



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES IZTACALA

FITOLITOS COMO UNA HERRAMIENTA EN LA RECONSTRUCCIÓN
PALEOAMBIENTAL DEL CUATERNARIO TARDÍO, EN LA ZONA DE LA
LAGUNA DE BABÍCORO, ESTADO DE CHIHUAHUA.

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
B I O L O G O
P R E S E N T A:
N I C O L Á S S Á N C H E Z C R U Z

DIRECTOR DE LA TESIS: ARNULFO REYES MATA
ROBERTO RICO MONTIEL †



IZTACALA

LOS REYES IZTACALA TLALNEPANTLA.

JUNIO, 2007



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Dedicado a mis padres:

Daniel Sánchez Aparicio
Y
Eulalia Cruz Sánchez.

A mis hermanos:

Odilia, Candy, Arnulfo, Karla, Olga, Judith.

A mis sobrinas:

Olin, Aketzalli, Yaretzy.

A todos ellos, que me han permitido formar ese mundo alrededor mío, alcanzando logros como el presente.

A **Roberto Rico Montiel** y **Rosa Laura Linares Hernández**, donde quiera que estén, mis plegarias son para ustedes, aún cuando ha menguado mucho el dolor de su partida, sus recuerdos siguen presentes en mi mente.

AGRADECIMIENTO

A la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA) por la beca otorgada durante la realización del proyecto.

Al Biólogo Arnulfo Reyes Mata por la presión ejercida durante todo este tiempo de trabajo, por la ayuda desinteresada y por la dirección final de este descomunal desorden de datos, así como por el tiempo que convivimos. Gracias Arnulfo.

Al Profesor Roberto Rico Montiel por la confianza depositada, por sus enseñanzas, que incluyeron reconocer a la paleobasura (fitolitos), agradezco también abrirme las puertas de Paleontología que sirvió de refugio para finalizar este trabajo y que no vio concluido. Pero cumplí con el trato, tu me ofrecías trabajo por un tiempo, mientras yo me titulaba, tu partiste y yo termine. Con mucho cariño y extrañándote mucho.

Al Dr. José Ortega Ramírez por la dirección inicial del trabajo, y por las facilidades brindadas durante la elaboración experimental en el Instituto de Geofísica, disculpándome por la tardanza, pero mis conocimientos no eran suficientes y no encontraba el fin.

A Martín Ramírez Pérez por las ilustraciones, querido compañero hasta el momento no he podido agradecerte este y otros muchos favores.

A los revisores de tesis por todas sus sugerencias: Dra. Gloria Vilaclara Faitjo, Biol. Edith López Villafranco, M. en C. Mario Miranda Herrera y al Dr. Sergio Cházaro Olvera.

MI ESPECIAL AGRADECIMIENTO.

Al Lic. Arnulfo Sánchez Cruz y al M. en C. Joel Rodríguez Servín por la corrección ortográfica y redacción del trabajo.

Con sincero cariño a Juana Esther Quijano Pérez, por su compañía.

A mis tíos Margarita, Virgilio, Imelda, Ramiro y Gloria, Andrés y Fulgencio a mis primos y abuelitos.

A mis amigos y compañeros de clase que alentaron el no abandonar este trabajo y que en su momento cada uno a su manera me ha ayudado a terminar la carrera: Pedro, Alfredo, Maribel B., Leonardo, Emma, Juana, Miriam, Luisa, Martha, Sandra, Juan, Martín, Maribel C., Carmen, Elba, Laura, Adrián, Rafael, Raúl, Israel, Karla, Norma, Joaquín, Julián, Eugenia, Israel, Yadira, Erika, gracias por compartir esos momentos y especialmente a Joel, Claudia Argelia y la pequeña Luna, con quienes espero seguir conviviendo.

También aquellos que conocí en mi estancia en Iztacala: Artemisa, Dalia, Álvaro, Víctor Dávila, Cassandra, Oscar, Horacio, Rebeca, Víctor Luqueño, Chacón, Laura Ofelia, Erika R., Abraham, Roberto, Efraín, Martín, Milagros Abigail, José Luis, Verónica, Mayte, Ademar, Maribel, Evelia, Lisset, Mariana, Nadia, Erika, Teresa, así como a María Isabel por las coincidencias y a todos mis alumnos en especial a quien más ha creído en mi Haydeé. También a los integrantes del teatro mágico Pipo's Bar Gracias por su compañía.

ÍNDICE

DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTOS	ii
RESUMEN	vi
INTRODUCCIÓN	1
DEFINICIÓN	1
PRODUCCIÓN DE FITOLITOS EN LAS PLANTAS	3
ABSORCIÓN	3
TRANSPORTE Y PRECIPITACIÓN	4
LIBERACIÓN Y DEPOSITACIÓN	8
REGISTRO TAXONÓMICO DE FITOLITOS	9
SISTEMÁTICA Y MORFOLOGÍA	10
SUBFAMILIAS DE GRAMÍNEAS CON FOTOSÍNTESIS C3 Y C4	15
FITOLITOS COMO FÓSILES	17
OBJETIVO GENERAL	19
OBJETIVOS PARTICULARES	19
ALCANCES	19
JUSTIFICACIÓN	20
ANTECEDENTES	21
ÁREA DE ESTUDIO	24
FISIOGRAFÍA	24
GEOLOGÍA	25
LOCALIZACIÓN	26
CLIMA Y VEGETACIÓN	29
METODOLOGÍA	30
RESULTADOS	34
ANÁLISIS DE RESULTADOS	43
CONCLUSIONES	62
BIBLIOGRAFÍA	64
ANEXO 1	72
ANEXO 2	76

RESUMEN

Los fitolitos son microfósiles de plantas que permiten la reconstrucción de medios ambientes terrestres, aportan información paleoambiental y paleoclimática. Las formas de los fitolitos de ópalo contenidos en los pastos están asociadas a la anatomía de la hoja debido a diferentes rutas fotosintéticas C3 y C4, que son a la vez indicadoras de temperatura y humedad. En el presente trabajo fueron analizadas 56 muestras sedimentarias obtenidas de 3 perfiles estratigráficos (El Cano, Don Beto y El Diablo) de la cuenca de Babícora, Chihuahua. Con la finalidad; de obtener las frecuencias relativas de las formas clasificadas de fitolitos de gramíneas propuesta por Twiss (1980 y 1983). Las muestras sedimentarias se les aplicaron diversos tratamientos para la eliminación de: carbonatos, materia orgánica y arcilla. Así como, la flotación de sílice en un líquido de alta densidad (Politugstato de Sodio), Cada una de las plantillas de cada estrato fue observada en un microscopio óptico Nikon a 400 X. Esquemmatizando los fitolitos encontrados. Se encontró que en promedio los taxa; Chloridoideae se presentan en un 60 %, los Panicoideae en 31 % y Pooideae 9 % en las asociaciones de fitolitos del sedimento. Estas asociaciones indican la existencia de un pastizal dominado por el mecanismo fotosintético C4 conocido como pastizal de grama (*Bouteloua*, *Andropogon e Hilaria*). Los cambios en la composición del pastizal en el tiempo son sólo destellos en los perfiles estratigráficos, sugiriendo una relativa consistencia de la flora desde los 18 000 años AP. Momentos de mayor humedad se distinguen por la abundancia de formas silíceas entre los 18 000 años AP y los 10 000 años AP. Variaciones de climas secos y húmedos durante los 10 000 años AP - 3 000 años AP. Los pastos Chloridoides son más abundantes posiblemente por la marcada aridez en la cobertura de la cuenca durante el reciente periodo de depositación, de los 3 000 años AP al presente.

INTRODUCCIÓN

Definición

Los fitolitos son microfósiles de plantas formados de minerales microscópicos depositados en las plantas, los cuales pueden aportar información paleoambiental y/o arqueobotánica (Rovner, 1971 y 1983; Mulholland y Rapp, 1992), así como información paleoecológica (Piperno, 1988). En otros tiempos se les conoció como fitolitos de ópalo, fitolitos de sílice, células silicatadas, ópalo de las plantas, ópalo biogénico, o simplemente fitolitos (Piperno, 1988).

Smithson (1958) considera que un fitolito implica la parte dura de una planta, solo como partes diminutas de las plantas que ellas mismas secretan. El término podría ser aplicado a cualquier sustancia mineral secretada por una planta, por lo tanto, el carbonato de calcio y el ópalo se consideran fitolitos (Baker, 1959). Así mismo, Lanning (1961) confirma que los fitolitos pueden estar formados de oxalato de calcio, fosfato de calcio y carbonato de calcio (usualmente presentes en forma cristalina, aunque existe algo de calcio amorfo), siendo los más comunes los fitolitos formados de sílice hidratada ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), conocido como sílice amorfo o bien ópalo.

Las plantas absorben elementos químicos que se encuentran en el suelo húmedo en solución, mismos que son depositados en lugares específicos dentro de la planta. Por ello, los fitolitos se definen como depósitos de mineral que se forman dentro y entre las células de las plantas; de tal manera, otras formas de sílice amorfo (ópalo) de otro origen orgánico (como diatomeas, espículas, estomatoquistes u otras formas silíceas de organismos unicelulares), no son considerados como fitolitos (Mulholland y Rapp, 1992).

El sílice es uno de los elementos más abundantes de la Tierra (sólo superado por el oxígeno), constantemente se disuelve y precipita en zonas extensas de la superficie de la Tierra; además, es el mineral más común del medio de crecimiento de las plantas (Miller, 1980), se encuentra disuelto en el suelo húmedo en forma de ácido monosílico ($\text{Si}(\text{OH})_4$).

Los fitolitos de ópalo son diminutos cuerpos de sílice isotrópico (cuerpos que tienen las mismas propiedades físicas, mecánicas u ópticas en todas las direcciones), y han sido precipitados como material de desecho o como refuerzo de la estructura celular (Smithson, 1956 y 1958). Carecen de estructura interna regular, son transparentes, sus índices de refracción son de 1.41 a 1.47, su gravedad específica es de 1,5 a 2,3 (Jones y Beavers, 1963) y el tamaño es variable entre 5 μ hasta 1000 μ .

Estas partículas de minerales sólidos tienen un contorno simétrico bien definido y asumen la forma de la célula que los contiene, conservando la morfología de las células que se silifican (Armitage, 1975); a causa de esto, existen fitolitos de muchas formas y tamaños, ya que hay, muchos tipos y tamaños de células vegetales que suelen silificarse (Lewis, 1981; Bozarth, 1987); así también, poseen características tridimensionales y comúnmente se mueven en el medio de montaje. Debido a todas estas características el diagnóstico microscópico de fitolitos puede ayudarnos a determinar algunos taxa de plantas en particular (Bozarth, 1990).

Los fitolitos de ópalo son más comunes en comparación con los de calcio, por lo que la taxonomía y la sistemática así como las claves y técnicas de aislamiento se centran en los fitolitos de ópalo. Debido a ello, este trabajo se centrará solamente en la determinación de fitolitos de ópalo en especial de las gramíneas. Cabe resaltar que los fitolitos de calcio no han sido estudiados desde el punto de vista paleoecológico pero también pueden ser utilizados en la reconstrucción paleoambiental; además, se encuentran esparcidos en el tejido de numerosas familias botánicas, en las que se depositan comúnmente en la pared celular, recibiendo el nombre de cistolitos, se encuentran en sedimentos y se han recuperado en coprolitos recientes, pero, su estudio se dificulta, ya que, se diluyen fácilmente en ambientes ácidos, (Mulholland y Rapp, 1992).

PRODUCCIÓN DE FITOLITOS EN LAS PLANTAS

Absorción

La formación de fitolitos es común en el reino de las plantas y presentan formas variadas tanto en cantidad como en morfología, también presentan diferencias en su frecuencia, tamaño, distribución, localidad y orientación dentro de la planta. La extensión y el control de la silificación, particularmente, en el tejido maduro está sujeto a diferentes condiciones locales; como el suministro de sílice y el rango de transpiración (Blackman, 1968).

Los fitolitos se componen de sílice amorfo (Yoshida *et. al.*, 1962, Jones y Milne 1963), el cual es un mineral absorbido por las plantas del suelo húmedo (Miller, 1980). Experimentos por McKeague y Cline (1963^a); Siever (1957) y otros han mostrado que el ácido monosílico es la forma como el sílice se encuentra en la solución del suelo, el cual es desionizado y solubilizado. La mayor parte, si no es que todo el sílice es absorbido y disuelto como ácido monosílico (Si(OH)_4) en el interior de las plantas.

El ácido monosílico determina la absorción o desabsorción del sílice. Este es relativamente insoluble en un rango de pH de 5 a 8 el cual es normal en la mayoría de los suelos. Inicialmente es un producto de los minerales silicatados formado por el intemperismo de estos minerales tales como el cuarzo y el feldespato. En climas cálidos y ambientes tropicales húmedos estos procesos de intemperismo se incrementan (Dunne, 1978) aumentando la disponibilidad del sílice (McKeague y Cline, 1963^a) por lo que los suelos tropicales tienen mucho más concentraciones de sílice soluble (Siever, 1957), especialmente en aquellos que son pobremente drenados. Las concentraciones de ácido no se acumulan debido a la lluvia que se la lleva hacia el fondo del perfil del suelo (Dunne, 1978).

Los factores que regulan la concentración de ácido monosílico en los suelos y subsecuentemente en las plantas son: la presencia de fierro y especialmente de óxidos de aluminio ya que son activos absorbentes de sílice (McKeague y Cline, 1963^b); el pH del suelo, también tiene un papel importante; por ejemplo en suelos calcáreos con un pH alto decrece la solubilidad del sílice para la absorción y su disponibilidad para las

plantas; otros factores importantes son la disolución de los fitolitos contenidos en la materia orgánica, la temperatura, la evaporación, la cantidad de agua, la humedad del suelo, la misma materia orgánica, la lixiviación del mineral soluble (Miller, 1980) y la disolución de nitrógeno y fósforo (Piperno, 1988).

En los trabajos de Jones & Handreck (1965), sugieren que el ascenso del sílice en las plantas está controlado por la concentración de sílice en la solución del suelo y por la velocidad de transpiración de la planta misma. Las plantas absorben sílice de la solución del suelo en grandes cantidades si las concentraciones de sílice son altas en el agua del suelo. Parry y Smithson (1964) encontraron que las plantas que se desarrollan en un medio pobre en sílice producen pocos fitolitos.

Transporte y Precipitación

La absorción y el transporte del sílice a través de las plantas sucede por dos vías: 1) el transporte activo del ácido monosilícico que es llevado a cabo por las raíces, a través de la difusión de un soluto no polar (Barber y Shone, 1966). Este tipo de transporte es llevado a cabo independientemente de la cantidad de sílice disuelto siendo más eficiente en los pastos; 2) el transporte pasivo se refiere a la absorción no selectiva y se lleva a cabo en la transpiración estomática. Estos procesos desechan el exceso de sílice dentro de la planta.

