un tirante bajo de agua o en condiciones secas, se pueden utilizar nucleadores diseñados para el muestreo de turberas o suelos (Fig. 4). Muchos de estos equipos tienen la ventaja de que son relativamente ligeros y, por lo tanto, fáciles llevar a localidades remotas o de difícil acceso. Sin embargo, la calidad de la secuencia recuperada es relativamente baja, ya que la secuencia que se obtiene está formada por fragmentos relativamente cortos entre los que pueden existir pérdidas. Además, su alcance en profundidad por lo general es limitado, a los primeros 2 a 4 m (excepcionalmente más), aunque dependerá de la dureza y de la textura del sedimento y de la profundidad a la que se encuentre el agua subterránea (nivel freático) en el sitio. Los sedimentos muy consolidados o los de grano más grueso (arenas) normalmente son más difíciles de recuperar y la presencia de agua subterránea puede favorecer la pérdida del sedimento al extraerlo.

Entre los diseños de este tipo de muestreadores, los más comunes son las espirales metálicas con tubos o extensiones de 0.5 a 1 m de longitud (Figs. 4a y 4b). Las espirales se giran mediante el uso de un maneral, lo que hace que se entierren, y al jalarlas permiten recuperar secciones de aproximadamente 20 a 30 cm de sedimento, dependiendo del diseño de la espiral. Mediante operaciones repetidas a profundidades con incrementos controlados, se pueden recuperar varias secciones cortas que permitan conocer la estratigrafía general del sitio hasta la profundidad máxima a la que se pueda penetrar.

Fig. 4 Colecta de sedimento mediante el uso de nucleadores ligeros en Xochimilco, CDMX. a) Nucleador de espiral antes del muestreo. b) Nucleador de espiral con el sedimento muestreado. c) Nucleador de cámara, sin tapa, con el sedimento muestreado.

Otro tipo bastante común de nucleador de suelos son los llamados rusos o de cámara. Estos consisten en medios tubos metálicos, generalmente de 0.5 a 1 m de longitud, que tienen

una tapa giratoria. Estos tubos se entierran y posteriormente se giran para cortar y colectar el sedimento, el cual queda protegido por la tapa giratoria, por lo que pueden funcionar relativamente bien aun cuando se haya alcanzado el nivel freático. Al extraerse el nucleador, se vuelve a girar la tapa y un medio cilindro de sedimento es expuesto. Una variante más sencilla de este concepto es un medio tubo sin tapa (Fig. 4c), pero este tipo solo funciona de manera aceptable si se trabaja por arriba del nivel freático. Existen versiones más resistentes y pesadas de este tipo de muestreadores que pueden utilizarse con un motor de percusión para lograr penetrar a mayores profundidades. En este caso, la recuperación del tubo enterrado en el sedimento se realiza mediante el uso de un sistema de palancas. Los nucleadores de cámara permiten recuperar secciones continuas un poco más largas que los nucleadores de espiral, pero tienen el inconveniente de que la operación y la penetración dependen mucho de la fuerza física del operador.

4.2. Núcleos cortos (< 1 m). Cuando se desea realizar un estudio paleolimnológico o paleoambiental de los últimos 100 a 200 años, con frecuencia es suficiente analizar los primeros 50 a 100 cm de la secuencia sedimentaria del lago. Para recuperar este tipo se secuencias relativamente cortas (< 1 m) en lagos modernos con un tirante de agua mayor a 1 o 2 m, se recomienda usar nucleadores de gravedad como los que fueron mencionados en el inciso 3.3. Este tipo de nucleadores consisten en un sistema de pesas que permiten que el tubo de muestreo se encaje en el sedimento (Fig. 5). Para que este funcione es necesario tener un sistema de vacío que permita mantener el sedimento dentro del tubo al extraer el nucleador. Por ejemplo, pueden contar con una tapa o empaque de goma que mantiene el vacío dentro del tubo mientras exista presión del agua. Al llegar a la superficie de la columna de agua hay que colocar rápidamente un tapón en la parte inferior del tubo para evitar que, por efecto de la gravedad, se pierda el sedimento. El tapón inferior debe sellarse usando cinta canela, porque es la única que se adhiere a un tubo mojado. Hay otros equipos que en lugar o además del empaque superior tienen un sistema de émbolo que tapa el tubo por la parte inferior al recuperarlo, evitando la pérdida del sedimento. Algunos nucleadores de este tipo tienen la posibilidad de usar un efecto de martillo, al tener la posibilidad de subir y bajar repetidamente una de sus pesas, favoreciendo que el tubo se entierre a mayor profundidad.

Con este tipo de equipo es importante conocer la profundidad de la columna de agua en la que se trabaja, la cual se puede medir mediante el uso de un sonar de mano (ecosonda) o en su defecto mediante el uso de una cuerda graduada con una pesa. Para la operación de este tipo de nucleador no es conveniente dejarlo caer de forma libre por una distancia mayor a 3 m, ya que es factible que no caiga verticalmente, o que se entierre totalmente en el sedimento, perdiendo los primeros centímetros de la secuencia, incluida la transición agua-sedimento. Por ello, es necesario tener preparada una cuerda de longitud adecuada a la profundidad de operación, con alguna marca que permita identificar cuando la punta del tubo de muestreo se encuentre a aproximadamente 3 m de altura con respecto a la superficie del sedimento y solo entonces dejarlo caer. Para lograr mayor control en este procedimiento, existen nucleadores de gravedad conocidos como mini-Küllemberg, que tienen un peso atado a una cuerda que excede el largo del tubo por los 3 m de caída que se pretenden; de manera que cuando el peso toca el sedimento se libera un gatillo que deja caer el tubo con sus pesos para enterrarse en el sedimento.

Una vez recuperados este tipo de núcleos, es muy importante que se agiten lo menos posible para evitar que se mezclen los sedimentos superficiales poco consolidados. Este tipo de núcleos se pueden muestrear en campo o transportar con mucho cuidado al laboratorio. Si se van a transportar, recomendamos conservar el tirante de agua sobre el sedimento y sellar el tubo con un tapón y cinta de empaque canela. También se recomienda el uso de tapones de espuma floral para estabilizar los sedimentos superficiales, pero se debe tener cuidado que no toque el sedimento, ya que éste se adsorbe a la espuma floral y con ello se pierde la transición agua-sedimento. Otra opción es el uso de agentes estabilizantes como el poliacrilato de sodio (zorbitrol) que se transforma en un gel que estabiliza el sedimento superficial, aunque también puede penetrar en el sedimento.

Fig. 5. Muestreo de una secuencia sedimentaria corta del lago Montebello, Chiapas, mediante el uso de un nucleador de gravedad. La operación de este equipo se describe con detalle en el video: https://www.facebook.com/LabPaleolimno/videos/493357778268999.

4.3. Núcleos largos (> 1 m). Para estudios paleolimnológicos o paleoambientales con un alcance temporal mayor a 100 o 200 años, es necesario obtener secuencias sedimentarias de mayor longitud, para lo cual se requiere utilizar otro tipo de equipos de perforación. Existen nucleadores de gravedad de una escala mayor conocidos como Küllemberg, que funcionan como se describió para los mini-Küllemberg, pero con pesos mayores (400 a 500 kg) y tubos metálicos de varios metros de longitud que cuentan con un tubo plástico interior. Este tipo de nucleadores tienen la ventaja de que pueden recuperar sedimentos en tirantes de agua bastante grandes (decenas o cientos de metros), pero la desventaja es que deben ser operados desde una embarcación o plataforma flotante que cuente con un tripié y poleas que permitan la recuperación de los tubos de muestreo de varios metros de longitud y las pesas con las que se opera. Las secuencias recuperadas con este tipo de equipo pueden llegar hasta 10 o 12 m de profundidad en el sedimento.

Otro tipo muy común de nucleadores son los de pistón, también conocidos como tipo Livingstone. Este tipo de nucleadores consisten en tubos metálicos (aluminio o acero inoxidable) que tienen un pistón de goma en su punta (Fig. 6).

La profundidad a la que se entierra el tubo está controlada por una serie de varillas que permiten empujarlo, mientras que la profundidad del pistón está controlada de forma independiente por un cable o por otro sistema de varillas. De esta forma el tubo con el émbolo en la punta se baja hasta llegar a la superficie del sedimento. En este momento se procede a empujar el tubo, manteniendo el pistón fijo, de manera que el tubo penetra toda su longitud dentro del sedimento. La longitud de los tubos puede variar, pero con frecuencia oscila entre 1 a 2 m. Se procede a recuperarlo cuando el tubo se encuentra lleno de sedimento y el pistón se ubica en su extremo superior. El sedimento se mantiene en el interior del tubo debido al vacío que genera la goma del pistón. Este procedimiento se puede repetir varias ocasiones en el mismo punto o pozo, incrementando la profundidad de la secuencia obtenida por tramos de longitud igual a la longitud de los tubos. Al recuperar cada tramo de la secuencia es necesario sellar los extremos del tubo, etiquetando inmediatamente y marcando cuál es el extremo superior (sedimento más reciente) y cuál es el extremo inferior (sedimento más antiguo). De esta forma, se puede obtener una secuencia compuesta de varios tramos que de forma consecutiva fueron penetrando en estratos cada vez más profundos. Es conveniente que los tramos provenientes de un mismo pozo se les etiqueten con claves que dejen claro el sitio de estudio, el número de pozo y el número de tramo. Para obtener este tipo de secuencias en un lago profundo es necesario contar con una plataforma flotante adecuada desde dónde operar el equipo (Figs. 7a y 7b).

Los equipos de pistón también se pueden usar en condiciones secas para muestrear paleolagos, pero se requiere del apoyo de andamios para poder operar los equipos (Fig. 7c) y de un sistema de palancas para poder recuperar los tubos con el sedimento (Fig. 7d). La operación de estos equipos pude ser manual, enterrando y retirando los tubos solo con la fuerza física del operador, o se puede usar un motor de percusión, que permite penetrar a profundidades mayores. Sin embargo, si se opera desde una plataforma flotante, hay que considerar siempre si su flotabilidad es suficiente para posteriormente poder recuperar el sedimento, tomando en cuenta la resistencia que opone el sedimento para extraer el nucleador. La longitud de las secuencias que se pueden recuperar con este tipo de equipos oscila alrededor de los 10 a 25 m de sedimento.

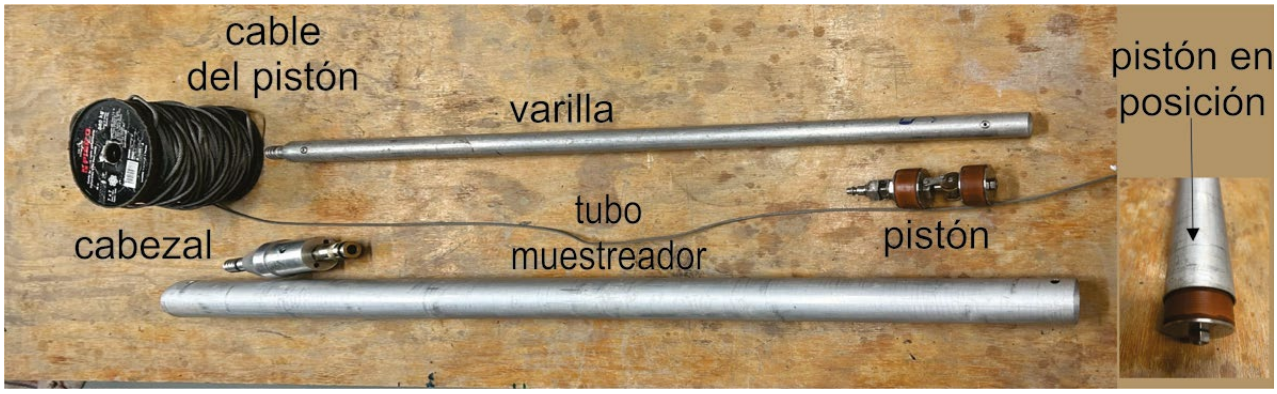


Fig. 6. Elementos de un perforador de pistón tipo Livingstone. La operación de un equipo de pistón se ilustra en el video: https://www.facebook.com/LabPaleolimno/videos/5883008774424 03

Fig. 7. Perforación de sedimentos lacustres. a) y b) Operación de un equipo de pistón desde una plataforma flotante c) Operación de un equipo de pistón desde un andamio, d) Sistema de palanca que permite recuperar los tubos con el sedimento, ya sea de equipos de pistón o de nucleadores de suelos.

Para recuperar secuencias sedimentarias más largas (> 20 m) o con sedimentos muy consolidados, se requiere del uso de equipos de perforación que se operan mediante maquinaria hidráulica especializada similar a la utilizada en minería o en exploración petrolera (Fig. 8a). Estos equipos recuperan el sedimento usando tubos de metal (tipo Shelby) con un tubo interior plástico en tramos de 1 a varios metros de longitud (Fig. 8b y c). Por lo pesados de estos equipos es más común que operen en tierra firme. Sin embargo, la comunidad científica internacional ha desarrollado equipos de perforación y plataformas flotantes diseñados especialmente con el fin de obtener núcleos largos en lagos profundos. El laboratorio de Perforación Científica Continental de la Universidad de Minnesota se especializa en la operación de este tipo de equipos (https://cse.umn.edu/csd/platforms).

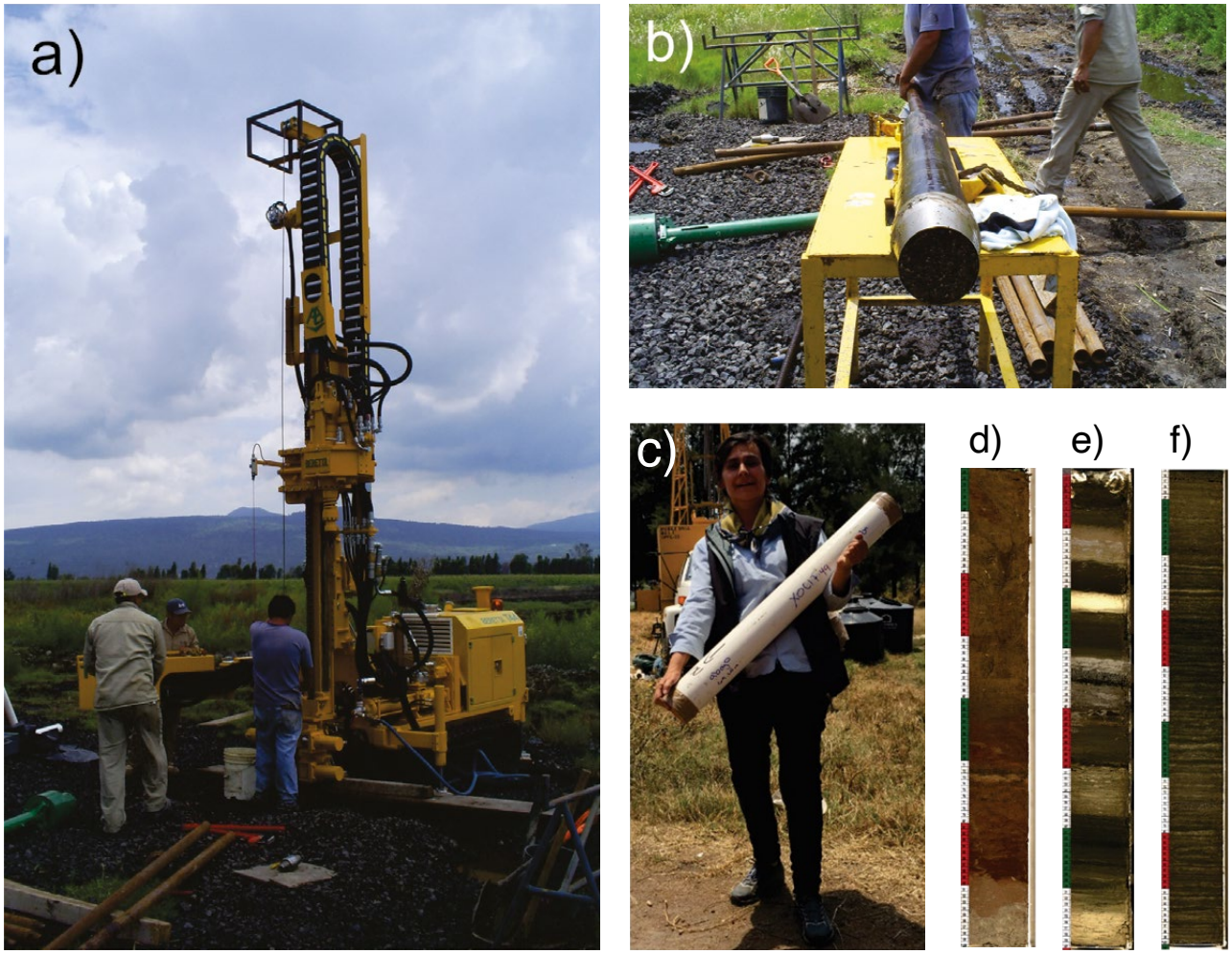


Fig. 8. Perforación de secuencias sedimentarias con maquinaria hidráulica. a) Equipo de perforación hidráulica especializado usado en el lago de Chalco. b) Aspecto del tubo metálico (tipo Shelby) y del tubo plástico interior. c) Transporte de un tramo de sedimento perforado en el antiguo lago de Xochimilco, CDMX. c-e) aspecto de diferentes tramos de sedimento en una secuencia proveniente del lago de Chalco, CDMX. El primer tramo (c) presenta sedimentos masivos, el segundo (d) presenta sedimentos bandeados y el último (e) sedimentos laminados. La recuperación de sedimentos lacustres con equipo hidráulico se muestra en el siguiente video: https://www.facebook.com/LabPaleolimno/videos/473738133068392.

5. Descripción y muestreo de los sedimentos

Las secuencias sedimentarias normalmente se recuperan dentro de tubos de plástico o metálicos que deben ser transportados al laboratorio en donde se debe describir el tipo de sedimento que conforma a la secuencia (descripción) y realizar la toma de muestras para los diversos tipos de análisis que se pretenda llevar a cabo. Como se mencionó, en campo los tubos deben sellarse y etiquetarse, siempre asegurando de marcar cuál es la parte superior o más reciente y cuál es la parte inferior o más antigua del tubo. En el laboratorio es importante ubicar cuál es la parte superior e inferior del tubo antes de iniciar cualquier procedimiento de descripción o muestreo.

En el caso de los núcleos cortos obtenidos mediante nucleadores de gravedad, el muestreo debe realizarse, de preferencia, dentro de las 24 h siguientes, pero definitivamente no es recomendable que se exceda de 4 semanas posteriores al muestreo para evitar la compactación de los sedimentos, que inevitablemente ocurre con el paso del tiempo y su alteración química. El muestreo se realiza mediante un émbolo que se introduce en la parte inferior del tubo (Fig. 9a) y se empuja con incrementos controlados de 1 cm (este intervalo puede variar dependiendo de los objetivos del muestreo). El sedimento es colectado en la parte superior del tubo con una charola de muestreo que tiene una lámina de acero inoxidable que corta el sedimento en la parte superior (Fig. 9b). El sedimento se puede recuperar de la charola de muestreo con cucharas

o espátulas para ser transferido a frascos (Fig. 9c). Dado el número elevado de muestras que pueden derivarse del muestreo de un solo núcleo, el uso de bolsas de plástico con cierre para las profundidades donde el sedimento se encuentra más consolidado puede facilitar su almacenamiento y transporte, pero siempre será más seguro el uso de frascos para los primeros centímetros de la secuencia que se encuentran poco consolidados.

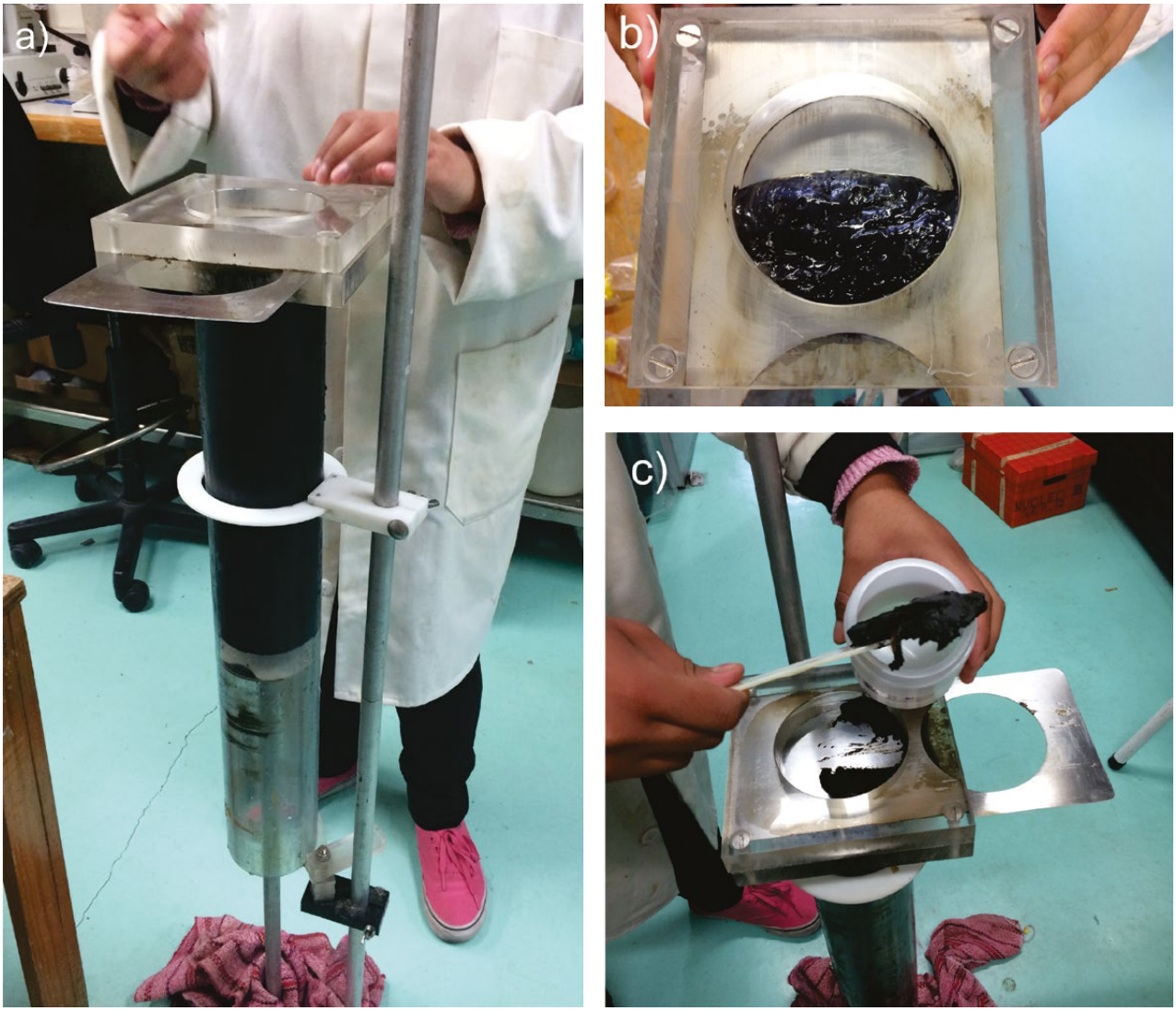


Fig. 9. Muestreo de una secuencia sedimentaria corta obtenida por medio de un nucleador de gravedad. a) Muestra el sistema de extracción completo. b) Charola de muestreo cortando el sedimento superficial. c) Charola de muestreo recuperando el sedimento en frascos de boca ancha.