La investigación de Jones y Handreck (1965) encontraron que las concentraciones en la solución del suelo son proporcionales a la concentración en la planta y después de 30 a 70 días de crecimiento encontraron que la proporción de sílice en las plantas incrementa progresivamente con la edad. Sin embargo la absorción y el transporte puede ser modificada por numerosos factores abióticos y bióticos.

Los factores que tienen que ver principalmente con la regulación del transporte son: el sílice en el agua del suelo y la transpiración de agua; lo que deja grandes concentraciones de sílice en las plantas sobre todo en los días de alta temperatura (Parry y Smithson, 1964).

Una vez que el sílice se encuentra en la planta en su interior es llevado a las partes superiores a través del Xilema. Dentro de la hoja el ácido monosílico es polimerizado y precipitado como un gel formando depósitos sólidos de dióxido de silicio (SiO_2), estos procesos se relacionan con la transpiración estomática.

La depositación suele atribuirse tanto a mecanismo de transporte activos (Parry *et. al.*, 1984) como pasivo. Commoner y Zucker (1953) proponen un sistema enzimático para la depositación. Este es sintetizado o segregado por algunas células que se producen en sitios específicos de alta polimerización. Esta particularidad va a estar determinada filogenéticamente, la cual finalmente, va a determinar los patrones de distribución del sílice en la planta (Kaufman *et. al.*, 1981; Parry *et. al.*, 1984).

Sangster (1970) considera que en esta catálisis, donde intervienen moléculas orgánicas, existen cambios en el pH después de la formación del ácido polisílico, así como un aumento de su concentración a causa de la evaporación del agua por transpiración (Iler, 1979; Blackman, 1969, Yoshida *et. al.*, 1962). Por otra parte, el proceso de depositación pasiva implica que grandes depositaciones de este material es proporcional a los aumentos de sílice en la planta que conducen a la silificación de la célula (Miller, 1980).

Estos depósitos se le llaman ópalo en analogía al mineral ópalo depositado por procesos geológicos. Una vez que el ópalo o sílice opalina se precipita, es finalmente depositado en el tejido de la planta normalmente en típicas células silificadas (Miller, 1980). Blackman (1969) encontró que las células que se silifican en el transcurso de su ciclo de vida primero pierden su contenido y subsecuentemente son rellenadas pasivamente con un gel de sílice. La degradación del material orgánico en las hojas senescentes proporciona la materia prima para la polimerización del sílice una vez que a ocurrido una lixiviación de otros contenidos celulares (Sangster, 1970).

Yoshida *et. al.*, (1962) Blackman (1969), afirman que existe una restricción en las formas de células silificadas, lo que implica que puede haber un orden por el cual diferentes células “típicas y atípicas” son silificadas, variando con respecto a la edad de la planta y la disponibilidad de sílice. En los pastos, primero se deposita el mineral en las células silificadas normales o “típicas” y subsecuentemente las células “atípicas”.

En las áreas costales de la hoja se lleva a cabo la silificación típica, los nombres morfológicos se basan en la apariencia del contorno; por ejemplo, las formas de “silla de montar”, “dumbellas” (formas de mancuernillas de gimnasta, también llamados bilobulados), “polilobulados” etc.; todas ellas también conocidas como células cortas (fig. 1).

En la silificación atípica son células silificadas del tejido epidérmico que no son ordinariamente utilizadas por las plantas como un depósito de sílice y son las últimas en silificarse, por ejemplo; células largas (longitudinales), las células estomáticas y células buliformes. Este patrón de depositación de sílice es menos común Parry y Smithson (1964); Blackman y Parry (1968); Jones y Handreck (1965) y Sangster (1970) (fig. 1).

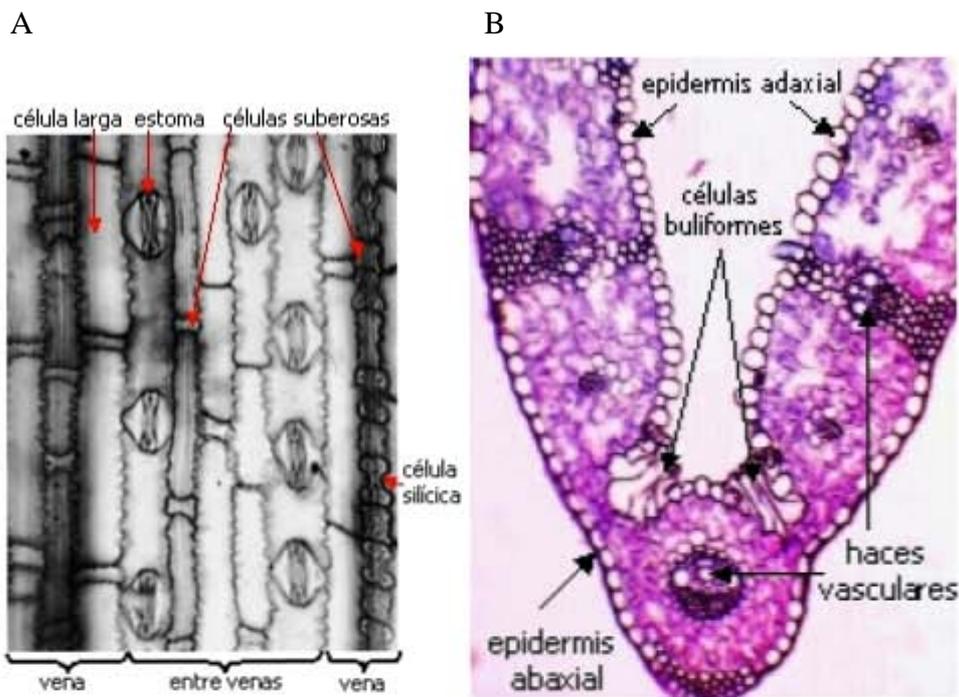


Fig. 1: a) Muestra un corte de la hoja de *Andropogon* donde se observa diferentes tipos celulares así como su silificación, conocidas también como células cortas en la silificación “típica”. b) Muestra un corte transversal de la hoja de *Poa*. La cual distingue a las células Buliformes que tienen la función de bisagra, estas células, los estomas y algunas células largas que se distinguen en la fotografía (a) presentan silificación “atípica”.

Un constante suministro de sílice así como la madures y senescencia de la planta, produce la mayor variedad de fitolitos que han sido precipitados como material de

desecho o como un refuerzo de la estructura celular de algunas plantas (Smithson, 1956, 1958; Baker, 1959). Smithson (1958) reporta que no hay formación de fitolitos en las raíces de las plantas; sin embargo, Pease (1967) encontró la formación de cuerpos de sílice en abundancia en las raíces de varias especies de pastos.

En muchos tipos celulares de las plantas, específicamente dentro de las vacuolas pueden presentar acumulaciones de sustancias inertes (en forma de rafidios, drusas o cristales prismáticos) como: ópalo, oxalato de calcio, cuerpos proteicos, enzimas, gomas aceites y resinas, llamadas en conjunto sustancias ergásticas. (Tejero *et. al.*, 1988).

Baker (1959) menciona que los fitolitos de sílice pueden formarse en diferentes lugares dentro de la planta y no solo en las vacuolas, adquiriendo la forma de la célula o bien de los espacios intersticiales.

Lanning (1961) y Piperno (1988) proponen que los sitios donde lleva a cabo la silificación son: 1) En la pared celular a menudo llamada de silificación, donde las células que se lignifican y silifican son delgadas y frágiles. El sílice depositado forma un forro frágil sobre la célula a manera de ganchillos pilosos, espinas y tricomas, el cual invariablemente se rompe.

2) En el lumen celular donde es rellenado completamente o bien casi completamente, formando replicas mineralizadas de un molde sólido interno de la célula, este depósito generalmente ocurre en una vacuola.

3) En los espacios intersticiales de la planta, así como, cristales extracelulares que no conforman estructuras regulares.

El grado de desarrollo de los fitolitos en las plantas dependerá de factores como el clima, de la naturaleza del suelo, del aumento del agua en el suelo, la edad de la planta y la afinidad genética de la planta a la absorción del sílice. Funcionalmente parece que no contribuye activamente a la respiración de la planta aunque puede afectarla en el uso de otros minerales pesados (Jones y Handreck, 1967).

Las partículas de sílice pueden actuar pasivamente como una estructura de endoesqueleto para prevenir que se marchiten y/o como una defensa de las hojas contra el ataque de insectos y hongos, así como, evitar la herbivoría (Jones y Handreck, 1967; Rovner, 1971, 1983).

Debido a lo anterior los fitolitos presentan una amplia variación morfológica, variación en las asociaciones de partículas dentro de un grupo de plantas, variación entre las partes de una planta y variación entre los miembros de un grupo de plantas (Rovner, 1971, 1983). Por lo tanto, los fitolitos están sujetos a factores de multiplicidad (producción de muchas formas en un taxón) y redundancia (ocurrencia de una forma en muchos taxones) (Rovner, 1971, 1983; Mulholland y Rapp, 1992).

Liberación y Depositación

Los fitolitos formados en los tejidos y células de las plantas vivientes son liberados y depositados por mecanismos de decaimiento *in situ* (Dimbleby, 1978; Piperno, 1988). Existen tres mecanismos por los cuales pueden ser liberados los fitolitos: 1) la descomposición natural del tejido de las plantas que los contienen; 2) como consecuencia de incendios de bosques y pastos y; 3) en el estiércol de animales herbívoros.

Los fitolitos son depositados en la superficie o en el subsuelo junto con la materia orgánica, donde se lleva a cabo la descomposición de las plantas (Baker, 1959; Piperno, 1988). Cuando sucede una descomposición normal, los fitolitos se introducen en las capas de humus incorporándose directamente al suelo produciendo un registro de la vegetación local. Los fitolitos depositados son componentes estables en horizontes de sedimentos (Rovner, 1986) y poseen una consistencia morfológica distintiva. Así mismo, son virtualmente invulnerables a la descomposición en la mayoría de los ambientes de sedimentación y presentan una remarcable durabilidad en el suelo por grandes periodos de tiempo (Carbone, 1977; Piperno, 1988).

Los silicatos de ópalo suelen ser componentes estables en horizontes de sedimentos, sin embargo, son susceptibles a soluciones de pH extremo entre 8.2 y 9.6. Bajo condiciones fuertemente alcalinas los sedimentos formados por conchas no suelen contener fitolitos identificables (Iler, 1979; Lewis, 1981), pero algunos factores parecen aminorar los procesos de disolución; por ejemplo, una cubierta de carbono en la superficie del fitolito podría protegerlo contra condiciones elevadas de pH (Lewis, 1981).

Un alto contenido en aluminio y bajo en agua retrasan la disolución del sílice opalino que constituye a los fitolitos (Bartoli y Wilding, 1980). Los variados procesos fisicoquímicos activos en los suelos y sedimentos afectan el registro fósil de fitolitos, pero, bajo condiciones normales estos pueden sobrevivir largos periodos de tiempo.

También pueden transportarse a grandes distancias por fuego, aire y corrientes de agua. En general, fuertes procesos de erosión introducen fitolitos dentro de la hidrosfera y la atmósfera donde se lleva a cabo este transporte de tal manera que pueden formar tanto asociaciones fósiles autóctonas como alóctonas.

Registro taxonómico de fitolitos

Los fitolitos tienen un significado taxonómico, porque son producidos por muchas familias de plantas superiores. La presencia de los fitolitos han sido reportados en Angiospermas, tanto en Liliópsidas (monocotiledóneas) como en Magnóliopsidas (dicotiledóneas); en las segundas se presentan principalmente en árboles caducifolios (Rovner, 1971), Gimnospermas y Pteridofitas (Piperno, 1988). Las familias más conocidas como acumuladores de cuerpos de sílice identificable son entre otras: Gramíneas hoy conocidas como Poaceas (pastos), Cyperaceas (juncia); Ulmaceas (olmo), Fabáceas o Leguminosas (haba), Cucurbitáceas (calabaza) y Asteráceas o Compuestas (girasol) (Piperno, 1988). Mulholland (1989) afirma que el análisis en detalle de las formas de fitolitos en las familias Poaceas y Cyperaceas puede aportar información significativa no apreciable en otras familias fijadoras de sílice.

Sin embargo, la depositación del sílice no es universal debido a que muchas familias producen poco o nada de fitolitos identificables; por ejemplo, las Pinaceas en general carecen de fitolitos (Piperno, 1988).

Desarrollar una adecuada taxonomía de fitolitos basada en su morfología para su uso en paleobotánica puede ser muy complejo, pero es necesario para ser más eficiente la investigación arqueológica y paleontológica. La mayoría de investigaciones se han concentrado en la taxonomía de las monocotiledóneas, especialmente en la familia de los pastos (gramíneas), dado que en este grupo de plantas es posible un grado taxonómico más preciso (Wilding y Drees, 1974). Las plantas de esta categoría tienden a ser altamente silicios porque producen grandes cantidades de distintas partículas

morfológicas, correspondientemente, ellas tienen un gran potencial para su identificación individual y colectiva, en un contexto paleobotánico (Twiss *et. al.*, 1969; Rovner, 1971, 1983).

El problema taxonómico en la familia de los pastos es la gran cantidad de fitolitos que forman, ya que un solo pasto puede formar una gran cantidad de distintos tipos morfológicos de considerable varianza en cada tipo. La multiplicidad y redundancia hace que no sean aceptadas las subdivisiones de la familia de los pastos (Rovner, 1983).

Sistemática y morfología

Existen dos sistemas de clasificación: el primero tiene como base el método geométrico, donde, a cada fitolito se le trata como una entidad separada, el cual, una vez descrito se le asigna un nombre en latín mostrando la sistemática Lineada, como lo hizo por primera vez Ehrenberg en 1854. Los taxa son descritos únicamente en base a su morfología en donde las formas geométricas se basan en su contorno y las agrupaciones se consideran como parataxa. El método no se esfuerza en identificar a la planta original, pero tiene la ventaja de ser fácil y entendible. Esta forma de clasificar ha sido desarrollada por autores como Deflandre (1963); Twiss, Suess, Smith (1969); Bertoldi de Pomar (1971); Burky (1979); Brown (1984); Locker y Martini (1986); Piperno (1988) y; Mulholland y Rapp (1989).

El segundo método es el anatómico, el cual relaciona los tipos de fitolitos con la anatomía de la planta Pearsall (1979) y Piperno (1984, 1985, 1988) trabajan en la identificación del maíz con cuerpos en forma de cruz, donde, realizan clasificaciones y divisiones primarias que se basan en el tipo celular de los fitolitos en el tejido vivo como: epidermis, células pilosas, bases pilosas y mesófilo (mismos que se silifican más) además de los estomas, esclerenquimas y tejido vascular. Las divisiones secundarias se basan en su morfología donde el método requiere de un gran conocimiento de la anatomía de la planta. Estos avances los han llevado a cabo en muchas familias de plantas tropicales. Piperno (1988) ilustra estas clasificaciones y para monocotiledóneas, menciona que estas formas pueden variar dependiendo de la orientación. (fig. 2).

Brown (1984) sugiere, para las asociaciones de fitolitos recientes y pasados la clasificación del método geométrico basado en la micromorfología discreta de los cuerpos de sílice, como el ideal, para los fitolitos disgregados del material sedimentario ya que es independiente de la orientación de los cuerpos de sílice en las partes vegetativas de la planta de pasto. Enfocándose en las gramíneas, debido a la abundancia en sus registros que finalmente comparó con la flora de Norteamérica. Expandiendo la clasificación hecha por Twiss, Suess y Smith (1969) los nombres morfológicos están basados en la apariencia del contorno, por ejemplo; planos, alargados, de doble contorno, tricomas, de silla de montar, bilobulado o “dumbella”, polilobulados y cruces. Esto permite el estudio de fitolitos para la solución de problemas paleontológicos, que mejoran mucho, al considerar tanto el morfométrico como el anatómico.

En sus avances preliminares Mulholland y Rapp (1992) han resumido diferentes formas de fitolitos considerando su variación de acuerdo a la posición del fitolito (fig. 3).

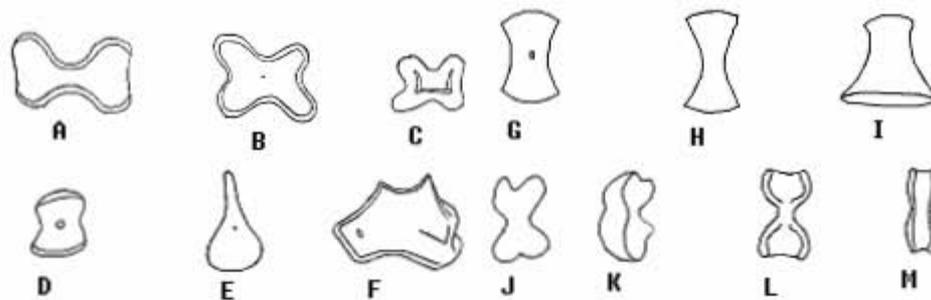


Fig. 2. Fitolitos de Monocotiledóneas de células cortas de los pastos (A-F). Fitolitos en diferentes orientaciones: forma de silla de montar (G-I); forma de cruz (J-K); forma de mancuernillas de gimnasta (bilobulado o dumbella) (L-M) Piperno (1988).

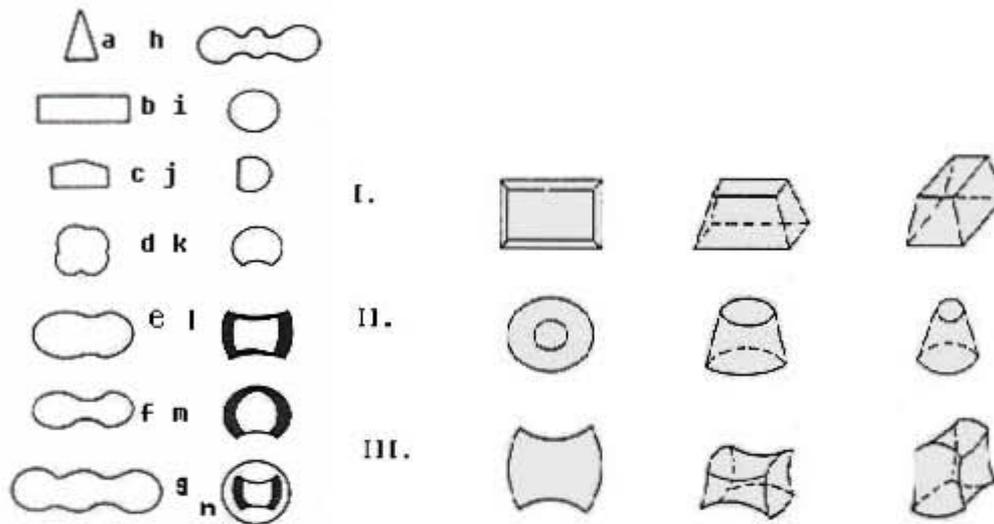


Fig. 3. En la parte izquierda del esquema se muestran los tipos de formas de cuerpos de sílice, que toma en cuenta el contorno de la base en vista planar: triángulo (a); rectángulo (b); pentágono(c); cruz (d); bilobulado sinuoso (e); dumbella regular (f); polilobulado sinuoso (g); dumbella compleja (h); redondos (i-k: completo, plano y dentado); Sillas de montar (l-n: dos bordes cóncavos, un borde cóncavo y sin bordes cóncavos). En la parte derecha se muestra la definición y orientación de cuerpos de sílice de pastos: Rectangular I, Cilindro II. y Silla de montar III, expuestas en vista superior, lateral y terminal fuente: (Mulholland y Raup, 1992).

Twiss (1986) logra una correlación entre estas formas de sílice de pastos, que en conjunto se les conoce como células cortas, ya que están restringidas a gramíneas y presentan diferencias a nivel de Subfamilia, con las rutas fotosintéticas C3 y C4 al relacionarlas con la anatomía de la hoja (fig. 4). Además, esta clasificación permite la interpretación paleoclimática y la reconstrucción ambiental (Mulholland y Raup, 1992).

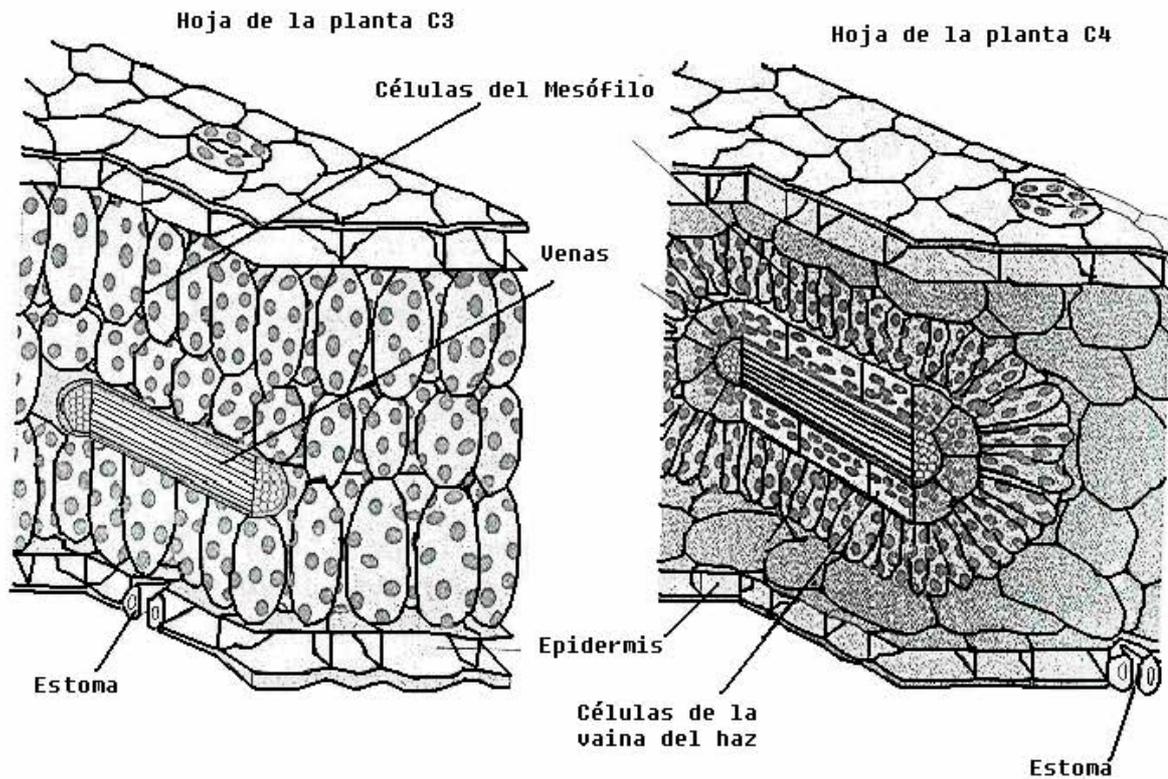


Fig. 4. El esquema muestra cortes de hoja en sección transversal C3 y C4, en donde se observa las diferencias anatómicas más importantes entre las dos plantas. En las plantas C3 las células del mesófilo que contienen los cloroplastos, ocupan la mayor parte de la hoja. Estas células fijan el CO₂ y lo reducen a carbohidratos. Las hojas de las plantas C4 tienen una línea sencilla de células del mesófilo donde se inicia la fijación del CO₂, las cuales, rodean las células del haz de la vaina donde se completa el proceso de fotosíntesis fuente: (Vaclav, 1997).

Las clases propuestas por Twiss (1969,1986) que son de la 1 a la 4 (Pooide, Chloridoide, Panicoide y Alargados, mientras que, las clases 5 y 6 (Abanico y Puntiformes) son de Sase y Kondo (1974), ya que el primero los considera complementarios a su trabajo y son adicionadas como necesarias. Las primeras tres clases son términos regulares para las Subfamilias de pastos: Pooideae (Festucoideae), Eragrostideae (Chloridoideae) y Panicoideae.

Clase 1.- Pooide (Festucoide): Twiss, Suess y Smith (1969): circular, rectangular, elíptico, crenado u oblongo, con doble contorno; trapezoides de Brown (1984); y redondos de Mulholland y Rapp (1989).

Clase 2.- Chloridoide: sillas de montar (Brown, 1984; Mulholland y Rapp. 1989).

Clase 3.- Panicoide: varios tipos de cruces y Dumbellas; bilobulados y polilobulados, y cruces de Brown (1984).

Clase 4.- Alargados: con paredes suaves, sinuosas y espinosas; planos alargados de Brown (1984).

Clase 5.-Abanico: diversas formas poliedricas (Smithson, 1958; Sase y Kondo, 1974).

Clase 6.- Puntiformes: (Sase y Kondo, 1974), tricomas de Brown (1984) (fig. 5).

Clases superiores de fitolitos (Twiss, 1986)

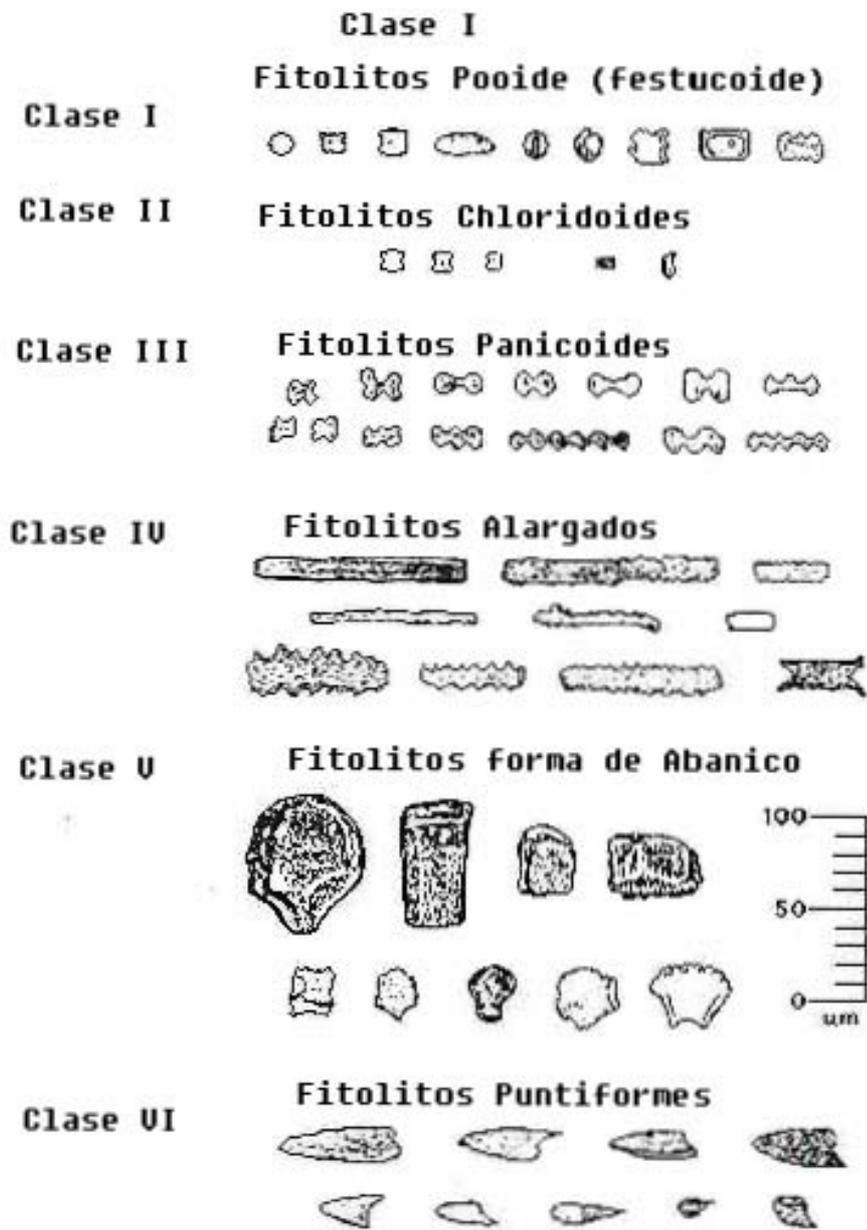


Fig. 5. Muestra las Clases Superiores de fitolitos de pastos, clasificación propuesta por: (Twiss, 1986).

Subfamilias de gramíneas con fotosíntesis C3 y C4

La Subfamilia Pooideae (festucoideae) contiene cerca de 160 géneros que poseen la ruta C3 y cerca de 200 especies distribuidas en dos Supertribus. La Supertribu Poodeae que contiene: tribus Poeae (Festuceae), Seslericae, Aveneae (incluyendo Agrostideae) y Meliceae (incluye Glycerieae). Mientras que, la Supertribu Triticoideae contiene las tribus: Triticeae (Hordeae), Brachypodieae y Bromeae. En la fotosíntesis denominada C3 estos pastos festucoides utilizan el fosfogliceraldehido, azúcar fosfatada de tres carbonos.