Durante el muestreo se debe describir de forma macroscópica el color y el tamaño de grano (arcillas, limos, arenas, etc.) así como cualquier otra característica que pudiera ser de interés como la presencia de hojas, conchas de gasterópodos o bivalvos, semillas, raíces, etc. La determinación del color del sedimento es importante, sin embargo, es un parámetro difícil de establecer a simple vista. Tradicionalmente se utilizan las tablas de color de Munsel, pero en la práctica el uso de estas tablas resulta un proceso lento y que puede tener un sesgo de apreciación personal. Para evitar este sesgo personal en la apreciación del color, se pueden usar equipos electrónicos especializados (espectrofotómetros o medidores de color). Estos equipos producen tres mediciones en el espectro de color: L*, a* y b*. La variable L* está asociada con la luminosidad del material y oscila entre 100 (blanco) a 0 (negro). La variable a* determina el rango entre rojo (valores positivos) y verde (valores negativos) y la variable b* determina el rango entre amarillo (valores

positivos) y azul (valores negativos). Estas mediciones son rápidas y tienen mejor repetitividad que el uso de las tablas de Munsel aunque requiere de la inversión económica correspondiente para la adquisición del equipo. Hay que considerar que el color de las muestras puede cambiar si se observa el sedimento húmedo o seco, por lo que se recomienda realizar la determinación de color en ambas condiciones.

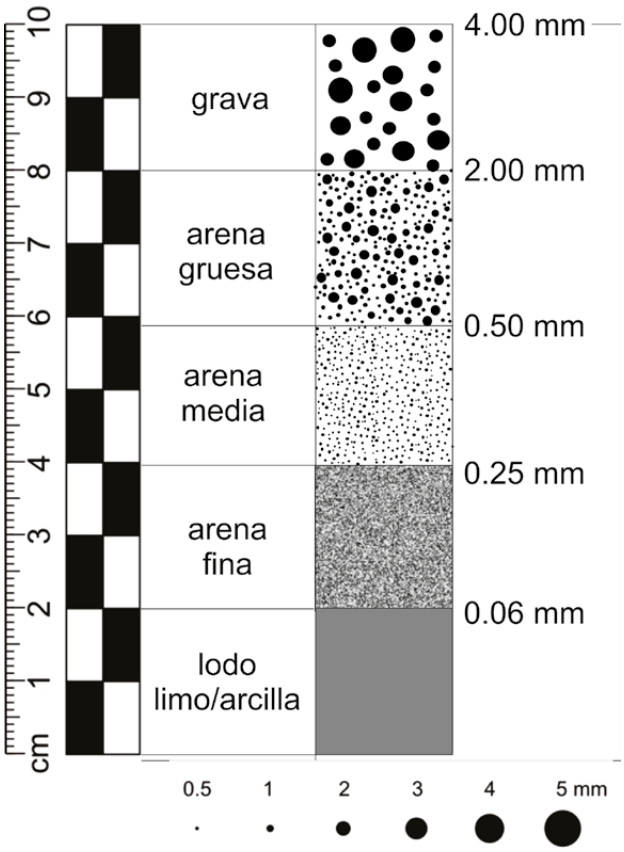


Fig. 10. Tabla de referencia que puede utilizarse como apoyo para identificar el tamaño de partículas que conforman al sedimento.

La descripción macroscópica del tamaño de partícula se realiza de forma cualitativa. Se puede utilizar como referencia una tabla de tamaños de grano (Fig. 10). Si las partículas tienen dimensiones mayores 2 mm se trata de gravas, aunque los sedimentos lacustres por lo general tienen pocos clastos de este tamaño. Si el tamaño de partícula varía entre 0.5 y 2 mm, se trata de arenas gruesas. Se trata de arenas medias a finas si las partículas son menores a 0.5 mm, pero se distinguen a simple vista y/o se perciben los granos individuales al tallar el sedimento entre los dedos. Cuando las partículas tienen tamaños menores a 0.06 mm (limos y arcillas) los granos no son distinguibles a simple vista ni perceptibles al tallarlos entre los dedos, por lo que se pueden clasificar como lodos o sedimentos finos limo-arcillosos.

En el caso de los núcleos obtenidos con nucleadores de pistón o hidráulicos, si el sedimento está lo suficientemente consolidado, deben ser cortados en mitades longitudinales para poder ser descritos y muestreados (en caso contrario deben ser tratados como los núcleos de gravedad). Hay que tomar en cuenta que una vez cortados en mitades longitudinales todos los núcleos inician un proceso de oxidación, secado y contaminación por hongos y bacterias que los va a alterar. Para conservarlos en buen estado durante el mayor tiempo posible, deben ser envueltos con película plástica, colocados dentro de bolsas plásticas selladas con cinta y conservados en refrigeración (5°C). Para cortar los núcleos en mitades longitudinales, se pueden seguir diversos procedimientos dependiendo de la dureza del sedimento y del tubo que lo contiene. Si el tubo es de plástico o aluminio y el sedimento es relativamente suave, es posible realizar los cortes longitudinales en el material del tubo usando sierras de disco. El corte debe abarcar solo el grosor del material del tubo, sin penetrar en el sedimento y deben realizarse dos cortes diametralmente opuestos a lo largo del tubo (simultáneamente si se cuenta con dos sierras montadas en soportes adecuados o con cortes independientes si solo se cuenta con una). Si el tubo es de acero inoxidable o aluminio y el sedimento es relativamente suave, se puede extraer el sedimento del tubo mediante el uso de un émbolo que ajuste perfectamente al diámetro interior del tubo. El émbolo se empuja usando varillas de longitud adecuada, ya sea manualmente o mediante equipos especializados que consisten en diferentes tipos de palancas para lograr la extracción del sedimento. Se deben tener listas canaletas de plástico (tubos de plástico cortados en mitades longitudinales) de un tamaño similar al diámetro y longitud del tubo del que se va a extraer el sedimento. Las canaletas se deben de acomodar de tal forma que vayan recibiendo el sedimento conforme es extraído del tubo. Una vez que el tubo que contiene el sedimento está cortado o que el sedimento está en las canaletas, se procede a pasar un hilo plástico o metálico o un cuchillo a lo largo de la secuencia para obtener las mitades longitudinales. En el caso que el sedimento esté muy consolidado, será necesario realizar el corte en mitades longitudinales con una sierra de cinta.

Una vez abiertos los tubos, es conveniente tomar un registro fotográfico en el que se muestre al sedimento junto a una cinta métrica (Figs. 8d-f) como una referencia del tipo de sedimentos que conforman a la secuencia bajo estudio. Posteriormente, se debe describir la secuencia estratigráfica, esto es, se deben de identificar las diferentes capas de sedimento que tienen características similares de color y textura, demarcando cuando se observan cambios o transiciones en el tipo de material (Schnurrenberger, Russell, & Kelts, 2003). Es necesario asegurarse de que la fotografía y la descripción se realicen observando una superficie limpia y en lo posible, también plana. La descripción macroscópica debe incluir, además del color y el

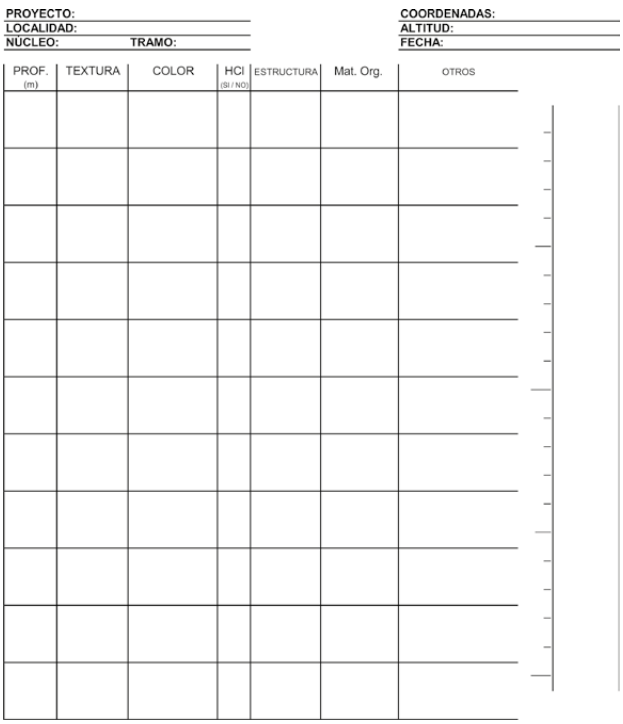
tamaño de grano, la presencia de estructuras sedimentarias como bandeamientos (Fig. 8e) o de laminaciones (Fig. 8f) (ver CUADRO DE TEXTO 2).

Una forma sencilla para llevar un registro del tipo de sedimento que conforma una secuencia es utilizar hojas de descripción (Fig. 11) que incluyan un diagrama o esquema a escala de los tramos de la secuencia sedimentaria observada y en donde se hagan anotaciones utilizando columnas o espacios delimitados para las diferentes características que se deben de observar (color, textura, estructuras sedimentarias, etc.). Con base en esta información posteriormente se puede elaborar un diagrama de la columna estratigráfica completa de la secuencia bajo estudio.

Cuadro de texto 2: bandeamientos, laminaciones y "varvas"

Una de las principales estructuras que se preservan en los sedimentos lacustres son los bandeamientos o laminaciones. Esto es, los sedimentos lacustres pueden presentar una alternancia de capas con composición química, textura y/o color distintivas, que reflejan condiciones variables en los procesos de depósito de los sedimentos. Cuando estas capas son relativamente gruesas, de uno o varios centímetros, se identifican como bandeamientos (Fig. 8e), mientras que, cuando las capas son más delgadas del orden de milímetros, se conocen como laminaciones (Fig. 8f) (Schnurrenberger *et al*., 2003). En algunos lagos, se puede observar que las laminaciones alternan regularmente entre dos o tres tipos diferentes de sedimentos que sugieren una alternancia en las condiciones ambientales del lago durante su depósito. El análisis meticuloso de estas capas puede aportar información sobre estos procesos recurrentes que pueden involucrar florecimientos algales, depósitos estacionales de calcita o de sedimentos terrígenos, etc. En algunos lagos, las laminaciones y los eventos recurrentes que las generan corresponden con cambios estacionales a lo largo del ciclo anual, de manera que, cada par de laminaciones representan un año (laminaciones anuales). Al par de láminas que representan un año también se le conoce como "varva" (Zolitschka, Francus, Ojala, & Schimmelmann, 2015). Los sedimentos "varvados" o anualmente laminados son frecuentes en lagos profundos con fondos anóxicos donde no existen organismos que perturben el sedimento.

Es recomendable que la descripción macroscópica sea complementada por una descripción microscópica que identifique el tipo de partículas presentes en cada capa sedimentaria. Con este fin, es necesario realizar laminillas frotis (Fig. 12) que deberán ser observadas al microscopio petrográfico para la correcta identificación de los minerales. La elaboración de laminillas frotis es recomendable si el sedimento está conformado por lodos (limos y arcillas), ya que, cuando se trata de arenas el grosor de las partículas dificulta el montaje y observación de las laminillas. Las laminillas frotis se preparan tomando una pequeña cantidad de sedimento con la ayuda de un palillo de dientes o aguja de disección (Fig. 12a). El sedimento colectado se dispersa en una gota de agua hasta dejar una capa homogénea en la parte central de un portaobjetos limpio. El sedimento se seca sobre una parrilla de calentamiento a baja temperatura. Una vez seco se monta usando una o dos gotas de una resina especial (Adhesivo Óptico Norland 61) aplicada directamente sobre el portaobjetos (Fig. 12b) y se cubre con un cubreobjetos cuadrado o rectangular tratando de que no queden burbujas. Posteriormente, se deja de cinco a diez minutos bajo luz ultravioleta (Fig. 12c), hasta que la resina se haya endurecido. Estas laminillas se deben observar bajo el microscopio para identificar el porcentaje aproximado de cada tipo de partículas que lo conforman. En general estas partículas pueden ser de tres tipos (Schnurrenberger *et al*., 2003): clásticas, químicas o biogénicas.


PROYECTO:
LOCALIDAD:
NÚCLEO: TRAMO:
COORDENADAS:
ALTITUD:
FECHA:

PROF. (m)	TEXTURA	COLOR	HCl (SI / NO)	ESTRUCTURA	Mat. Org.	OTROS

Fig. 11. Ejemplo de una hoja de descripción utilizada en el Laboratorio de Paleolimnología, UNAM; para el registro del tipo de sedimentos que conforman las diferentes capas o unidades a lo largo de una secuencia sedimentaria.

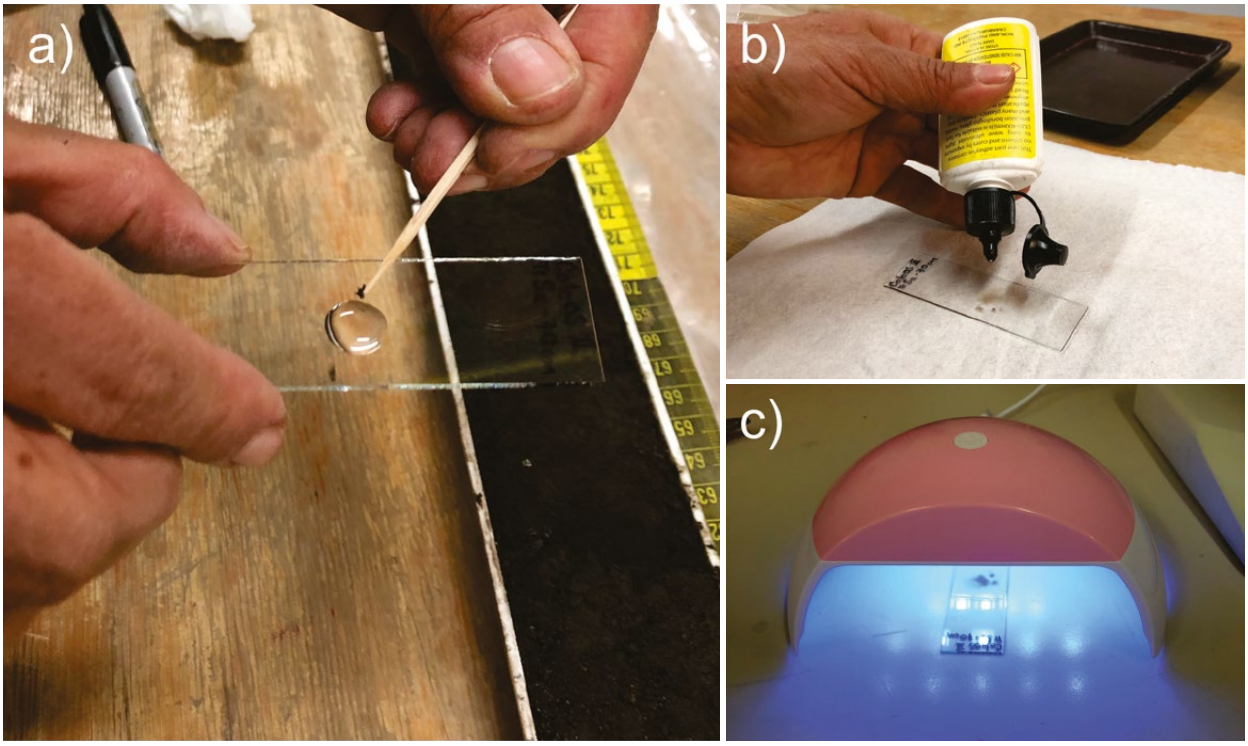


Fig. 12. Elaboración de laminillas frotis. a) Se colecta una cantidad pequeña de sedimento con un palillo de dientes y se dispersa en una gota de agua. b) Una vez seco el sedimento dispersado, se colocan una o dos gotas de resina óptica y un cubreobjetos. c) La resina endurece al colocar la laminilla por unos minutos bajo luz ultravioleta.

Las partículas clásticas incluyen a todos los terrígenos alogénicos; bajo el microscopio es importante distinguir cuál es el tamaño dominante, si cae dentro del rango de las arcillas (< 4 mm) o limos (4-63 mm). Un analista entrenado podrá distinguir la composición de los granos si se trata, por ejemplo, de granos de cuarzo, feldespato (Fig. 13a) o carbonatos detríticos Los componentes químicos incluyen a los minerales formados en la columna de agua, y se requiere de un analista entrenado para identificar los minerales presentes. Como se mencionó, el mineral autigénico más frecuente es la calcita, la cual forma cristales romboidales pequeños que presentan un brillo especial (birrefringencia) cuando se usa la luz polarizada en el microscopio petrográfico. Los componentes biogénicos pueden tener un origen tanto autigénico como alogénico; en cuanto a su composición, incluyen restos orgánicos y restos no orgánicos de los seres vivos. Los materiales biogénicos (Fig. 13 b-f) frecuentemente se observan al microscopio como grumos de materia orgánica amorfa (Fig. 13e) muy degradada (frecuentemente de origen autigénico). Sin embargo, también se pueden encontrar restos orgánicos mejor preservados, como fragmentos o estructuras de organismos acuáticos entre los que se pueden mencionar algas, amebas testadas (Fig. 13b), cladóceros (Fig. 13c), quironómidos, etc. También se pueden identificar granos de polen, fragmentos de tejidos de plantas, turba (Fig. 13f) e inclusive de material carbonizado, que se caracteriza por tener un aspecto negro lustroso. Los materiales biogénicos no orgánicos incluyen estructuras que dan soporte o protección a los organismos y que pueden ser de sílice o carbonato de calcio. Dentro de los restos biogénicos silíceos, los más comunes son los fitolitos, las valvas de diatomeas (Fig. 13d), los quistes y las escamas de crisofitas y las espículas de esponjas. Dentro de los carbonatados se encuentran las valvas de ostrácodos y las loricas de Phacotus.

Una vez definida la estratigrafía de la secuencia, se pueden tomar las muestras para los diversos estudios que se pretenda realizar. Es recomendable que la capa muestreada no exceda 1 cm de grosor para evitar mezclar sedimentos de temporalidades muy distintas. Las muestras a lo largo de la secuencia se pueden colectar de forma sistemática, por ejemplo, cada 5 cm, aunque este espaciado dependerá de los objetivos del estudio. Hay que recordar que mientras mayor sea la distancia entre las muestras, mayor será también el espaciamiento en el tiempo que representan. En trabajos en los que se requiere una mayor resolución temporal, el espaciamiento deberá ser menor (cada a 1 o 2 cm) pero, en estudios que involucran secuencias sedimentarias más largas, con frecuencia el espaciamiento es mayor (cada 10 o 20 cm) dado que se debe optimizar la carga de trabajo (esfuerzo y costo invertido) contra la resolución temporal deseada. En el caso de núcleos que han sido cortados en mitades longitudinales, es frecuente que las muestras solo se colecten de una mitad de la secuencia y la otra mitad se mantenga intacta como referencia.

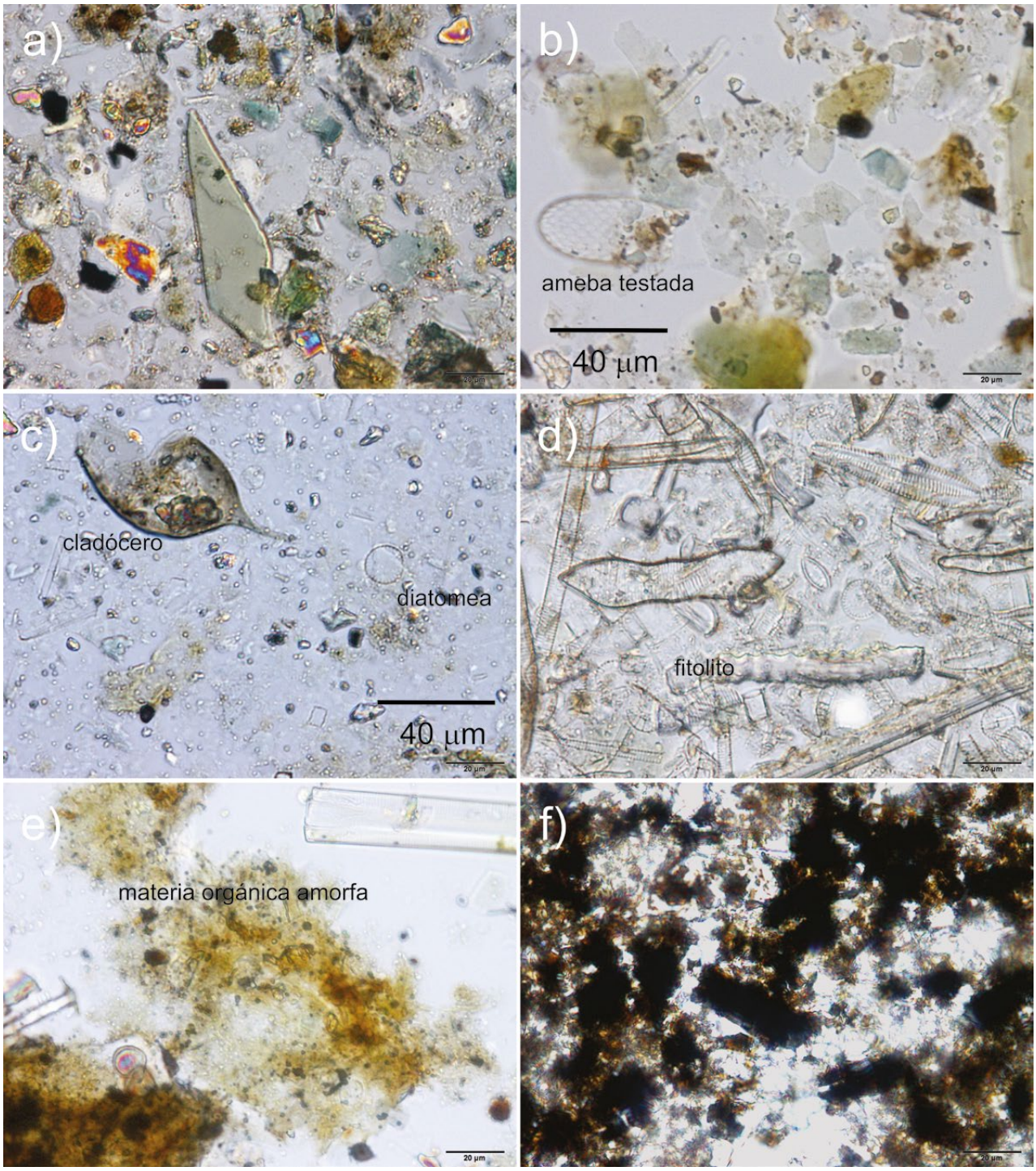


Fig. 13. Ejemplos de sedimentos lacustres vistos en preparaciones frotis al microscopio óptico. a) Sedimento predominantemente clástico limoso. b) Sedimento clástico limoso con restos de una ameba testada. c) Sedimento clástico arcilloso, con restos de una diatomea y un cladócero. d) Sedimento formado dominantemente por valvas de diatomeas. e) Sedimento formado predominantemente por materia orgánica amorfa. f) Sedimento formado por fragmentos de turba.