En la anatomía de la hoja de las plantas Pooides C3 (fig. 3) las células clorenquimales encierran el haz vascular arreglado irregularmente. Estos pastos son dominantes en las altas elevaciones entre los 2000 m snm. y 3 000 m snm., donde se distribuyen en zonas templadas de latitudes altas del hemisferio Norte y Sur. Fotosintetizan a bajas temperaturas entre los 10° C y los 25° C y florecen en climas de temperaturas frías o durante las estaciones frías. Metabolizan cerca de los 16 mg de CO₂ dm²/hr alrededor de los 22° C de temperatura de la hoja y no fijan el isótopo C¹³ al fijar el carbono, además, son viables donde la humedad del suelo es alta (Twiss, 1986). Brown (1984) dice que el 60% de los pastos son C3, los cuales no son viables donde la temperatura del verano es alta y, son raros o están ausentes en los trópicos de Capricornio y Cáncer donde sólo se encuentran en la parte montañosa de estas zonas (Twiss, 1986).

La Subfamilia Chloridoideae (Eragrostoidae) contiene a las tribus: Chlorideae, Eragrostideae, Sporoboleae, Zoysieae, Pappophoreae, Orcuttiieae, Triodieae y Pommereulleae. Es ciertamente una subfamilia homogénea C4 que también incluye a la tribu Aristideae en la Subfamilia (Twiss, 1986).

Los pastos Chloridoides son plantas C4 que forman ácido oxalacético OAA compuesto de cuatro carbonos para fijar el CO₂. Estos presentan una anatomía especial de la hoja llamada Kranz o Corona donde un grupo de células del clorenquima rodea a una sola línea del haz de doble vaina, las cuales, rodean al haz vascular que se encuentran dentro del mesófilo entre las células del esclerenquima (fig. 3) (Twiss, 1986).

Las plantas de la Subfamilia Chloridoideae fotosintetizan entre los 30° C y los 40° C encontrándose tanto en habitats húmedos como áridos, pero, cerca de la luz brillante en regiones calientes, durante estaciones calidas o clima calido árido. Son dominantes en elevaciones medias, bajas y viables en suelos de humedad baja, fotosintetizan cerca de los 46 mg de CO₂ dm²/hr y alrededor de los 40° C de temperatura en la hoja y al parecer no hacen discriminación alguna a los isótopos de C¹³. Se distribuyen cerca de los trópicos de Cáncer y Capricornio en regiones áridas y semiáridas del mundo, en áreas de altas lluvias estacionales o áreas donde la lluvia es altamente irregular o mas bien baja. Abundan en las sabanas o pastizales abiertos (Twiss, 1986).

Los Chloridoides toleran mejor los extremos de sequía y calor o donde las precipitaciones se dan en verano, o bien, no existe distinción en el periodo de lluvias, donde, la temperatura del mes más frío es superior a los 10° C (Twiss, 1986).

La Subfamilia Panicoideae, Formada por dos supertribus: Andropogonodae y Panicodae e incluyen tanto rutas C3 como C4. El genero Panicum contiene 104 especies C3 y 137 especies C4. Los generos Alloteropsis y Neurachne, tienen ambas rutas fotosintéticas, pero cerca de la mitad de las especies de la supertribu Panicoideae son C3 (Twiss, 1986).

Los pastos Panicoides son tanto C3 como C4 y por lo tanto pueden tener o no Anatomía Kranz en la hoja. Se encuentran concentrados en los trópicos y subtrópicos donde son favorecidos por temperaturas calidas y la alta humedad en verano. No son comunes por encima de los 40° de latitud con pocas especies en las regiones áridas (Twiss, 1986).

Fitolitos como fósiles

Los fitolitos pueden considerarse un modelo idealizado de un sistema fósil paleobotánico debido a sus características y propiedades como: a) su origen biogénico es decir, que se mineralizan cuando las plantas viven; b) por su tamaño, varía entre 1μ a $1\ 000\mu$ pero las fracciones de mayor abundancia se encuentran entre las 20μ y 50μ , lo que corresponde al 10 % del total de fitolitos en el suelo (Wilding y Dress, 1971). Además existen depósitos entre 60 y 70 Millones de años en rocas Paleocénicas hasta la actualidad que contienen fitolitos con diferentes grados de desgaste físico/químico (Jones, 1964; Rovner, 1983).

Debido a esto, se supone una alternativa para la obtención de información paleoambiental o bien de secuencias paleoclimáticas de un sitio en específico, mediante la evaluación de asociaciones de fitolitos de ópalo, como indicadores paleoecológicos (Rovner, 1983).

Carbone (1977) afirma que este complemento nos ayudará a comprender los cambios en la información paleoambiental, sobre todo, en lugares continentales donde las condiciones aluviales ofrecen una aproximación alternativa al análisis del polen en la reconstrucción vegetacional. Como se sabe, el polen solo es producido por las flores y es parte del proceso reproductivo. Este es fácilmente transportado por el viento o los insectos dando un registro de la vegetación regional, pero debido a su morfología no es fácil de identificar a un nivel taxonómico por debajo de Gramineae (Twiss, 1986).

Los fitolitos en contraparte son producidos por toda la planta y al ser depositados directamente al suelo, ofrecen un registro de la vegetación local (Rovner, 1983, 1986^a) lo que favorece la comprensión taxonómica.

Una reconstrucción vegetacional es posible, al identificando tipos específicos de plantas con tipos específicos de fitolitos, así como, una metodología que permita aislarlos de la matriz del suelo para obtener un espectro de fitolitos derivados del total poblacional de una localidad en particular.

Por lo anterior, se requiere caracterizar a las comunidades vegetacionales modernas, describiendo las asociaciones de fitolitos encontrados en el Horizonte A del suelo, con

el fin de obtener un grafica de frecuencia acumulativa de los diferentes tipos de fitolitos. Este espectro describiría a la comunidad vegetal con las que se compararían las asociaciones de fitolitos fósiles (Carbone, 1977).

Las ventajas que ofrecen los fitolitos de ópalo solo es posible en pastos (Gramineae) ya que estos son indicadores de diagnostico paleoambiental (Twiss, 1986).

Al utilizar a las asociaciones de fitolitos en la reconstrucción paleoambiental los factores de error se pueden dar por: la erosión, por el transporte de agua, (corrientes que lavan el contenido de fitolitos fracturándolos y desgastándolos) (Baker, 1959); por el movimiento vertical de partículas en el suelo (Pearsall, 1979); por la percolación de fitolitos (Starna y Kane, 1983); común en vertisoles (Rovner, 1986b); así como, por los suelos ácidos Podzoles (Jones y Beavers, 1964).

Las asociaciones de fitolitos permiten también distinguir las fluctuaciones de temperatura media anual. Livingstone y Clayton (1980) indican que la localización altitudinal de los pastos panicoide y festucoide migran verticalmente como una función directa de los cambios de la media anual de temperatura con una sensibilidad de +/- 1° C. Twiss *et. al.*, (1969) sugieren que las clases Festucoide, Chloridoide y Panicoide son indicadores de temperatura y humedad.

OBJETIVO GENERAL

Reconstruir el paleoambiente del Cuaternario tardío de la cuenca de Babícora Chihuahua, utilizando las asociaciones de fitolitos en sus depósitos lacustres.

OBJETIVOS PARTICULARES

- Obtener las asociaciones de fitolitos que se depositaron a través del tiempo en relación con su profundidad de los perfiles estratigráficos.
- Determinar al nivel taxonómico mas bajo posible a los fitolitos recuperados de los sedimentos.
- Determinar la secuencia de eventos ambientales a partir de la correlación de perfiles estratigraficos.
- Determinar la serie de cambios ambientales que permita la reconstrucción paleoambiental.

ALCANCES

- Desarrollar un registro de las asociaciones de fitolitos, que se puedan caracterizar con modernas asociaciones vegetales. Así como, antecedentes de cambio climático y ambiental para el Cuaternario tardío en Chihuahua, noroeste de México.
- Contribuir al análisis de partículas de sílice, en especial los fitolitos como herramienta para el estudio del Cuaternario Tardío.
- Este trabajo es el primero en utilizar a los fitolitos en la reconstrucción paleoambiental en el noroeste de México.

JUSTIFICACIÓN

La cuenca de Babícora en el estado de Chihuahua al Noroeste de México, ha estado sujeta a cambios en el transcurso del tiempo, particularmente las ocurridas durante la última deglaciación, se han dado cambios en la vegetación, en la estacionalidad de las lluvias, en la temperatura, en el nivel lacustre y en su dinámica fluvial. La manera de inferir estas transformaciones es por medio de estudios multidisciplinarios de reconstrucción paleoambiental. Éstos aportan elementos que permiten precisar la temporalidad y la variabilidad natural del sistema terrestre, proporcionando marcos de referencia, con los que se compara con el ambiente actual; de esta manera se puede determinar si el cambio de las condiciones ambientales actuales son debidas a la influencia puramente antropogénica, o si son el resultado de procesos naturales. Por tal razón, se debe de incrementar los estudios de reconstrucción paleoambiental y la base de éste es el conocimiento paleoclimático, más en nuestro país, donde son insuficientes, principalmente en el periodo más reciente de la Tierra, el Cuaternario (Pleistoceno/Holoceno). Dichos estudios permiten mejorar el conocimiento acerca de las causas del cambio climático global y así caracterizar regiones vulnerables ante dicho cambio.

Por otra parte los fitolitos son una excelente herramienta para la reconstrucción de ambientes terrestres pasados y su análisis requiere cubrir un gran número de áreas: aspectos botánicos, aspectos edáficos y algunos aspectos fundamentales de paleoecología y paleontología.

ANTECEDENTES

Los fitolitos han sido reconocidos desde los inicios del microscopio; Loeuwenhock observó fitolitos de calcio en 1675. Charles Darwin en 1830 colectó muestras de polvo en su recorrido por el mundo y los envió al microbiólogo germano C. G. Ehrenberg, quien da una descripción sistemática de fitolitos de plantas por un lado y de fitolitos en sedimentos por otro (1836 en Baker, 1959). Ehrenberg consideró estos cuerpos como esqueletos de microorganismos vivientes dentro de las plantas; sin embargo, para 1866 reconoció que algunas formas fueron tejidos mineralizados de plantas. Baker (1959) reporta que Ruprecht definió el término fitolito (1866) como cuerpos de ópalo microscópico depositado en plantas.

Las investigaciones posteriores de fitolitos se centran en el papel de éstos en la fisiología y anatomía de plantas, emprendidas alrededor de 1900, así como, sus aplicaciones en la agronomía. En 1930 se estudia la distribución de los fitolitos de calcio (Rovner, 1983; Piperno, 1988).

El análisis de suelo y/o sedimento y su contenido de fitolitos ha sido aplicado a numerosos problemas; por ejemplo, los investigadores pioneros enfocaron sus trabajos en la reconstrucción de macro y microambientes, patrones dietéticos de animales y humanos, otras utilidades de las plantas con fines no-dietéticos, orígenes de la agricultura, otros estudios, evidencian la tecnología agrícola, la evolución de la vegetación en la transición de pradera-bosque, zonas de sucesión climática, datación absoluta. El valor del análisis de fitolitos ha sido documentado por algún tiempo en otras disciplinas, muchas allegadas con la Arqueología en investigaciones multidisciplinarias.

Pearsall (1979); Rovner (1983) y Piperno (1985) consideran que los fitolitos son microfósiles utilizados para la reconstrucción paleoambiental; así también, el estudio de los fitolitos podría ser utilizado como una alternativa en la reconstrucción de la vegetación (Carbone, 1977), e indirectamente en la reconstrucción paleoclimática (Rovner, 1983; Piperno, 1988).

Los estudios paleoecológicos y las reconstrucciones paleoambientales han sido aplicados en sedimentos de la era glaciaria (Twiss, Suess y Smith, 1969), también en sedimentos recientes utilizando microscopía electrónica (Jones y Beavers, 1964; Wilding y Drees, 1973). Así mismo, se han utilizado para identificar horizontes de paleosuelos (Dormaar y Lutwick, 1969). Helbaek (1969) se apoya en el estudio de materiales etnobotánicos para mostrar la evolución de la agricultura. Muestras de sedimentos oceánicos han proporcionado información de paleoambientes, incluyendo la dirección de los vientos (Melia, 1980; Bukry, 1980). Carbone (1977) interpretó ambientes pasados, la mayoría bosques, por comparación con horizontes modernos. Se han registrado en el análisis de coprolitos fitolitos atribuidos a cactus o agaves (Bryant, 1974).

La mayoría de los estudios analizan suelos modernos para tener un registro cuantificado de las asociaciones de fitolitos de diferentes ambientes terrestres; estos datos están siendo aplicados a paleosuelos y suelos (Jones *et. al.*, 1963). Otros estudios se han enfocado a los procesos de depositación (Sangster y Parry, 1981), es decir, a la función del sílice en las plantas como una estructura anatómica (Kaufman, *et. al.*, 1981). Estos estudios se apoyan en la exploración con microscopio electrónico para el estudio del tejido epidérmico (Hayward y Parry 1980; Mulholland y Rapp, 1992).

Numerosas especies de plantas han sido examinadas en la zona ecuatorial (Pearsall, 1978, 1979), en Hawái (Pearsall y Trimble, 1984), en Panamá (Piperno, 1984, 1985) y en el centro de Estados Unidos (Brown, 1984; Mulholland y Rapp, 1992). Otros estudios se enfocan en la investigación de cultivos incluido el maíz (Pearsall, 1978; Piperno, 1984), arroz (Fujiwara, Jonea y Brockwell, 1985) y varios cereales del viejo mundo (Helbaek, 1961; Rosen, 1987),

En la actualidad el estudio de los fitolitos se lleva a cabo en dos líneas de investigación: 1) Sistemática de fitolitos de plantas modernas, la descripción de las formas y distribución del registro en el Reino de las plantas y 2) El área más crucial es la sistemática de los restos, así como, la interpretación de los fitolitos recuperados desde los sedimentos, suelos y paleosuelos. Una gran parte de la información sobre producción y distribución de los fitolitos de ópalo ha sido generada en las dos últimas

décadas como resultado de estudios arqueológico y paleoecológicos (Mulholland y Rapp, 1992).

El nivel para los taxa de plantas que pueden ser identificados por fitolitos es una de las principales áreas de investigación. La mayoría de las investigaciones recientes se han enfocado en la sistemática de fitolitos de ópalo, restando importancia a los fitolitos de calcio, aunque en los últimos años ha aumentado considerablemente los trabajos sobre éstos (Mulholland y Rapp, 1992).

En México, Vallejo (2002) realizó un análisis de fitolitos en suelos y paleosuelos, debido a que sólo se habían estudiado en suelos modernos en los trabajos de García (1984, *et. al.*, 1996), así como, estudios en sitios arqueológicos (Zurita, 1987; McClung *et. al.*, 1986, 1996 y 2001). Zúñiga (1984) realiza un trabajo sobre la transición bosque-pastizal en base al análisis de fitolitos. Todos estos trabajos fueron realizados en la zona del Valle de México y son pioneros en el estudio de fitolitos en México. La falta de la formalización de la sistemática de fitolitos y de los métodos de obtención, ha dificultado el avance, sobre todo en el análisis paleoambiental y paleoclimático. Debido a su importancia es necesario extender dichos análisis.