Dependiendo de los objetivos de estudio, de cada horizonte muestreado se deben obtener las submuestras necesarias para realizar los diversos análisis programados, los cuales pueden ser físicos, geoquímicos, cronológicos (datación), de indicadores (proxy) biológicos (polen, diatomeas, ostrácodos, etc.), genómicos, de contaminantes, etc. Por cuestiones prácticas, es común que se colecten uno o dos centímetros cúbicos de sedimento, pero cada tipo de análisis puede requerir diferentes cantidades y que la muestra sea almacenada de forma diferente, ya sea refrigerada, congelada o secada por liofilización. Las muestras volumétricas se pueden obtener con muestreadores cilíndricos o con forma de prisma cuadrangular de 1 cm de diámetro o de lado (Fig. 14). Una forma sencilla de hacer un muestreador volumétrico es con jeringas desechables de 5 ml que tienen 1 cm de diámetro. A la jeringa se le corta la punta con una navaja y la graduación de estos cilindros corresponde con los centímetros cúbicos de sedimento colectado (Fig. 14b). Las muestras se depositan en frascos pequeños de boca ancha (2 a 5 ml, Fig. 14c) o en bolsas plásticas.

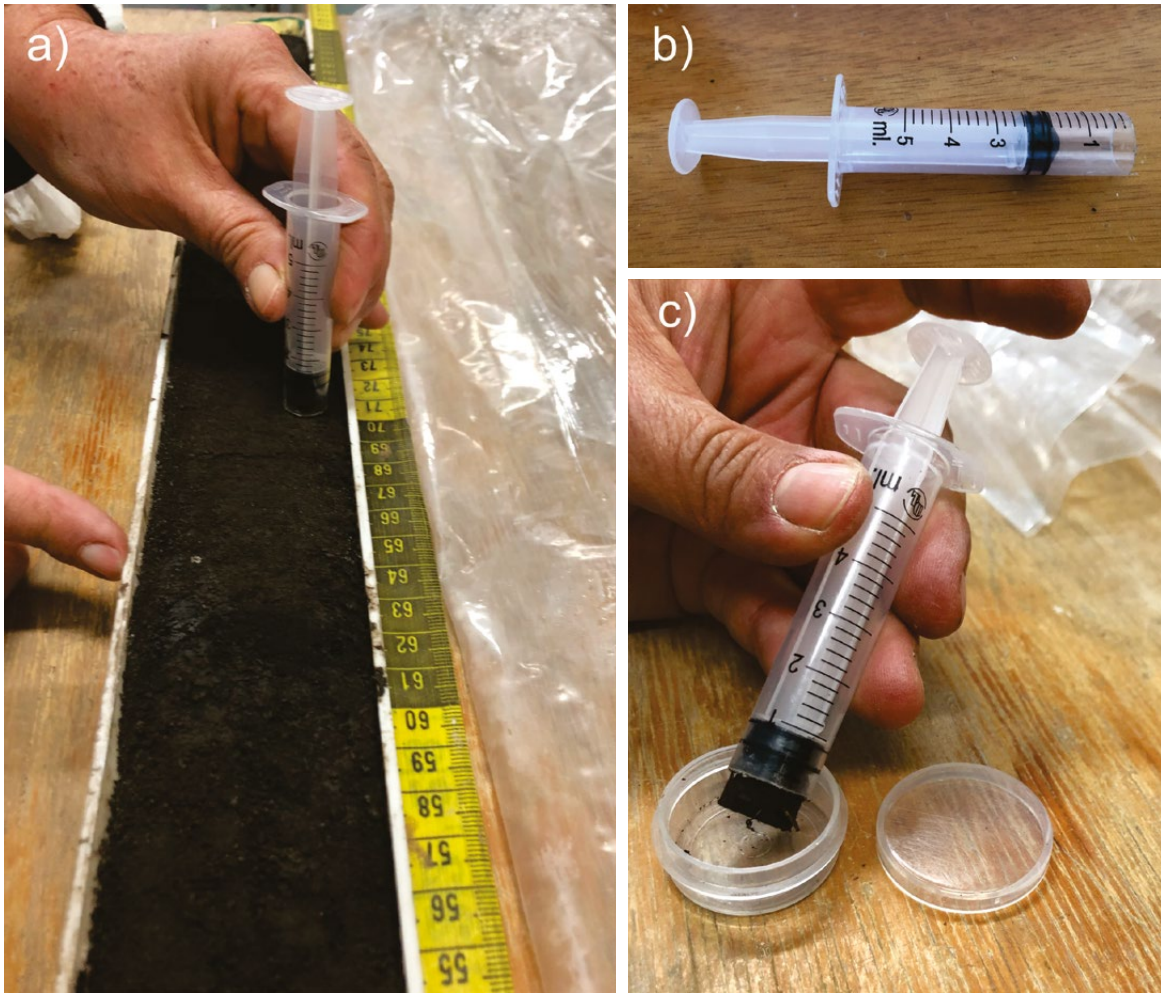


Fig. 14. Uso de un muestreador volumétrico. a) Toma de la muestra encajando el muestrador sobre la superficie de un núcleo sedimentario. b) Ejemplo de un muestreador cilíndrico hecho con una jeringa comercial de 5 ml cuya punta fue cortada con una navaja. c) Una vez colectada la muestra, se transfiere a un contenedor empujando el émbolo de la jeringa.

También es importante definir con anticipación si las submuestras deben de ser refrigeradas, congeladas o secadas. Las muestras húmedas en refrigeración no duran mucho tiempo en buen estado, ya que se oxidan rápidamente y los hongos pueden afectarlas con el tiempo, pero son ideales para realizar el estudio de bioindicadores como el polen, los cladóceros, o las amebas testadas. Las muestras congeladas duran más tiempo sin oxidarse o contaminarse por hongos, pero para algunos indicadores no es conveniente congelar el sedimento porque se alteran o destruyen, como es el caso, por ejemplo, de las amebas testadas. Finalmente, las muestras pueden ser

secadas, ya que el sedimento seco es química y biológicamente más estable. El sedimento se puede secar por diferentes métodos, ya sea en un horno a baja temperatura (~50°C por 12 horas), o lo más recomendable es por liofilización que tiene la ventaja de que el sedimento se disgrega fácilmente. Para liofilizar el sedimento, las muestras se deben congelar primero y posteriormente sublimar (paso directo del estado sólido al gaseoso) en un equipo especializado denominado liofilizadora que, en esencia, consiste en una cámara de vacío a muy baja temperatura. Las muestras secas son recomendables para muchos análisis geoquímicos e inclusive algunos biológicos (p.ej., diatomeas). Además, con una muestra seca se puede tener una referencia con respecto al peso del sedimento, sin la interferencia de porcentajes variables de humedad.

En todo estudio paleoambiental es muy importante considerar la colecta de muestras para determinar la edad de los sedimentos que conforman la secuencia, ya que el estudio no tendría valor científico si se desconoce el periodo de tiempo en el que se acumularon los sedimentos. En la mayoría de los estudios paleoambientales se emplean dataciones por plomo-210 (210-Pb) o carbono-14 (14-C). Las dataciones de 210-Pb se usan para estudios paleoambientales que abarquen los últimos 100 años, aproximadamente (Sánchez-Cabeza & Ruiz-Fernández, 2012). Con este fin, normalmente se trabaja con núcleos de gravedad de < 1 m de longitud. Para la datación por 210-Pb se deben colectar muestras de forma continua a lo largo de toda la secuencia y es recomendable determinar el peso de la rebanada de sedimento completa (o de una fracción representativa) en húmedo y posteriormente en seco para poder determinar tasas de acumulación másica.

En las secuencias sedimentarias del Pleistoceno tardío (130,000 a 11,500 años) y el Holoceno (últimos 11,500 años) comúnmente se utilizan dataciones por 14-C. Este método de datación tiene un rango máximo de 50,000 a 60,000 años aproximadamente (Bernal, Beramendi Orosco, Lugo-Ibarra, & Daesslé, 2010). Las muestras para este tipo de datación se deben colectar en capas seleccionadas, distribuidas a lo largo de toda la secuencia, en donde existan materiales orgánicos adecuados para datar. Es importante identificar el tipo de rocas que forman la cuenca de captación del lago ya que si en ella abundan las rocas calizas, se pueden tener dificultades en las dataciones por 14-C. En este caso, es recomendable datar materia orgánica alogénica (procedente del exterior del lago), para evitar el efecto de carbono antiguo que puede tener la materia orgánica autigénica. Este efecto causa que las dataciones aporten edades más antiguas que las reales. Las muestras para datación por 14-C se deben colectar con todas las precauciones para evitar contaminación con materiales orgánicos más antiguos o modernos y, de preferencia, se deben congelar o secar para evitar el crecimiento de hongos, bacterias, etc.

6. Afloramientos o trincheras

Los sedimentos lacustres también pueden ser estudiados a partir de afloramientos expuestos, ya sea por actividad tectónica, como desplazamientos asociados con fallas, o por acción de procesos erosivos, como puede ser el corte causado por el flujo de un río sobre sedimentos más antiguos (Fig. 15a). También se pueden presentar afloramientos expuestos por cortes asociados con obras de ingeniería como carreteras, minería, etc. En algunos casos los sedimentos pueden ser expuestos mediante excavaciones con palas o con maquinaria para generar pozos o trincheras en los que se puedan observar los sedimentos lacustres (Fig. 15b). Los sedimentos en afloramientos o trincheras normalmente tienen algún grado de contaminación o alteración en las capas expuestas, por lo que es conveniente limpiar la superficie a muestrear. Esta limpieza permitirá, además, visualizar y describir más claramente la estratigrafía de la secuencia.

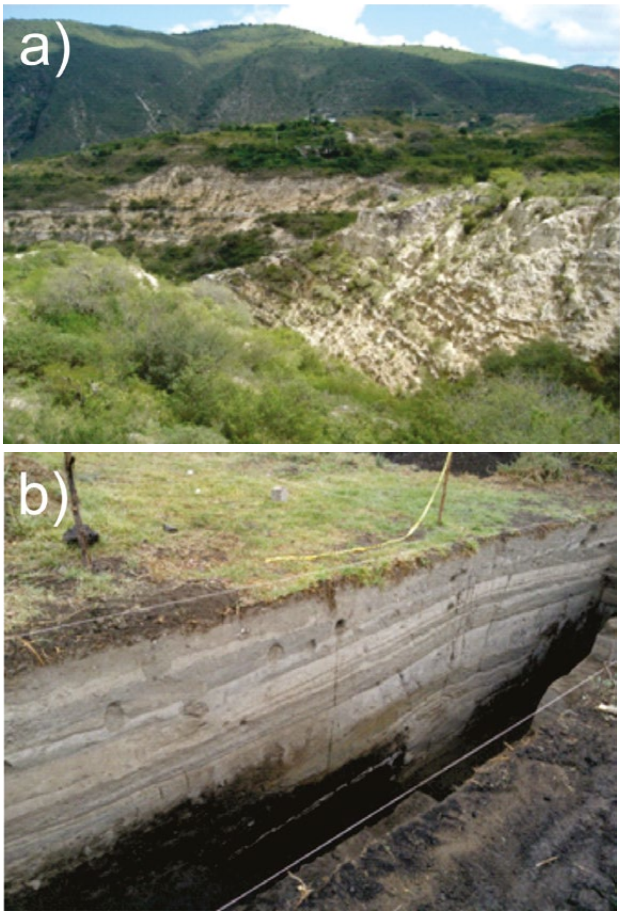


Fig. 15. Sedimentos lacustres expuestos que permiten apreciar la continuidad lateral de las capas sedimentarias. a) Sedimentos lacustres expuestos por erosión fluvial cerca de Santa María Amajac, Hidalgo. b) Trinchera excavada en sedimentos lacustres del lago de Chalco durante investigaciones arqueológicas en Tulyehualco, CDMX.

Es conveniente identificar un horizonte de referencia contra el cual se mida la profundidad de las muestras colectadas. En el caso de una trinchera, este horizonte puede ser el nivel del suelo a partir del que se inició la excavación. En el caso de afloramientos, puede seleccionarse alguna capa con alguna característica distintiva que la haga fácilmente identificable en todo el afloramiento. La colecta de las muestras en un afloramiento o trinchera se puede hacer de forma regular cada 5 o 10 cm pero dado que los afloramientos pueden abarcar alturas bastante grandes, otra opción es tomar una o dos muestras por cada unidad o capa estratigráfica identificada a lo largo de la secuencia, dependiendo de los objetivos del estudio. Las muestras se pueden colectar directamente con ayuda de una pequeña pala o espátula en bolsas de plástico etiquetadas, teniendo cuidado de que el horizonte muestreado tenga un espesor acotado (< 5 cm, de preferencia 1 o 2 cm) para no mezclar sedimentos de temporalidades muy distintas.

Otra forma de muestreo recomendable para materiales relativamente suaves es utilizar muestreadores de metal, cilíndricos o con forma de prisma cuadrangular, con diámetro o lado de 1 a 1.5 cm y longitudes de 4 o 5 cm (tubería de aluminio o acero galvanizado son buenas opciones). Estos muestreadores se entierran horizontalmente con martillo sobre la pared limpia y son recuperados raspando el material a su alrededor con espátulas o palas. Los muestreadores se pueden guardar directamente en bolsas individuales etiquetadas y transportar al laboratorio, donde el material debe ser recuperado en un ambiente limpio. Esta forma de muestreo asegura que el horizonte muestreado sea acotado al diámetro o altura del muestreador y evita la contaminación con materiales provenientes de horizontes superiores que pueden colapsar durante la toma de la muestra.

7. Casos de estudio

A continuación, se presentan dos ejemplos de investigaciones realizadas en el Laboratorio de Paleolimnología donde se han aplicado las técnicas de muestreo descritas anteriormente para dejar testimonio del potencial que tienen este tipo de estudios, así como comentar algunas de las dificultades prácticas que se han afrontado.

7.1. Ejemplo de secuencias sedimentarias largas. El lago de Chalco, en el sur de la cuenca de México, ha sido uno de los sitios más importantes de investigación para el laboratorio de Paleolimnología. En este sitio se han recuperado sedimentos lacustres de hasta 500 m de profundidad total a lo largo de varias décadas que van de 1987 a 1989 y posteriormente, en los años 2008, 2011 y 2016. En estos años se recuperaron varios núcleos sedimentarios paralelos en la zona central del antiguo lago de Chalco (Fig. 16), empleando los métodos de perforación descritos en la sección 4.3. Los sedimentos más superficiales (secuencias Chalco-B y CHA-11) fueron obtenidas empleando un nucleador de pistón con tubos de acero inoxidable, y el sedimento fue extraído de estos tubos usando un sistema de émbolo para trasvasarlo a canaletas plásticas donde fue cortado en mitades longitudinales.

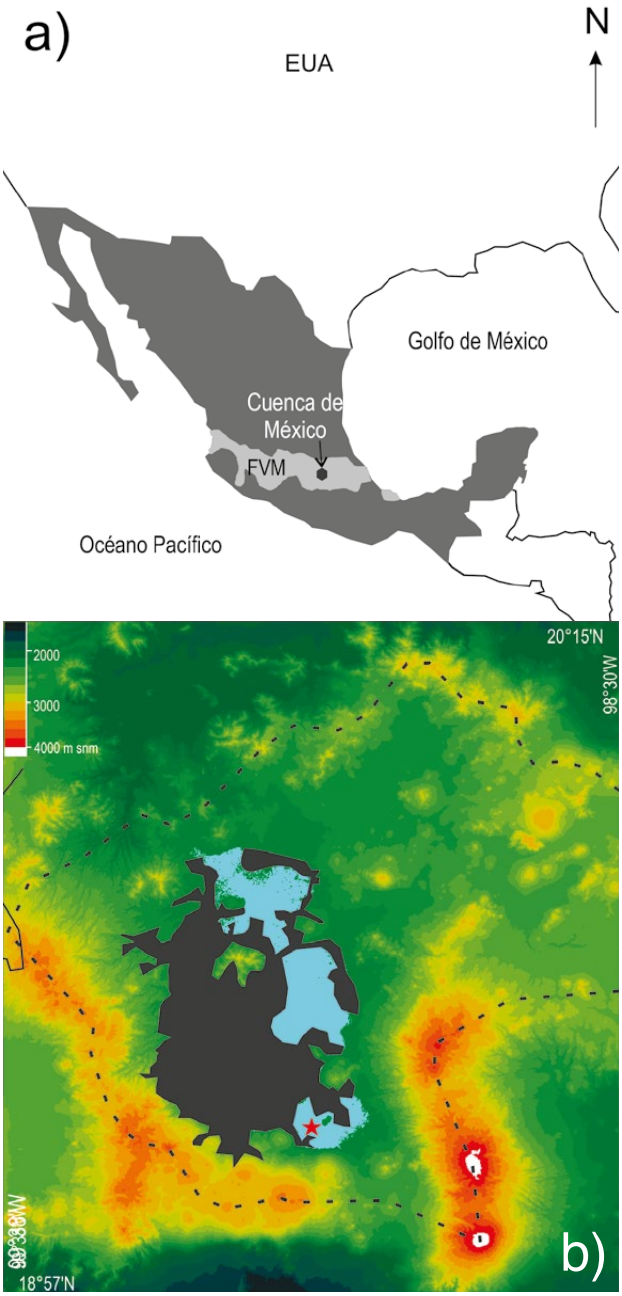


Fig. 16. Localización del sitio de estudio. a) Ubicación de la Cuenca de México. b) La estrella roja maraca la zona donde fueron recuperadas las secuencias sedimentarias de Chalco (Cha-B, CHA08-11 y MEXI-CHA16), al sur de la Cuenca de México. Zona gris = zona urbana de la Ciudad de México (CDMX) y sus zonas conurbadas. Zona azul = antigua zona lacustre de la cuenca de México.

Las secuencias de mayor profundidad (CHA-08 y MEXI-CHA16) fueron obtenidas en 2008 y 2016 mediante el uso de maquinaria hidráulica especializada que recupera el sedimento mediante tubos metálicos con un tubo plástico interior . En este caso, tanto el tubo plástico como el sedimento que contiene se cortaron en mitades longitudinales. Para el caso de las secuencias CHA-08, CHA-11 y MEXI-CHA16, todas las secciones fueron enviadas al Laboratorio de Perforación Científica Continental de la Universidad de Minnesota en Minneapolis, EEUU, donde fueron descritas y fotografiadas con una cámara automatizada. La descripción estratigráfica, incluyendo la identificación de capas de sedimento de origen volcánico, se usa como base para correlacionar las secuencias recuperadas con el objetivo de establecer una secuencia maestra. La secuencia maestra construida con los núcleos superficiales CHA-11 y los núcleos profundos CHA-08 alcanzó 122 m de longitud total (Fig. 17a) (Ortega-Guerrero *et al*., 2017). Por su parte, la secuencia maestra construida con los núcleos MEXI-CHA16 abarca una profundidad total de 520 m, donde los primeros 300 m corresponden con sedimentos lacustres y donde el material más profundo es de origen fluvial, aluvial o volcánico (Lozano-García *et al*., 2017; Martínez-Abarca *et al*., 2021). La cronología de secuencias sedimentarias largas puede ser problemática ya que, con frecuencia, su edad rebasa el límite de la datación por radiocarbono, que es de aproximadamente 50,000 años. En el caso de la secuencia maestra CHA08-11, su cronología se basa en 15 dataciones de 14-C en los primeros 32.5 m, en los que se llega hasta los 40,000 años, y una datación por 230-Th / 234-U a los 63.5 m que arrojó una edad de 76,700 años. Sin embargo, la parte baja y más antigua carece de dataciones que permitan estimar una edad basal, y esto representa un problema importante para el estudio e interpretación de la secuencia.

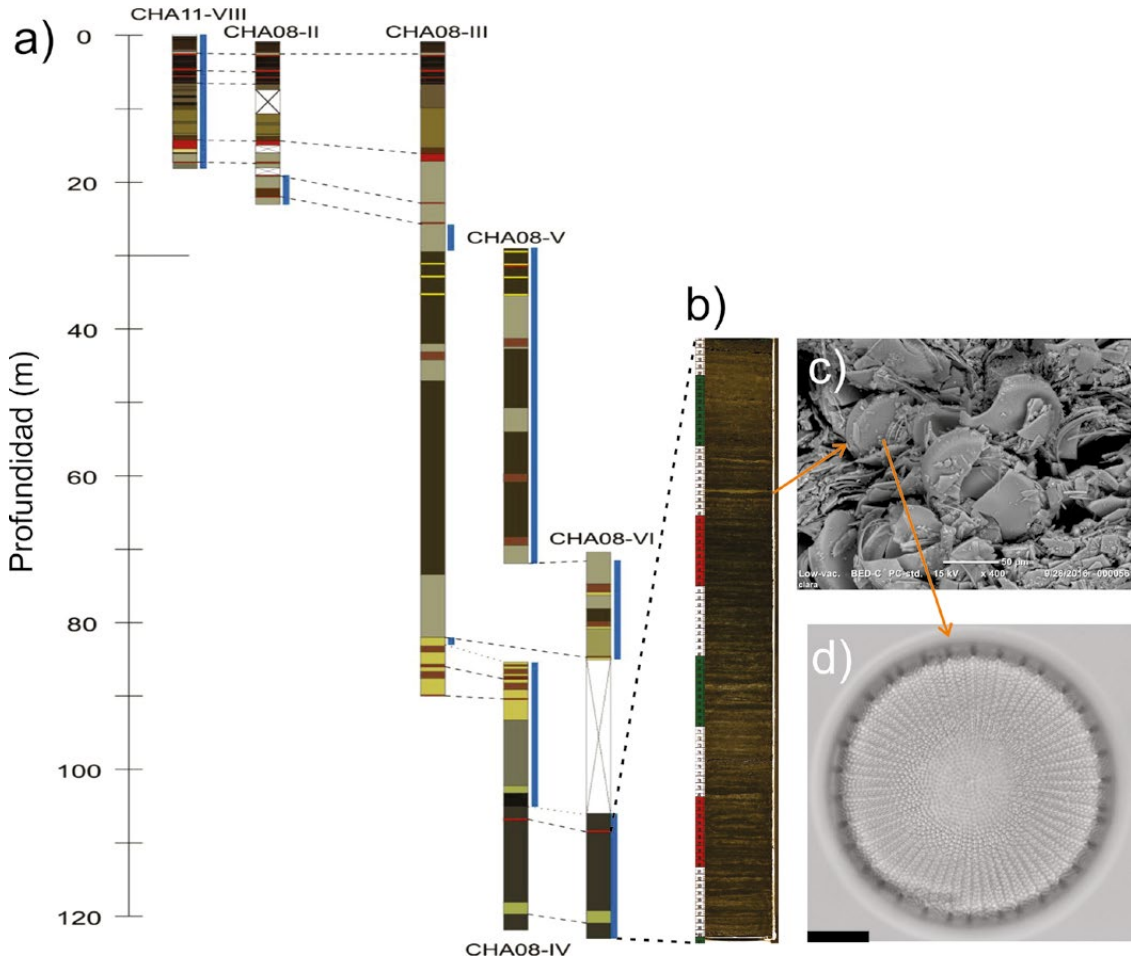


Fig. 17. Sedimentos lacustres de Chalco, cuenca de México. a) Secuencia maestra CHA08-11 (modificado de Ortega *et al*. 2017), las barras azules indican las secciones seleccionadas para formar parte de la secuencia maestra. b) Sedimentos laminados en la base de la secuencia maestra CHA08-11. c) Aspecto de una lámina clara vista con un microscopio electrónico de barrido, donde se aprecia que está formada casi exclusivamente por valvas de diatomeas. d) Fotografía tomada al microscopio de luz de *Stephanodiscus niagarae*, presente en las laminaciones claras de los sedimentos laminados a la base de la secuencia maestra CHA08-11. La barra negra representa una escala de 10 µm.