Estudios previos de los paleoambientes holocenos de la Laguna de Babícora Chihuahua, México.

La Laguna de Babícora ha sido estudiada en varios aspectos: sedimentológico (Ortega, 1990, 1995^a), micropaleontológico y paleomagnético (Urrutia *et. al.*, 1997). En base a estos estudios se tiene que durante el Pleistoceno tardío prevalecieron en la región ambientes húmedos; durante el Holoceno temprano las condiciones de humedad efectiva eran aún importantes; en el Holoceno medio se caracteriza por condiciones de aridez y, finalmente, en el Holoceno tardío al presente se infieren variaciones de humedad efectiva dentro de un régimen generalizado de aridez, que caracteriza la región en nuestros días. Ortega (1995^a, 1995^b) a partir de los trabajos de reconstrucción de paleoambientes desde el Wisconsiniano tardío hasta el presente, concluye la siguiente cronología paleoambiental:

1. De 18 000 años AP*. a 10 000 años AP. Un ambiente pluvial u óptimo lacustre. Un régimen de lluvias centradas en el invierno durante el Wisconsiniano tardío
2. De 10 000 años AP. a 6 000 años AP. Disminución de la precipitación y aumento de la temperatura; los ambientes son de tipo pantanoso.
3. De 6 000 años AP. a 3 000 años AP. Las condiciones áridas persisten; sin embargo, las estructuras, la morfología y la sedimentología de los depósitos fluviales sugieren precipitaciones ocasionales abundantes.
4. De 3 000 años AP. al presente. Se instalan las condiciones semiáridas que caracterizan a la región, Régimen de lluvias centradas en verano durante esta fase del Holoceno.

***AP.** Años antes del presente

ÁREA DE ESTUDIO

Fisiografía

La provincia fisiográfica de la Sierra Madre Occidental es una estructura montañosa que forma la parte noroeste de la República Mexicana. Esta provincia ha recibido diferentes nombres: Altiplanicie Mexicana Septentrional, Mesa Central Septentrional, Llanuras Boreales, Meseta Central del Norte o Región de los Bolsones. Ortega (1990) consideran la parte noroeste de México como una prolongación de la provincia fisiográfica de “Basin and Ranges” de la parte suroeste de los Estados Unidos.

La provincia está constituida de una serie de plataformas, montañas, valles y cuencas; pero, el norte de Chihuahua presenta dos complejos geomórficos: a) las cuencas, presentan una pradera continua, la cual es interrumpida por pequeñas cadenas montañosas paralelas, estas se elevan por encima del piso de las cuencas como “islas fuera de la mar” y; b) la Sierra Occidental, que presenta una gran plataforma de rocas extrusivas que tienen una depresión estructural estrecha en el nornoroeste-sursuroeste entre los bordes ligeros, las mesas y las plataformas menores, que están segmentadas por los desfiladeros profundos hacia las tierras bajas del Pacífico.

La porción de la Sierra Madre Occidental que se encuentra dentro del estado de Chihuahua, presenta características morfológicas particulares por lo que se le subdividió en subprovincias: “Basins” al noreste del estado, la de “Basin and Ranges” en la parte central y la subprovincia de “Babícora-Bustillos”. Esta última se caracteriza por una serie de cuencas endorreicas a la que pertenece la cuenca de la laguna de Babícora que se sitúa a una altitud de alrededor de 2160 m snm.

El origen de la cuenca está relacionado con los fenómenos compresivos del Paleoceno y distensivo del Neogeno. En el margen noroeste del Océano Pacífico, la fase distensiva ha sido responsable de las estructuras de tipo horst y graben que caracterizan la provincia geomorfológica de “Basin and Ranges” del suroeste de los Estados Unidos y gran parte de la Sierra Madre Occidental (Ortega, 1990).

Geología

La región que ocupa la laguna de Babícora corresponde a un graben; los pilares tectónicos o horts que la rodean están formadas de roca riolíticas con intercalaciones de andesitas, ignimbritas y tobas riolíticas, y en la cima se presentan conglomerados y derrames de lavas basálticas. Las vertientes que la rodean presentan en las partes más elevadas pendientes de 40° y de 15° en el contacto con la planicie; la altura media es de 2 000 m snm. (Ortega, 1990).

En la secuencia litológica expuesta en la zona se han reconocido tres episodios de volcanismo cenozoico: el primero o más antiguo, representado por ignimbritas de edad Oligoceno, el segundo por grandes espesores de ignimbritas y tobas, el tercero o más reciente, por una serie volcánica constituida con la base por andesitas basálticas y en la cima por basaltos que constituyen la parte terminal de la secuencia litológica. (Ortega, 1995^a).

Las fallas principales que delimitan la cuenca están orientadas al norte-noroeste y sur-suroeste, separadas por una distancia aproximada de 25 Km. y con un desplazamiento cercano a 35 km.

Las características tectónicas, estructurales y sedimentarias de la región, produjeron el asolvamiento de la cuenca y consecuentemente, las variaciones horizontales del cuerpo lacustre. Esto explica que no se observen en la actualidad terrazas lacustres y/o líneas de playa (Ortega, 1995^a).

La vertiente este es más inclinada (de 20° a 30°) que la vertiente oeste. La primera contiene una red hidrográfica bien desarrollada pero de corta extensión. El contacto con la planicie está marcado por varios abanicos aluviales de textura gruesa. La segunda vertiente es menos inclinada (de 10° a 15°). La red hidrográfica es menos densa y más desarrollada, drenando superficies más extensas que la margen este, y el contacto con la planicie se caracteriza por depósitos fluviales.

En las partes terminales de la cuenca se encuentran pequeños valles de origen estructural (valles de falla), con fondos planos recorridos por causes fluviales de tipo

meándrico, los cuales probablemente indiquen fenómenos de hundimiento o de reajuste (Ortega, 1995^b).

En la parte central de la planicie se encuentra una zona pantanosa de aproximadamente 10 km de diámetro, en ésta, los sondeos del subsuelo reportan espesores de sedimentos no consolidados de hasta 350 m.

Las formaciones superficiales identificadas dentro de la cuenca están representados por depósitos fluviales, lacustres y alteritas, mismos que nos permiten afirmar que los procesos morfodinámicos durante el último periodo interglaciar fueron más activos que en la actualidad. En ella se observa la formación de arroyos, fenómenos de deflación y suelos poco evolucionados producto de la escasa precipitación (400 mm/año en promedio) y a la falta de cubierta vegetal durante la mayor parte del año (Ortega, 1995^b).

Localización.

El desierto de Chihuahua es uno de los más grandes de América del Norte, ocupa una superficie de 355,000 km² y abarca parte de los estados de Chihuahua, Coahuila y Durango en México, así como, los estados de Texas, Arizona y Nuevo Mexico, en los Estados Unidos. (Grünberger, 2004).

La región de estudio se encuentra dentro del gran desierto Chihuahuense, a una distancia aproximada de 78 km en línea recta hacia el Noroeste de la capital del estado. La laguna de Babícora se localiza entre los 29°15' – 29°30' de latitud norte y entre los 107°40' – 108°00' de longitud oeste, donde ocupa una cuenca de intermontaña. La laguna se extiende sobre una longitud de 65 km orientada al noroeste/suroeste y sobre una longitud de 40 Km; su superficie es de 437 km² y se encuentra a una altitud promedio de 2 160 m snm. Las estructuras montañosas que la rodean alcanzan 3 100 m snm. (fig. 6 y 7).

La laguna de Babícora esta limitada al norte por la “Sierra de Chalchihuites” (2245 m snm.) y el “Cerro el Sombrerillo” (2408 m snm.); al sursuroeste por la “Sierra de la Cebolla”, el “Cerro de la Copa” y el “Cerro del Venado”, donde las altitudes varían

entre 2 500 m snm. y 2 700 m snm.; al oeste por la línea del parte aguas de la estructura principal de la Sierra Madre Occidental, en este punto, tiene una altitud media de 2 700 m snm. y al este su límite es la “Sierra Grande” donde la altura varia alrededor de 3 000 m snm. (fig. 6 y 7).



Fig. 6. Muestra la ubicación de la Laguna de Babicora dentro de la Republica Mexicana en el estado de Chihuahua, municipio de Gómez Farías.

Los paleoambientes de la Laguna de Babicora, Chih., México.

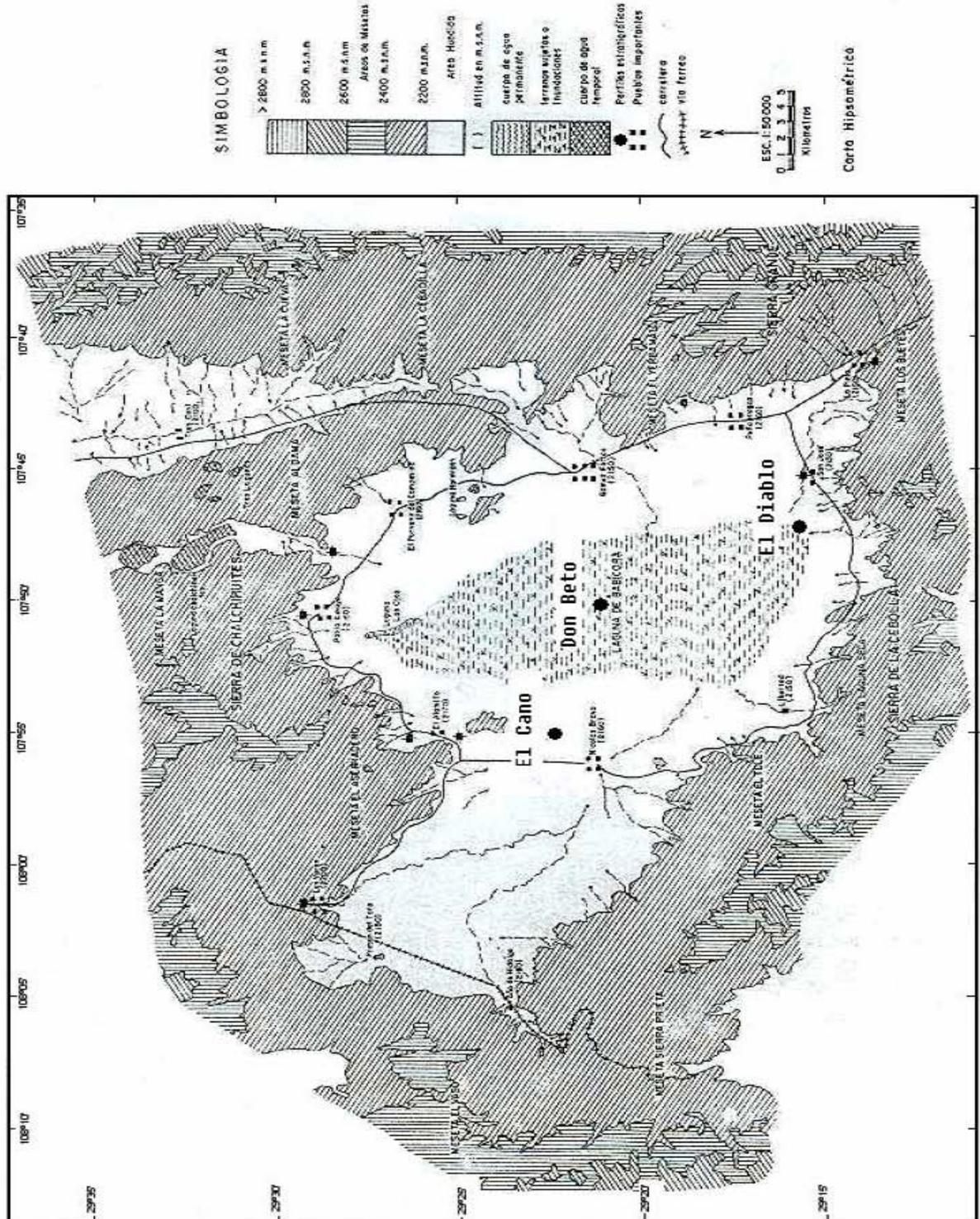


Fig. 7. Carta hipsométrica de la región fuente: Ortega (1995).

Clima y Vegetación.

La región de estudio por su posición geográfica y topográfica, pertenece al dominio climático semifrío continental (García, 1973), con su particular vínculo a su carácter montañoso y con características semiáridas.

La repartición anual de las precipitaciones, esta determinada a partir del registro de tres estaciones meteorológicas que se encuentran en Gómez Farias, San José Babícora y las Varas. Para el periodo de 1971-1980 variaron de 300 mm a 500 mm /anuales, con un máximo de precipitación en julio a septiembre por lo que se considera que es de tipo semiárido. Las temperaturas medias anuales de 13° C a 18° C, presentan variaciones térmicas muy amplias entre el día y la noche, lo cual produce fenómenos de termoclastismo. También se tiene un gradiente climático que varía de C(w1)(w)(b)(e') en San José Babícora, Bwhw''(e) en Las Varas y BWhw(e') en Moctezuma (Índice de Köpen modificado por García, 1973).

El carácter montañoso de la región que rodea a la cuenca ocasiona una estratificación de la vegetación, misma que varía en función de la altitud:

1. Bosque de coníferas entre los 2 800 m snm y los 2 400 m snm.
2. Bosque mixto de pino-encino entre los 2 400 m snm y los 2 200 m snm, el cual a medida que desciende se transforma en un bosque más abierto contenido principalmente poblaciones de Juníperos y de gramíneas.
3. El pastizal es la comunidad vegetal más importantes entre los 2 200 m snm y los 2 160 m snm. Esta es seguida hacia las partes sujetas a inundaciones, por vegetación de tipo subacuática (Ortega, 1995).

METODOLOGÍA.

La metodología para la separación de fitolitos de la matriz del suelo, se basa en los trabajos de Powers y Gilbertson (1987); Piperno (1988); Mulholland y Rapp (1992). Debido a que la proporción de fitolitos en el suelo o sedimento es extremadamente pequeña, estos deben separarse de la fracción fina (entre las 5 μ y las 50 μ aproximadamente) donde están presentes.

1. Se tomaron 56 muestras de 1 a 2 kg de sedimento para su tratamiento en laboratorio, de tres perfiles estratigráficos distribuidos en la cuenca de la Laguna de Babícora (Fig. 7). En el perfil El Cano se colectaron 18 muestras, 14 en el perfil Don Beto y 24 en el perfil El Diablo. Se muestreo las diferentes unidades sedimentarias con base en los criterios sedimentológicos y estratigráficos, de donde se obtuvieron las muestras de sedimento. Para el presente trabajo el Dr. José Ortega del Instituto de Geofísica proporciono las muestras y los diagramas de los perfiles (fig. 8).