A continuación, describiremos la forma en la que se pudo resolver, por lo menos parcialmente, esta dificultad. La descripción de la secuencia CHA08-11 permitió identificar la presencia de sedimentos laminados en su sección basal (Fig. 17b). Un análisis detallado de las laminaciones determinó que alternan una capa clara rica en diatomeas (Fig. 17c) con una capa oscura rica en líticos (Avendaño-Villeda, Caballero, Ortega-Guerrero, Lozano-García, & Brown, 2018). Las especies de diatomeas presentes en los sedimentos laminados son indicativas de ambientes de agua dulce y en particular destaca la presencia de una especie que actualmente es rara en el centro de México: Stephanodisucs niagarae (Fig. 17c y 17d). Los sedimentos laminados, las diatomeas indicadoras de agua dulce y específicamente la presencia de S. niagarae soportan la interpretación de que los sedimentos basales de la secuencia CHA08-11 fueron depositados bajo condiciones climáticas más frías, con menor evaporación, que permitieron la presencia de aguas más profundas y dulces en Chalco. Las condiciones de agua dulce contrastan con el resto de la secuencia, en la que dominan especies de aguas salobres (Avendaño, Caballero, Ortega-Guerrero, & Lozano-García, 2023). Por otro lado, el único intervalo en donde existen diatomeas de agua dulce en Chalco, además de en los sedimentos laminados, corresponde con sedimentos que datan del último máximo glaciar (25,000 a 20,000 años) (Margarita Caballero, Lozano-García, Ortega-Guerrero, & Correa-Metrio, 2019). Como ya se mencionó, S. niagarae es actualmente una especie rara en los lagos del centro de México y solo habita en cuencas con altitudes mayores a 2,500 m snm, que tienen climas relativamente fríos. Esta especie tiene actualmente una distribución preferencial en lagos eutróficos en los climas fríos del norte de Estados Unidos y el sur de Canadá. Un modelo de nicho ecológico permitió proponer que la presencia de S. niagarae en Chalco se explica por su migración al sur durante intervalos de tiempo con condiciones climáticas más frías, como fue el último máximo glaciar hace 25,000 a 20,000 años (Avendaño, Caballero, & Vázquez, 2021). Por la posición estratigráfica de los sedimentos laminados, este modelo permitió establecer que la base de la secuencia maestra de Chalco se depositó durante el penúltimo máximo glaciar, que terminó hace 130,000 años. De esta forma se estableció un punto de amarre cronológico a los 106 m (profundidad a la que se presentan las laminaciones en la secuencia CHA08-11) al que se le asigna la edad de 130,000 años (final de la penúltima glaciación), sustentando un modelo de edad que es consistente con las edades radiométricas, y que permite estimar que la base de la secuencia CHA08-11 data en 150,000 años aproximadamente.

7.2 Ejemplo de secuencias sedimentarias cortas. Los lagos de Montebello son un grupo de lagos de disolución en rocas calizas (cársticos) al sur de estado de Chiapas, muy cerca de la frontera de México con Guatemala (Fig. 18a). Estos lagos tienen un amplio atractivo turístico por sus aguas transparentes y azules. Sin embargo, desde 1986 y con mayor frecuencia desde 2003, los habitantes de la zona se han quejado de que los lagos están cambiando de color, tienen aguas turbias y malos olores (Alcocer, Merino-Ibarra, Oseguera, & Escolero, 2018; Melo & Cervantes, 1986). Estudios limnológicos realizados a partir del 2010 confirman que los lagos que reciben la descarga del Río Grande de Comitán (RGC), que están interconectados por canales y que se encuentran rodeados por zonas agrícolas, son actualmente eutróficos, turbios y están enriquecidos son sulfatos (Mora Palomino, García, Ramos, Bonifaz, & Escolero, 2017; Vera-Franco, Hernández-Victoria, Alcocer, Ardiles, & Oseguera, 2015). Se considera que estas características han sido favorecidas por actividades antropogénicas que derivan en la entrada de materia orgánica proveniente del suelo, así como nutrientes y sulfatos lixiviados de las zonas agrícolas. Por otro lado, los lagos que no tienen una conexión superficial con el grupo de lagos eutróficos ni con el flujo del RGC y cuyas cuencas tienen una cubierta boscosa mejor preservada conservan aguas transparentes, tienen un menor nivel trófico (son oligo-mesotróficos) y niveles bajos de sulfatos.

El estudio de secuencias sedimentarias lacustres cortas es una metodología útil para comprender los procesos de cambio reciente en los lagos y sus cuencas de captación. Estos estudios son particularmente valiosos cuando no se tienen conocimientos previos que permitan establecer las condiciones basales u originales de los ecosistemas. El estudio de las características de los sedimentos, como su geoquímica elemental y el contenido de diatomeas, son algunas de las herramientas que se pueden emplear para este fin. Por ejemplo, las concentraciones del elemento titanio (Ti) son indicadoras de erosión y transporte de sedimentos de la cuenca al lago, por lo que sus incrementos reflejan procesos de deforestación y erosión. Por otro lado, la distribución ecológica de las diferentes especies de diatomeas permite identificar que algunas son indicadoras de ambientes eutróficos y/o tolerantes a aumentos en la salinidad y el contenido de sulfatos en las aguas. En la región de Montebello las diatomeas que se han identificado como indicadoras de los lagos eutróficos son *Aulacoseira granulata* y su variedad *angustissima* y *Stephanocyclus meneghinianus*, esta última también es tolerante a aumentos en la salinidad de los cuerpos de agua.

En este trabajo se presentan como ejemplo los resultados de una secuencia corta proveniente del lago Peñasquito (Fig. 18b) (M. Caballero, Vázquez, Alcocer, & Mora-Palomino, 2004). Esta secuencia sedimentaria se obtuvo usando un nucleador de gravedad y los sedimentos se muestrearon cada 1 cm conforme a lo descrito en la sección 4.2. En todas las muestras se determinó el contenido de Ti mediante un análisis de fluorescencia de rayos-X (FRX) empleando un equipo Nitton XL3t. Además, en una de cada 3 muestras se analizó el contenido de diatomeas, mostrando en este trabajo específicamente aquellas que son indicadoras de condiciones de niveles tróficos elevados y enriquecimiento en sulfatos como *A. granulata* y su variedad *angustissima* y *S. meneghinianus*.

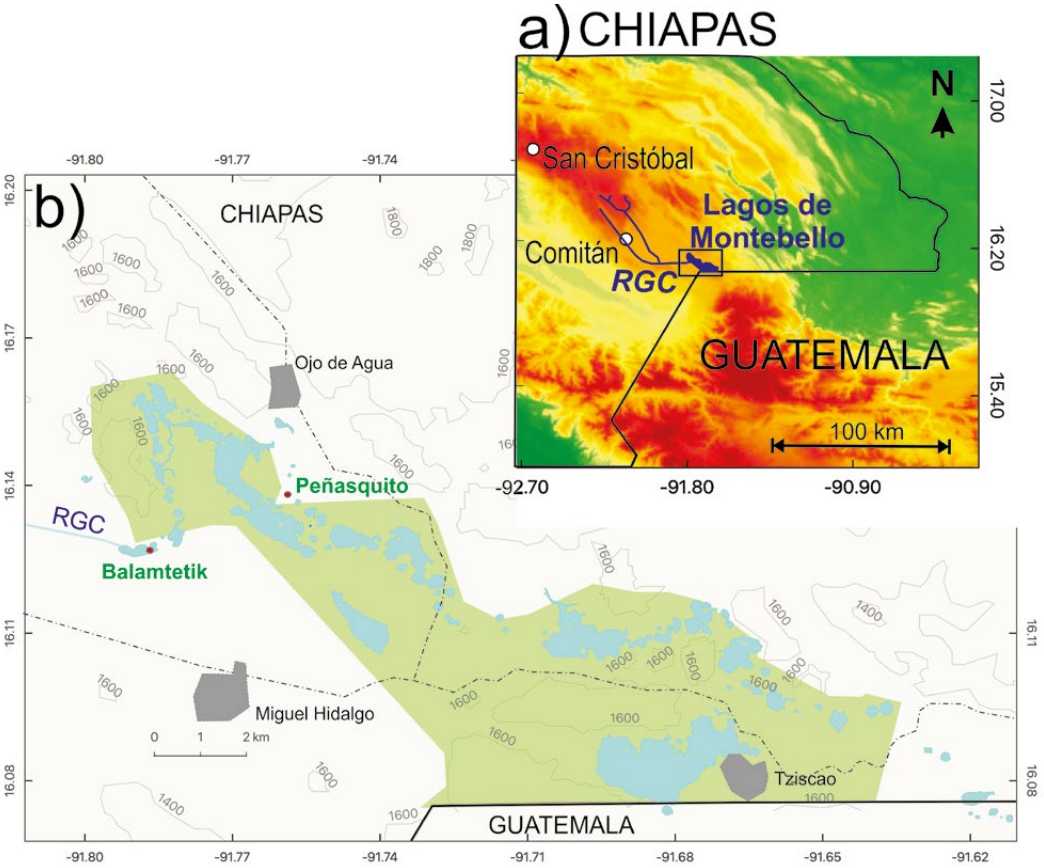


Fig. 18 Mapa de localización de los lagos de Montebello, Chiapas, sur de México. a) Localización del Río Grande de Comitán (RGC) y de la zona lacustre de Montebello. b) Localización del Peñasquito dentro de la zona protegida "Lagos de Montebello" (sombreado verde). Los puntos rojos marcan la localización de las secuencias estudiadas.

Los sedimentos del lago Peñasquito estuvieron constituidos por sedimentos que presentaron tres colores y texturas distintas a lo largo de la secuencia (Peña13GII, 70 cm). En la base (70 – 65 cm) se registraron limos café oscuro, seguidos por limos arenosos grises en la parte media (65 – 8 cm) y limos arenosos gris oscuro a negro en la parte superior (8 – 0 cm) (Fig. 19). La muestra basal de la secuencia se dató mediante 14-C, con lo cual se pudo establecer un modelo de edad sencillo sustentado en dos horizontes de edad conocida, la base de la secuencia, que dató en el año 1956 d.C., y la cima que corresponde con el año de colecta de la secuencia en 2013.

Los datos de titanio (Ti) de Peñasquito indican valores relativamente bajos en la base de la secuencia, que data en 1956 a 1963, incrementándose rápidamente hasta llegar a un máximo a finales de la década de los 1960s e inicios de la década de los 1970s. Posteriormente, los valores oscilan pero se mantienen altos en el resto de la secuencia. Este patrón de valores del Ti sugiere que en la década de 1960 hubo una máxima erosión en la cuenca del lago, muy posiblemente asociada con deforestación. En este lago la erosión ha tenido fluctuaciones, pero se ha mantenido alta hasta el presente. La preservación de diatomeas es continua pero muestra concentraciones mucho más altas hacia la cima de la secuencia, en sedimentos que datan de 2000 al presente, denotando un aumento de productividad y estado trófico del lago. De igual manera, las diatomeas indicadoras de mayor nivel trófico (*A. granulata* y su variedad *angustissima* y *S. meneghinianus*) muestran un claro patrón en el que gradualmente van incrementando su abundancia después del máximo valor de Ti. En particular los valores de *A. granulata* aumentan marcadamente a partir de 2005 (Fig. 19). Este registro confirma algunas de las tendencias ya inferidas por estudios previos en la zona, por ejemplo, que el impacto por erosión y deforestación en los lagos de Montebello data por lo menos de la década de los 1960s. Este registro muestra de forma clara que el incremento en las tasas de erosión estuvo de la mano con el incremento en las especies indicadoras de un elevado nivel trófico, las cuales muestran inicialmente un cambio lento del lago pero que, eventualmente, se llega a un nivel crítico después del año 2005, cuando dominan especies de condiciones eutróficas.

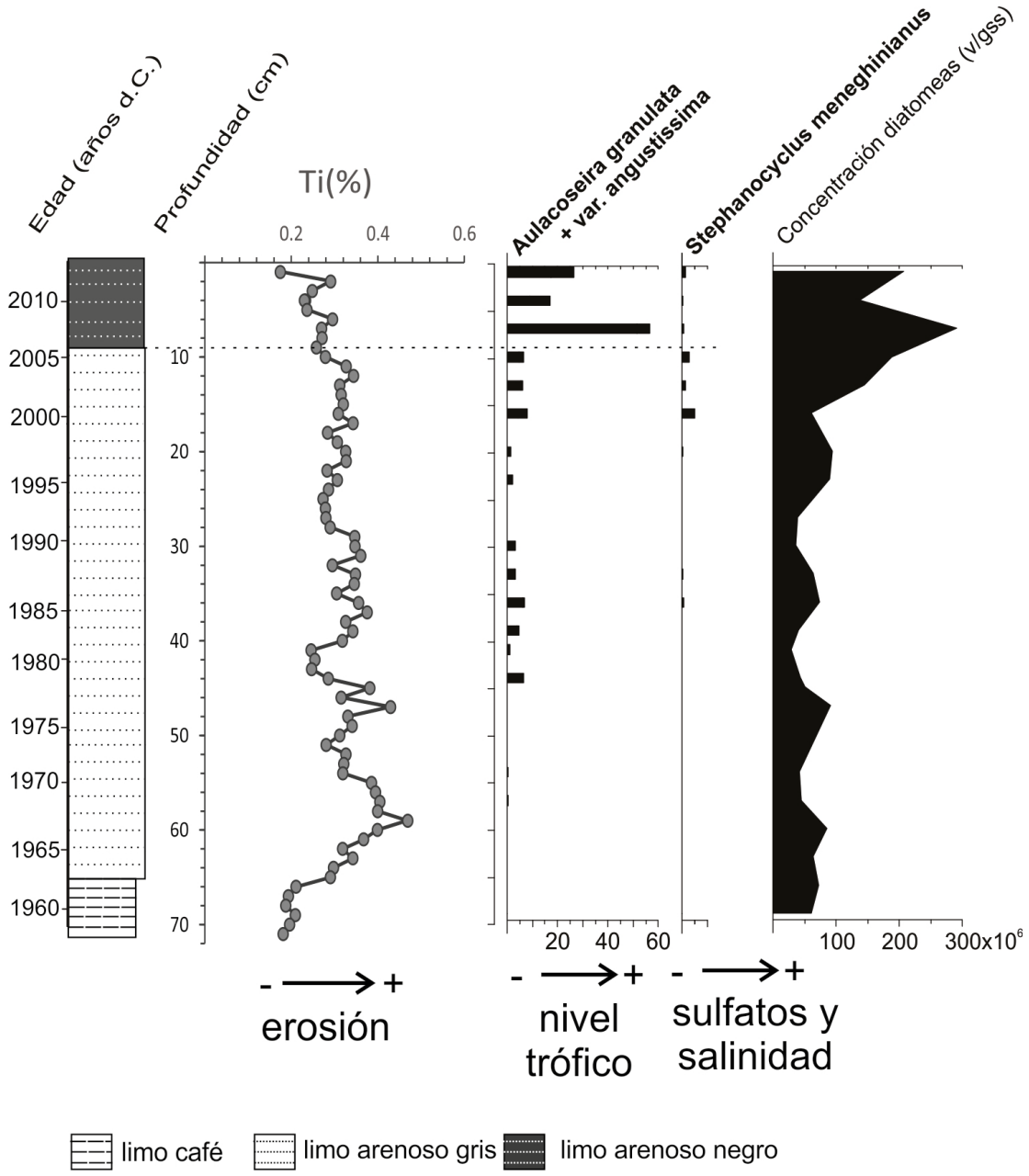


Fig. 19 Determinaciones realizadas en los sedimentos del Lago Peñasquito, Montebello, Chiapas. Se incluyen datos de la estratigrafía, titanio (Ti) y diatomeas de la secuencia sedimentaria Peña13GII de 70 cm de longitud total.

8. Agradecimientos

Proyecto PAPIIT- IV200122.
Apoyo técnico de Rafael Venegas Ferrer y José Antonio González Rangel.

9. Referencias bibliográficas

Alcocer, Javier, Merino-Ibarra, Martín, Oseguera, Luis A, & Escolero, Oscar. (2018). Anthropogenic impacts on tropical karst lakes:"Lagunas de Montebello," Chiapas. *Ecohydrology, 11*(8), e2029.

Avendaño-Villeda, Diana Angélica, Caballero, Margarita, Ortega-Guerrero, Beatriz, Lozano-García, Socorro, & Brown, Erik. (2018). Condiciones ambientales a finales del Estadio Isotópico 6 (EI 6:> 130000 años) en el centro de México: caracterización de una sección de sedimentos laminados proveniente del Lago de Chalco. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 35*(2), 168-178.

Avendaño, Diana, Caballero, Margarita, Ortega-Guerrero, Beatriz, & Lozano-García, Socorro. (2023). Response of diatom assemblages to orbital-and millennial-scale climatic variability since the penultimate glacial maximum in the northern limit of the Neotropics. *Journal of Quaternary Science, 38*(5), 750-766.

Avendaño, Diana, Caballero, Margarita, & Vázquez, Gabriela. (2021). Ecological distribution of Stephanodiscus niagarae Ehrenberg in central Mexico and niche modeling for its last glacial maximum habitat suitability in the Nearctic realm. *Journal of Paleolimnology, 66*(1), 1-14.

Battarbee, R.W. (2000). Paleolimnological approaches to climate change, with special regard to the biological record. *Quaternary Science Reviews, 19*, 107-124. doi:https://doi.org/10.1016/S0277-3791(99)00057-8

Bernal, Juan Pablo, Beramendi Orosco, Laura E, Lugo-Ibarra, Karina C, & Daesslé, Luis Walter. (2010). Revisión a algunos geocronómetros radiométricos aplicables al Cuaternario. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 62*(3), 305-323. doi:https://www.scielo.org.mx/pdf/bsgm/v62n3/v62n3a2.pdf

Caballero, M., Vázquez, G., Alcocer, J., & Mora-Palomino, L. . (2004). Diatom diversity and distribution in neotropical karst lakes under anthropogenic stress. *EGUsphere preprint repository*. doi: https://doi.org/10.5194/egusphere-2024-914

Caballero, Margarita, Lozano-García, Socorro, Ortega-Guerrero, Beatriz, & Correa-Metrio, Alexander. (2019). Quantitative estimates of orbital and millennial scale climatic variability in central Mexico during the last ~ 40,000 years. *Quaternary Science Reviews, 205*, 62-75. doi:https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2018.12.002

Cohen, Andrew S. (2003). *Paleolimnology: The History and Evolution of Lake Systems*. New York: Oxford University Press.

Lozano-García, Socorro, Brown, Erik T, Ortega, Beatriz, Caballero, Margarita, Werne, Josef, Fawcett, Peter J, . . . O'Grady, Ryan. (2017). Perforación profunda en el lago de Chalco: reporte técnico. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 69*(2).

Martínez-Abarca, Rodrigo, Ortega-Guerrero, Beatriz, Lozano-García, Socorro, Caballero, Margarita, Valero-Garcés, Blas, McGee, David, . . . Hodgetts, Alastair GE. (2021). Sedimentary stratigraphy of Lake Chalco (Central Mexico) during its formative stages. *International Journal of Earth Sciences*, 1-21.

Melo, Carlos, & Cervantes, Jorge. (1986). Propuestas para el programa integral de manejo y desarrollo del Parque Nacional Lagunas de Montebello. *Investigaciones geográficas*(16), 9-31. doi:https://doi.org/10.14350/rig.59400

Mora Palomino, Lucy, García, Luis Antonio, Ramos, Yann Rene, Bonifaz, Roberto, & Escolero, Oscar. (2017). Description of chemical changes in a large karstic system: Montebello, Mexico. *Procedia Earth and Planetary Science, 17*, 829-832.

O'Sullivan, Patrick, & Reynolds, Colin S. (2008). *The lakes handbook, volume 1: limnology and limnetic ecology* (Vol. 1): John Wiley & Sons.

Ortega-Guerrero, B., Lozano-García, M.S., Herrera-Hernández, D., Caballero, M., Beramendi Orosco, Laura E., Bernal, Juan Pablo, . . . Avendaño-Villeda, D. (2017). Lithostratigraphy and physical properties of lacustrine sediments of the last ca. 150 kyr from Chalco basin, central México. *Journal of South American Earth Sciences, 79*, 507-524.

Sánchez-Cabeza, J. A. , & Ruiz-Fernández, A. C. (2012). 210Pb sediment radiochronology: an integrated formulation and classification of dating models *Geochim Cosmochim Acta, 82*, 183-200 doi:https://doi.org/10.1016/j.gca.2010.12.024

Schnurrenberger, Douglas, Russell, James, & Kelts, Kerry. (2003). Classification of lacustrine sediments based on sedimentary components. *Journal of Paleolimnology, 29*(2), 141-154. doi:https://link.springer.com/article/10.1023/A:1023270324800

Smol, John P. (2009). *Pollution of lakes and rivers: a paleoenvironmental perspective*: John Wiley & Sons.

Vera-Franco, M., Hernández-Victoria, P., Alcocer, J., Ardiles, V., & Oseguera, L. A. (2015). Concentración y distribución vertical de la clorofila-a fitoplanctónica en los lagos de Montebello, Chiapas. In J. Alcocer, M. Merino-Ibarra, & E. Escobar (Eds.), *Tendencias de Investigación en Limnología Tropical: Perspectivas universitarias en Latinomaérica* (pp. 107-114). México: Asociación Mexicana de Limnología A.C.

White, J. (1990). The use of sediment traps in high-energy environments. *Marine Geophysical Researches, 12*(1), 145-152. doi:https://link.springer.com/article/10.1007/BF00310569

Zolitschka, B., Francus, P., Ojala, A. E. K., & Schimmelmann, A. (2015). Varves in lake sediments–a review. *Quaternary Science Reviews, 117*, 1-41. doi:10.1016/j.quascirev.2015.03.019