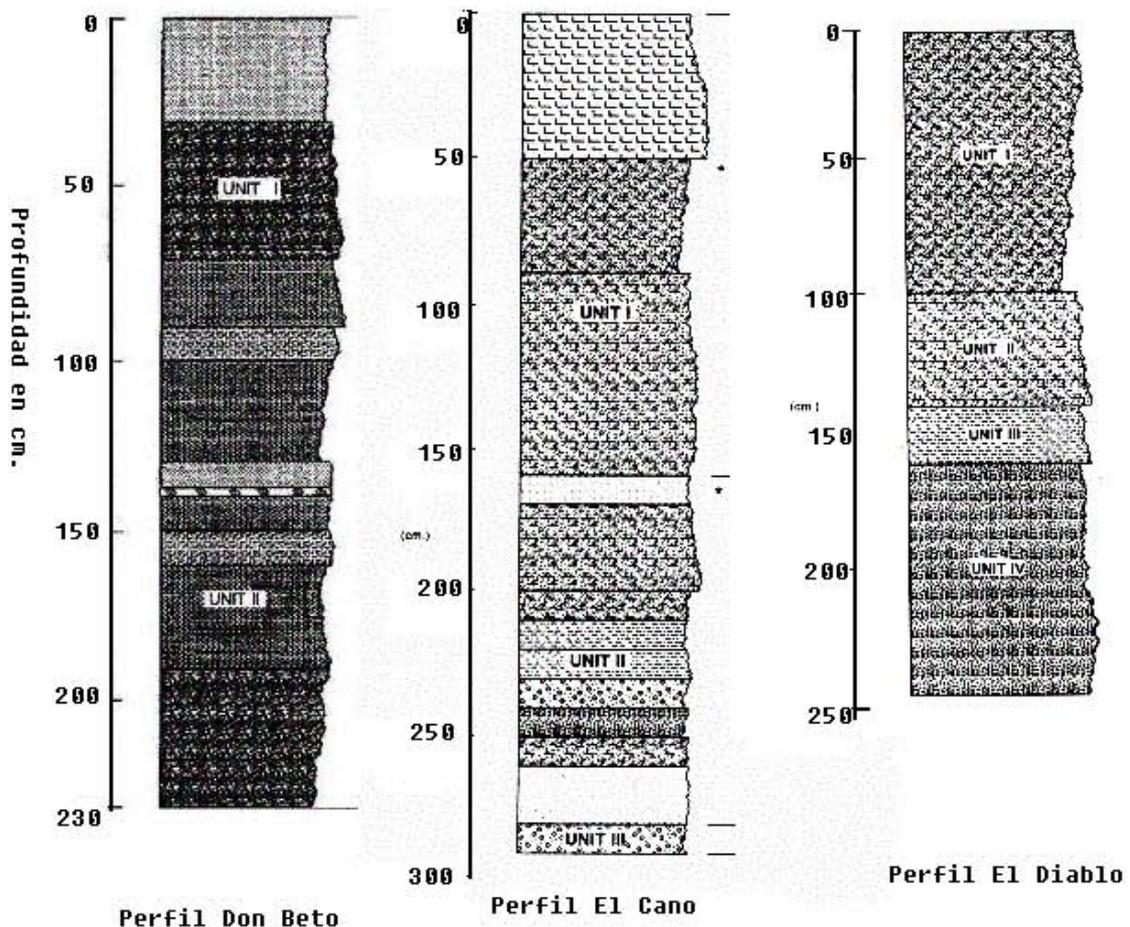


Figura 8. Muestra los tres perfiles estratigráficos realizados por Ortega (1990, 1995^a, 1995^b)

2. Cada una de las muestras se sometió a un cuarteo con el objeto de obtener la cantidad representativa de la población de fitolitos.
3. Defloculación de la muestra. Se pesaron 50 gr de suelo (inicialmente) para saber cuanto material siliceo se recuperaba al final del proceso. Posteriormente se redujo a 25 gr ya que con esta cantidad fue suficiente para obtener una apreciable cantidad de partículas finas y por ende de fitolitos. Esto supone una reducción en la cantidad de material procesado y consecuentemente una reducción de los reactivos utilizados. Los 25 gr se colocaron en vasos de precipitados, se agregó una solución de Hexametáfosfato de sodio (110gr/1 000 ml) y se agitó la muestra en un agitador automático durante 8 a 12 horas.
4. La separación de la fracción arenosa se realizó por tamizado en húmedo con un tamiz de malla del número 270 y apertura de malla de 0.53 mm, separándose las partículas mayores a los 53 μm de diámetro que corresponde a limos gruesos y arcillas.
5. Para la separación de arcillas y partículas menores a 5 μ de diámetro, se colocaron las muestras en vasos de precipitados de 600 ml y 1000 ml y se agregó agua destilada a una altura de 10 cm. Se agitó durante una hora, se dejó reposar y se vació el sobrenadante. Se repitió este paso entre 7 y 8 veces, dependiendo de lo turbio que se veía la solución, lo cual dependió de la cantidad total de arcilla que contiene la muestra. En términos prácticos, hasta que la solución se notó clara. Al término de este proceso se obtuvieron partículas entre 5 μm y 50 μm de diámetro.
6. Eliminación de la materia orgánica. Inicialmente de la fracción recuperada de 5 muestras se tomó 1.5 gr de cada una de estas muestras que se colocaron en tubos de ensaye de 16 x 100 ml con 10 ml de Peróxido de Hidrogeno al 30 %. Se tuvo una reacción ligera de las muestras después de 48 horas con el H_2O_2 , de tal manera, que se optó por otra técnica que consiste colocar las muestras en crisoles, agregándoles alcohol etílico hasta cubrir la muestra (por economía es

posible también utilizar alcohol metílico). Posteriormente, se incineró la muestra para eliminar la materia orgánica, la combustión tardó aproximadamente 2 min., se repitió este paso 2 veces y se recuperó el material colocándolo en tubos de ensaye. Este paso fue propuesto por Powers y Gilbertson (1987) ya que es más práctico y económico.

7. Eliminación de Carbonatos. Se llevo a cabo agregando a cada tubo de ensaye (16 x 100) con 1.5 gr de muestra, 20 ml de una solución de ácido clorhídrico al 10 %. Se centrifugaron las muestras a 500 r.p.m. durante 3 min. El sobrenadante es decantado y se lava con acetona a 500 r.p.m por 3 min al final, se lavaron dos veces con agua destilada centrifugando a 500 r.p.m por 3 min.

8. Para la recuperación de fitolitos por flotación, se han utilizado técnicas que utilizan líquidos pesados. Para ello es necesario ajustar estos líquidos a una gravedad específica entre 2.3 y 2.4, ya que, los fitolitos tienen un intervalo de gravedad específica que varía desde 1.5 hasta 2.3, por lo tanto, estos flotarían en una solución más densa. Se utilizó Politugstato de Sodio que es un compuesto de polvo que al agregarle agua forma una solución pesada, la cual, se puede ajustar a la gravedad específica deseada en este caso de 2.3. A diferencia de los compuestos pesados normalmente utilizados, no posee inconvenientes para la salud ya que no es tóxico ni cancerígeno, además, es de fácil manejo y es recuperable. A cada uno de los tubos con 1.5 gr. de muestra se les agregó 10 ml de la solución de Politugstato de Sodio centrifugándose a 500 r.p.m. por 3 min; al termino, se recuperó el sobrenadante y se colocó en otro tubo de ensaye. Se centrifugó nuevamente a 500 r.p.m. por 3 min y se recuperó el sobrenadante hasta extraer el mayor número de fitolitos posibles. Se recuperó la solución de Politugstato de sodio colocándolo en un embudo con papel filtro y se recuperó la solución en un matraz. Por otro lado, al sobrenadante se le agregó agua para disminuir su densidad, se centrifuga y el sobrenadante se decantó quedando los fitolitos en el fondo, este lavado se llevó a cabo dos veces. Al final, se obtuvieron diferentes cantidades de sílice en forma de fitolitos, además de otras formas silíceas como diatomeas, espículas de esponja, estomatoquistes entre otros.

9. Una vez obtenidos los fitolitos por flotación, se recuperó el material resuspendiéndolo con alcohol etílico y se almacenó en frascos con 5 ml de alcohol etílico. Se tomó 0.1 ml de la solución de alcohol con fitolitos de cada uno de los frascos, el cual, se colocó en un portaobjetos por triplicado para cada estrato y se fijaron con Bálsamo de Canadá. El índice de refracción de los fitolitos es de alrededor de 1.42 por lo que el Bálsamo mostrará un contraste diferente.

10. Finalmente, se revisaron las preparaciones en un microscopio óptico Nikon a 400 X. observando la plantilla completa de cada una de las preparaciones. De los fitolitos encontrados se realizaron esquemas, además de una revisión sistemática y taxonómica de los fitolitos de pastos. La cuantificación se basó en la clasificación de Twiss (1986). Cada una de las clases contadas fue expresada como un porcentaje para el análisis estadístico de frecuencia relativa.

RESULTADOS

A continuación se presentan las tablas 1, 2 y 3, así como, sus respectivas gráficas que corresponden a los tres perfiles estratigráficos: “Don Beto”, “El Cano” y “El Diablo”. Estas tablas contienen el porcentaje de cada uno de los grupos, que se obtuvo al cuantificar el total de fitolitos de una preparación. Los esquemas de los fitolitos se encuentran en el Anexo 2. Los fitolitos encontrados se clasificaron dentro de los seis grupos y al compararlos con el total (100%) se obtuvo su porcentaje. Los porcentajes obtenidos indican la abundancia relativa de cada clase en cada uno de los estratos (profundidad cm).

Con los datos de las tablas se realizaron las gráficas 1, 2 y 3 que ilustran a cada uno de los perfiles estratigráficos y se muestra una sombra que indica la abundancia de cada clase con respecto de su profundidad y por lo tanto a través del tiempo de depositación.

Perfil “Don Beto”

El perfil Don Beto se encuentra en el centro de la cuenca y se compone de dos unidades: B – I y B –II (tabla 1), en ella se aprecia que el estrato mas antiguo es B-II-1 y el más reciente el B-I-5.

Estrato	Profundidad (cm)	Pooid e (%)	Chloridoid e (%)	Panicoid e (%)	Alargados (%)	Abanic o (%)	Puntiforme s (%)	Total %
B - I - 5	35	0	11,11	22,22	11,11	44,44	11,11	100
B - I - 4	71	11,76	23,52	5,88	17,64	41,17	0	100
B - I - 3	90	12,5	15,62	9,37	12,5	46,87	3,12	100
B - I - 2	100	7,69	46,15	7,69	7,69	30,76	0	100
B - I - 1	123	0	64	8	12	16	0	100
B – II - 9	130	3,03	39,39	18,18	6,06	30,3	3,03	100
B – II - 8	140	3,33	37,5	20	10	29,16	0	100
B – II - 7	152	1,31	50	19,07	13,15	15,13	1,31	100
B – II - 6	165	2,89	47,82	15,94	14,49	18,84	0	100
B – II - 5	176	5,88	38,23	13,23	4,41	38,23	0	100
B – II - 4	190	0	11,42	20	2,85	65,71	0	100
B – II - 3	200	2,7	29,72	18,91	13,51	35,13	0	100
B – II - 2	218	2,81	30,98	25,35	1,4	36,61	2,81	100
B – II - 1	230	12,5	12,5	37,5	0	37,5	0	100

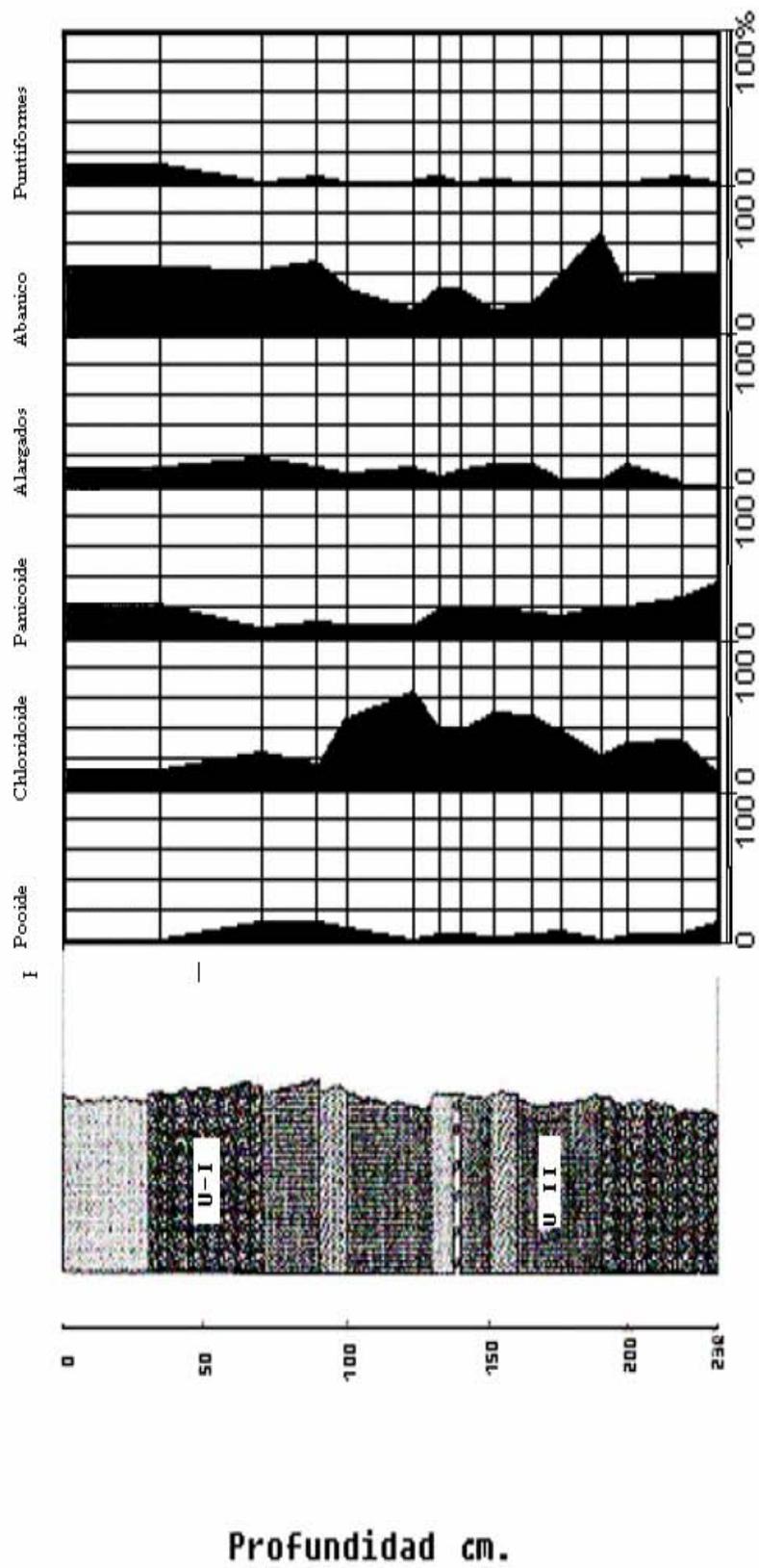
Tabla 1. Muestra las clases de fitolitos encontrados en porcentajes (%) en el perfil “Don Beto”, así como la clave del estrato y su profundidad en cm.

La unidad B-II tiene una profundidad de 230 cm hasta los 130 cm como se puede observar en la gráfica 1. Los grupos más representados en esta unidad son las Clases Chloridoide y Abanico y en menor proporción la clase Panicoide mientras que las demás clases están escasamente representados (gráfica 1).

Como se ha dicho, la técnica de flotación con Politugstato de Sodio es eficiente por que permite recuperar muchas formas de sílice opalino como: diatomeas, espículas de esponja, estomatoquistes y otras partículas no reconocibles. Debido a esto se pudo apreciar la abundancia o escasez de estas partículas a lo largo del perfil. Siendo la unidad II, donde se observo con mayor abundancia las diatomeas, espículas de esponja y en menor grado los estomatoquistes que son estructuras de resistencia de crisofíceas.

La unidad B-I (tabla1) presenta una dominancia. Por un lado las formas de Abanico y por el otro los Chloridoides, los cuales van disminuyendo estratos arriba. Los Panicoides son de menor importancia, pero son los Pooides, Alargados y Puntiformes los que se encuentran escasamente representados (gráfica 1). Es en esta unidad donde se observó la menor cantidad de partículas de sílice que comprende a los fitolitos, diatomeas, espículas de esponja y estomatoquistes.

Perfil "Don Beto"



Gráfica 1. Muestra los porcentajes de las clases de fitolitos en relación con la profundidad en cm.

Perfil “El Cano”

Este perfil se encuentra en la parte oeste de la laguna, tiene una profundidad cerca de los 300 cm. El perfil presenta 3 unidades: la primera (C-I) contiene 5 estratos con una profundidad de 145 cm, la segunda (C – II), presenta 12 estratos y alcanza una profundidad de 293 cm y por último la tercera unidad (C –III – 1) que su piso se encuentra a los 298 cm (tabla 2).

Estrato	Profundidad (cm)	Pooide (%)	Chloridoide (%)	Panicoide (%)	Alargados (%)	Abanico (%)	Puntiformes (%)	Total (%)
c - I - 5	10	1,24	51,03	20,33	6,63	20,33	0,41	100
c - I - 4	18	1,66	45,83	28,33	9,16	15	0	100
c - I - 3	43	0	35,06	38,96	3,89	22,07	0	100
c - I - 2	78	18,18	15,45	7,27	3,63	54,54	0,9	100
c - I - 1	157	0	0	0	0	0	0	0
c - II - 11	168	0	0	0	0	0	0	0
c - II - 10	180	0	0	0	0	0	0	0
c - II - 9	216	4,16	8,33	20,83	29,16	37,5	0	100
c - II - 8	220	5	35	15	15	25	5	100
c - II - 7	230	0	33,33	21,66	11,66	30	3,33	100
c - II - 6	244	3,03	30,3	33,33	18,18	15,15	0	100
c - II - 5	255	0	0	0	0	0	0	0
c - II - 4	264	0	0	0	0	0	0	0
c - II - 3	269	0	0	0	0	0	0	0
c - II - 2	279	0	0	0	0	0	0	0
c - II - 1	290	0	0	0	0	0	0	0
c - II - 1.1	293	0	0	0	0	0	0	0
c - III - 1	298	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 2. Muestra las clases de fitolitos encontrados en porcentajes (%) en el perfil “El cano”, así como la clave del estrato y su profundidad en cm.

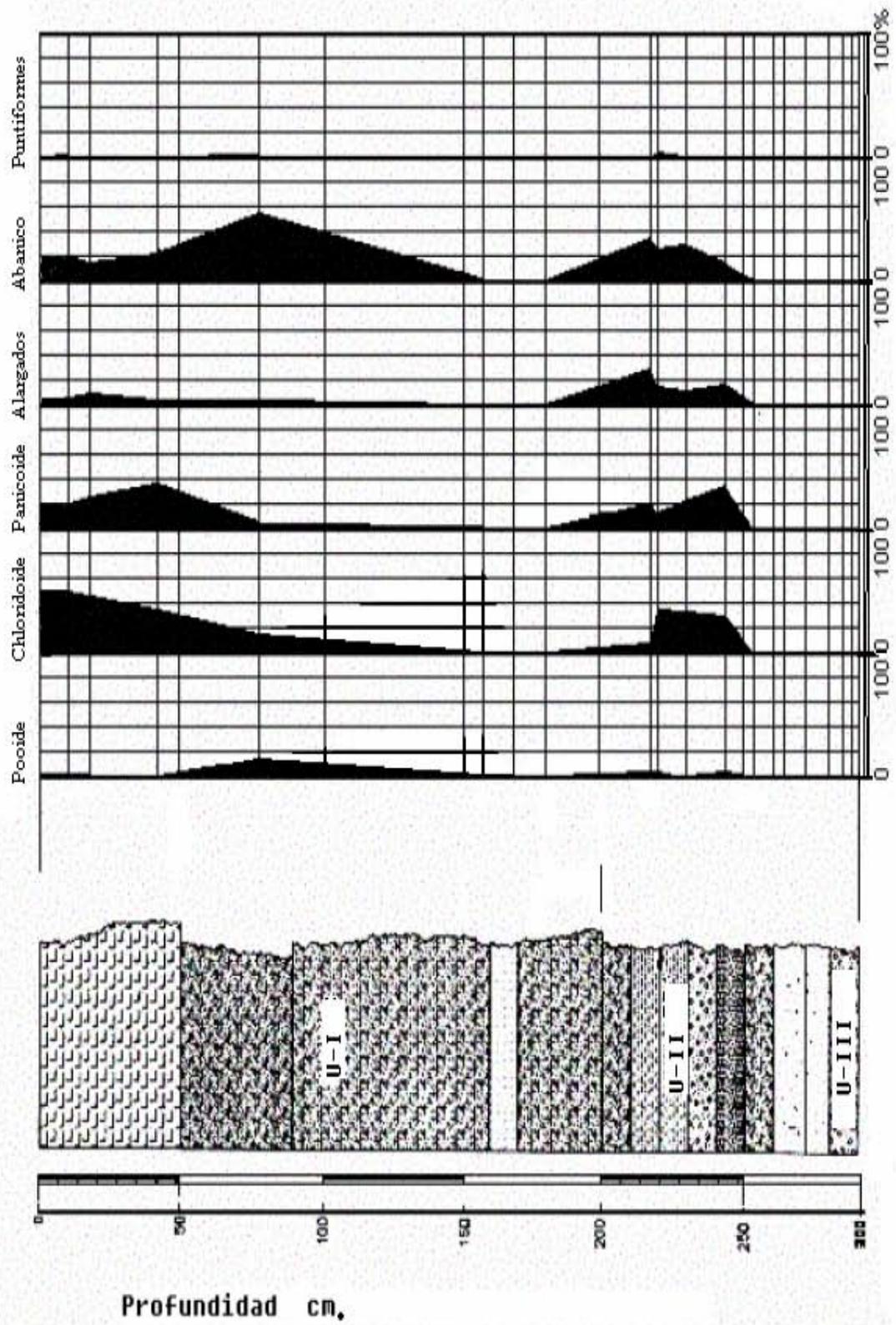
En la gráfica II, se aprecia que, la profundidad máxima del perfil es de 298 cm. y es asignado como unidad III, donde no se presenta ningún tipo de registro. Esto se debe al propio origen ígneo del sedimento, constituido por fragmentos de roca riolítica (del tamaño de las arenas y gravas). Por encima de este estrato Ortega (1995) identifica una línea de conchas de Ostrácodos (gráfica 2).

La unidad C-II presenta fitolitos muy desgastados o ausentes, por lo que el análisis cuantitativo se restringe a aquellos estratos donde se presentan con mayor frecuencia (tabla 2). La constante a lo largo de esta unidad es la poca cantidad de fitolitos en general y al igual que las diatomeas, se presentan en mayor cantidad en el centro de la unidad (C-II-6). Estratos arriba y abajo la cantidad de sílice disminuye.

La unidad número II esta a 1.4 m, compuesta de una secuencia de arcilla y arena de grano fino. En la parte inferior de esta unidad, se encuentra una disminución abrupta de todas las variedades de fitolitos (entre los 157 cm y los 180 cm; los 255 y los 298 cm de profundidad (tabla 2, gráfica 2).

La unidad I presenta una excelente preservación del material silicio tanto de diatomeas como de fitolitos. Aunque presenta muy pocas espículas de esponjas, generalmente están fragmentadas, no así los estomatoquistes que se presentan en forma abundante. Las formas que se presentan en mayor proporción son; la clase Chloridoide seguida de Panicoide y en menor medida las formas de Abanico (tabla 2).

Perfil "El Cano"



Gráfica 2. Muestra los porcentajes de las clases de fitolitos en relación con la profundidad en cm.

Perfil “El Diablo”

El perfil El Diablo se encuentra en el sur de la cuenca. Es un sector de tierras bajas y arenas pantanosas, el perfil tiene una profundidad de 2.5 m de acuerdo a las observaciones sedimentológicas, y en el se han distinguido cuatro unidades distintas: La unidad I comprende seis estratos (D – I con 96 cm de profundidad); las unidades II y III tienen tres estratos cada una, con 138 cm y 159 cm de profundidad respectivamente y finalmente la unidad IV con 11 estratos tiene un alcance de 244 cm en el piso de la unidad (gráfica 3, tabla 3).

Estrato	Profundidad (cm)	Pooide (%)	Chloridoide (%)	Panicoide (%)	Alargados (%)	Abanico (%)	Puntiformes (%)	Total (%)
D - I - 6	14	1,13	24,52	14,71	21,5	30,56	7,54	100
D - I - 5	26	2,97	14,85	10,89	45,54	22,77	2,97	100
D - I - 4	40	3,03	21,21	18,18	25,75	25,75	6,06	100
D - I - 3	54	3,33	6,66	13,33	33,33	26,66	16,66	100
D - I - 2	68	1,92	25	17,3	26,92	19,23	9,61	100
D - I - 1	82	2,77	19,44	22,22	22,22	19,44	13,88	100
D - I - 1´	96	5,15	20,61	16,49	14,43	36,08	7,21	100
D - II - 3	110	0	17,39	26,08	8,69	43,47	4,34	100
D - II - 2	124	0	16,39	22,95	18,03	42,62	0	100
D - II - 1	138	4,44	13,33	13,33	24,44	44,44	0	100
D - III - 3	145	6,25	25	4,16	12,5	41,66	10,41	100
D - III - 2	152	7,69	42,3	7,69	12,5	20,19	9,61	100
D - III - 1	159	10,75	44,08	7,52	13,97	17,2	6,45	100
D - IV - 11	167	8,15	38,58	5,97	22,82	17,93	6,52	100
D - IV - 10	174	0	40	8,75	22,5	18,75	10	100
D - IV - 9	182	5,95	14,28	3,57	25	46,42	4,76	100
D - IV - 8	190	0,58	50,58	4,08	20,81	19,64	4,28	100
D - IV - 7	198	0,92	55,55	2,46	15,12	18,51	7,4	100
D - IV - 6	205	1,65	35,12	7,43	16,11	37,19	2,47	100
D - IV - 5	213	0,44	26,87	3,08	32,59	29,95	7,04	100
D - IV - 4	221	1,04	15,62	2,08	44,79	31,25	5,2	100
D - IV - 3	229	3,17	21,32	3,45	33,14	36,02	2,88	100
D - IV - 2	236	1,02	17,94	6,15	36,92	29,74	8,2	100
D - IV - 1	244	1,51	26,51	1,51	30,3	37,87	2,27	100

Tabla 3. Muestra las clases de fitolitos encontrados en porcentajes (%) en el perfil “El Diablo”, así como la clave del estrato y su profundidad en cm.

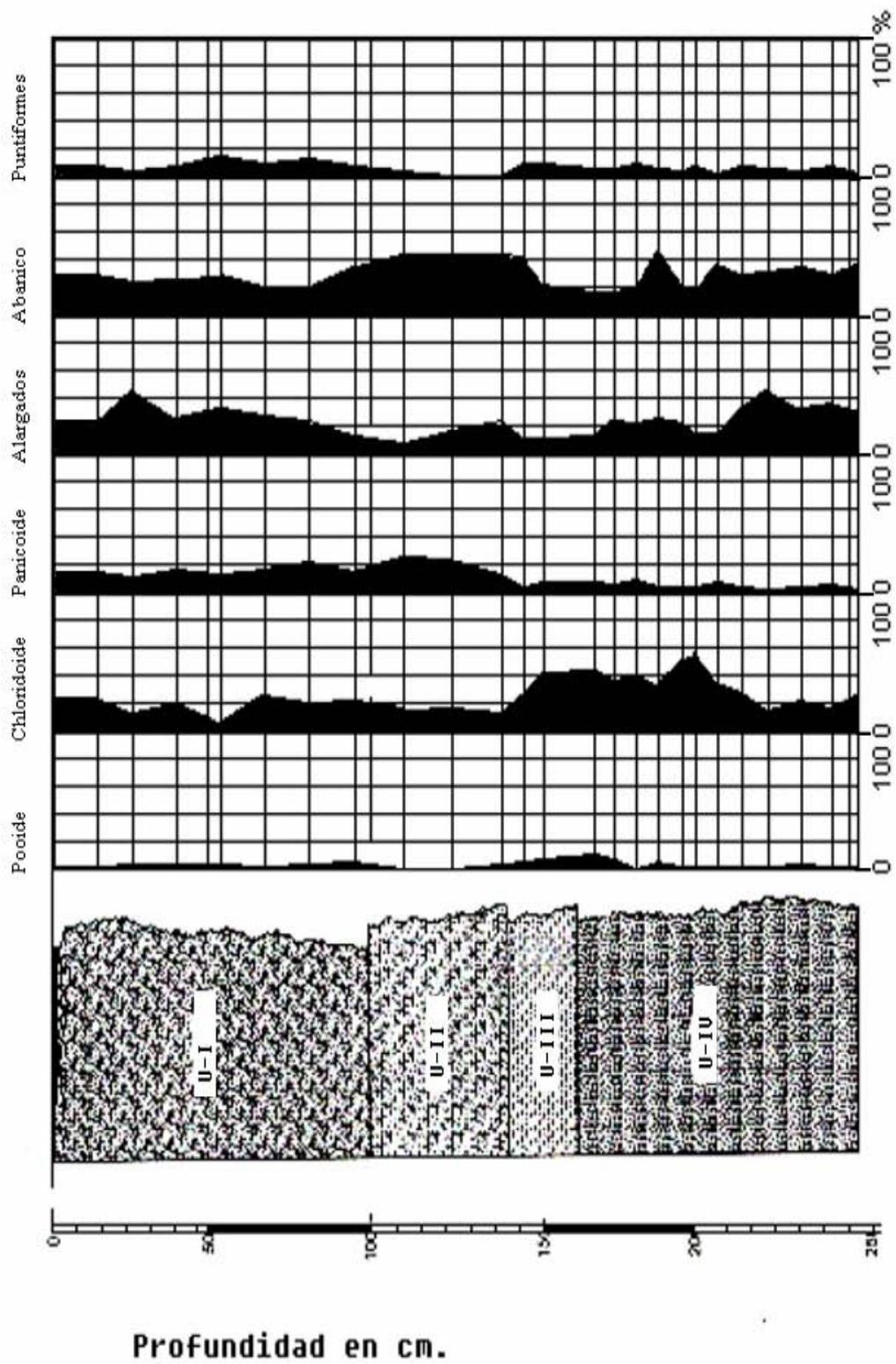
La unidad IV que es la más antigua presenta pocos fitolitos en el piso (D-IV-1). Estratos arriba va aumentando progresivamente la cantidad de fitolitos encontrados, siendo el estrato D-IV-8 el que contiene la mayor cantidad de sílice y fitolitos recuperados; además, presenta una gran riqueza de diatomeas, así al finalizar la unidad D-IV-11 la cantidad de partículas de sílice va disminuyendo (tabla 3). Por otra parte, la unidad presenta como clases dominantes los Chloridoides, las Alargadas y las formas de Abanico (gráfica 3).

La unidad III presenta pocos fitolitos así como de otras partículas de sílice, La unidad presenta un notable predominio de las formas de abanico y de la clase Chloridoide (gráfica 3).

La siguiente unidad (D-II) (tabla 3) presenta más sílice concentrado sobre todo en D-II-2, quien presenta también muchas diatomeas con muy pocas espículas de esponja y algunos estomatoquistes raros. La dominancia es reflejada por la sombra que genera su frecuencia en la gráfica 3, de manera que sobresalen formas de Abanico Panicoide y disminuyen los Chloridoides. Los Alargados presentan ascensos y descensos.

El D-I es la unidad más reciente ya que es la capa más superficial, a lo largo de esta unidad, los fitolitos ya no son tan abundantes y se concentran en D-I-6 (tabla 3). También presenta pocas diatomeas y escasas espículas de esponja así como pocos estomatoquistes. En la gráfica 3, las clases con mayor frecuencia son las formas de Abanico que van reduciendo su frecuencia; mientras las formas Alargadas y Panicoides aumentan progresivamente, siendo las formas Chloridoides quienes reducen su frecuencia.

Perfil "El Diablo"



Gráfica 3. Muestra los porcentajes de las clases de fitolitos en relación con la profundidad en cm.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Las tablas 1, 2 y 3 muestran los porcentajes de las clases principales de fitolitos encontrados en los diferentes perfiles de Babícora Chihuahua. Con ellas se construyeron las gráficas de resultados 1, 2 y 3. Estos diagramas muestran los cambios en las frecuencias de las diferentes clases de fitolitos. Estas partículas silíceas provienen principalmente de las Gramíneas; Panicoide, Chloridoide y Pooide. Aunque esta clasificación permite incluir a otros grupos taxonómicos, dentro de las clases Alargados, Abanicos y Puntiformes, ya que estos no poseen mucha especificidad taxonómica; sin embargo, Twiss (1986); Sase y Kondo (1974) los consideran complementarios para las investigaciones paleoclimatológicas y paleoambientales.

La frecuencia acumulada de las clases en cada estrato permite la caracterización del pastizal. La frecuencia acumulada de la clase Pooide indica un pastizal dominado por el mecanismo fotosintético C3, mientras que, la superioridad de la clase Chloridoide indica el predominio de un mecanismo C4. Por otra parte el grupo Panicoide indica pastizales tanto C3 como C4. El seguimiento de las frecuencias de los fitolitos a lo largo de los perfiles, permite identificar el tipo de asociación fósil que predomina a lo largo del tiempo. El tipo de asociación fósil resultante constituyen los restos de la vegetación dejada en Babícora durante el Cuaternario tardío. Esto proporciona información para comprender la evolución local de la vegetación, que es necesaria para poder reconstruir la secuencia de eventos que acontecieron en el norte de Chihuahua en la cuenca de Babícora.

Perfil “Don Beto”

De acuerdo a la tabla 1 y la gráfica I, la mayor cantidad de fitolitos se encuentra en las clases de Abanico, Chloridoide. Las formas Chloridoide presentan “Sillas de Montar” de diversos tamaños pero con el mismo patrón de: planos cóncavos y convexos (Brown, 1984). Estas formas presentan frecuencias ascendentes desde lo más profundo (B-II-1) hasta alcanzar un 50% (B-II-7). Posteriormente encontramos un descenso paulatino de su frecuencia. Esta clase como reporta Twiss (1986) comprende pastos de la subfamilia Chloridoideae y son de distribución Xérica con mecanismo fotosintético C4. Este grupo

es el más común dentro del perfil, por encima de Panicoides y Pooides que son más escasos.

La clase constituida por formas de Abanico abarca muchas formas poliédricas de gran tamaño, son muy abundantes en el perfil, pero éstas no se derivan necesariamente de un tipo específico de pasto; aunque otras plantas también los pueden producir, son en las gramíneas quienes producen las formas más diversas (Piperno, 1988).

La sombra máxima dibujada por la clase Abanicos en la gráfica 1 alcanza el 66 %. En el estrato B-II-4, distinguiéndose aquí, una disminución de las formas Chloridoideas. Estratos arriba las formas de abanicos van disminuyendo y por el contrario los Chloridoides se ven favorecidos aumentando progresivamente. Hacia el final del perfil estas formas cambian de frecuencia invirtiéndose, los Chloridoides disminuyen y los Abanicos aumentan (gráfica 1). Las formas de Abanico agrupa a formas celulares que sólo se silifican cuando la planta es vieja o bien son formadas fácilmente en días con mucho sol y agua Parry y Smithson (1964); Blackman y Parry (1968); Jones y Handreck (1965) y Sangster (1970). Lo que indica que existe un ambiente seco dominado por el mecanismo C4 (formas Chloridoides), con cambios en la humedad lo que permitiría la silificación de las células “atípicas”, que constituyen a las formas de Abanico.

Otra clase importante en este perfil es la clase Panicoide que se encuentra distribuido mayormente al inicio del perfil (37%), posteriormente disminuye su frecuencia paulatinamente a medida que avanza el tiempo, pero algunos estratos alcanzan el 20%, 22%. Estos pastos tienen formas: bilobuladas (dumbella), cruces y polilobuladas, son tanto C3 como C4; además, tienen una distribución muy próxima a los trópicos (Twiss, 1986) y prefieren ambientes más húmedos que los que prefiere los Chloridoides. Lo que este grupo indicaría son esos momentos de mayor humedad donde estas plantas se ven favorecidas.

Los pastos Pooides con mecanismo fotosintético C3 y de ambientes fríos presentan formas redondas, rectangulares, elípticos y de media luna. Estas formas se encuentran muy poco representadas en el perfil, sólo alcanzó 12 % en B-I-3 (tabla 1). Cuando las formas Chloridoides y Panicoides no son tan frecuentes como en otros estratos (gráfica

1) y se encuentra dominado por las formas de Abanico con el 46%. Lo que hablaría de una ausencia de condiciones ambientales donde estas plantas crecen sin problemas, Estos pastos crecen a alturas entre los 2,000 m snm. y 3,000 m snm. prefieren climas totalmente fríos y buenas condiciones de humedad en el suelo (Twiss, 1986). Debido a esto, las condiciones marcadas en los estratos son preferentemente secas y no húmedas.

Las formas alargadas no son muy abundantes, sólo presentan algunos picos siendo el más alto en B-I-4 con el 17%, donde sobresale el mayor número de Abanicos con el 41%.

La clase Puntiforme es la menos abundante de todas, sólo el estrato más superficial (B-I-5) contabilizó el 11%. Estas formas resultan de cubrir la pared celular de tricomas o estructuras pilosas a manera de forro el cual es muy frágil. Los fitolitos puntiformes pueden destruirse fácilmente en ambientes sedimentarios siendo probablemente la causa de que no se encuentren tan abundantes (Baker, 1959).

La unidad que presentó mayor cantidad de fitolitos fue la II, concentrándose en los Horizontes B-II-6 y B-II-9 de la tabla 1. Ésta presentó una gran cantidad de diatomeas y espículas de esponja, así como, otras estructuras como los estomatoquistes los cuales fueron poco abundantes. Así también, en la unidad I se recuperó muy poca sílice tanto de fitolitos como de diatomeas y espículas.

Lo anterior muestra que en B-II es más fácil la formación de partículas silíceas de ópalo. Rovner (1983) considera que “ha mayor cantidad de sílice en forma de fitolitos de ópalo de las plantas indican mayor humedad”. Las diatomeas y espículas de esponja apoyarían esta idea debido a su abundancia en estos estratos.

“Don Beto” Unidad II

Los sedimentos más profundos de la unidad B-II-1, llegan a los 230 cm (tabla 1). Las formas más frecuentes son las clases Panicoide y de Abanico con el 37.5 % respectivamente. La clase Panicoide se encuentran abundantemente en los pastos de Subfamilia Panicoideae. En este grupo se encuentran géneros de pastos con mecanismos C3 y C4 de temperaturas cálidas, y necesitan de mayores condiciones de humedad,

sobre todo en verano. Estas especies de pastos son por lo general amacollados (Metcalf, 1960; Twiss, 1986; Fredlund y Tieszen 1997 y; Thorn 2004).

La menor cantidad de Chloridoides (13%), junto con la abundancia de Panicoideae definen un ambiente cálido húmedo, Formad Panicoides (C3 yC4) requieren de mejores condiciones de crecimiento que los Chloridoides (plantas C4) de ambientes áridos (Thorn, 2004). Indicando así, un ambiente favorablemente húmedo o bien una menor condición de aridez.

Las formas de abanico con un 38 % en promedio, llegó a picos del 65% como en B-II-4. Lo constituyen muchas formas poliédricas como las células buliformes, las formas trapezoidales descritas por Brown (1984) e incluso estomas. La redundancia y multiplicidad de estas formas se debe a que las formas “atípicas” de silificación están presentes en muchos taxa de plantas. En la mayoría de los pastos de cualquiera de las Subfamilias son abundantes, pero sólo se silifican cuando se presenta gran suministro de agua y disolución de ácido monosílico, como lo propuesto por Parry y Smithson (1964), Jones y Handreck (1965), Blackman y Parry (1968), así como Yoshida *et. al.*, (1962) que en diferentes especies afirman esto.

Por lo tanto, es probable que en los periodos húmedos las células “atípicas” de silificación se constituyeran. Correspondiendo a los picos máximos de los Abanicos. Lo que sugeriría un ambiente favorablemente húmedo.

Las formas Pooides de plantas de pastos de la subfamilia Festucoide con mecanismo fotosintético C3, tienen el 12% en B-II-1, no existen en B-II.4. Estas plantas requieren de climas de ambientes fríos y buenas condiciones de humedad (Fredlund y Tieszen 1997; Thorn 2004). Esta aparente escasez de las formas dejadas por la Subfamilia Festucoide evidencia un ambiente preferentemente calido y no uno frío.

Las formas Alargadas y Puntiformes están ausentes como se pude observar en gráfica 1. Estas formas pueden ser muy frágiles debido a su propia estructura, así mismo ofrecen mayor superficie de erosión Vallejo (2002).

A partir de B-II-4 las formas Chloridoides crecen hasta llegar al 50% (B-II-7) y disminuyen en B-II-8 al 37% (tabla 1). Las formas Panicoides en el estrato B-II-8 y B-II-9 estas formas se mantienen alrededor de un 20%. Por lo tanto si de principio el clima fue calido húmedo, es seguido de un régimen de aridez a un aumento en la humedad, que puede ser interpretado del total de Chloridoides y Panicoides, en estos estratos.

Además también se aprecia la disminución progresiva de las formas de Abanico a partir de B-II-4 (65%) a un mínimo en B-II-7 (15%). Parry y Smithson (1964), Jones y Handreck (1965), Blackman y Parry (1968), así como Yoshida *et. al.*, (1962) mencionan que estas células “atípicas” no se forman si poco ácido monosílico esta presenta en el agua del suelo, o bien si el agua es poca. Lo que evidencia una menor disminución en la precipitación. Ahora bien, estas formas de Abanico alcanzan un 30% en B-II-8 y B-II-9 en los cuales, los Chloridoides alcanzan menores frecuencias en estos últimos estratos de la unidad (B-II). Estas frecuencias muestran una reducción del ambiente árido y un aumento del agua disponible para las plantas.

Todo ello podría indicar, junto con la disminución de Chloridoides, un ambiente más extremo, en el cual limitaría la cantidad de agua disponible para las plantas y por ende la disponibilidad de sílice en el suelo.

Los pastos de la subfamilia Chloridoideae que son los más abundantes en esta parte, prefieren calor y condiciones de crecimiento seco. Altos valores sugieren la disminución de la precipitación y humedad (Thorn, 2004; Twiss, 1986) (gráfica 1). Estas especies de pastos de la subfamilia Chloridoideae, son de ambientes áridos y todas son de mecanismo fotosintético C4, prefieren temperaturas altas de hasta 40° C e indican un régimen de aridez en este periodo.

Sin embargo, la abundancia de sílice en B-II-7 tanto de fitolitos, diatomeas y espículas de esponja, muestran una gran formación de ópalo biogénico, lo que indicaría probablemente un régimen muy húmedo en el estrato, así como, un óptimo suministro de sílice y condiciones favorables de humedad para la formación de partículas silíceas. En este caso para los fitolitos formados por este grupo de plantas C4. Blackman (1971), McKeague y Cline (1963b) reportan que para que se formen los fitolitos es necesario un óptimo suministro de sílice en especial de ácido monosílico, condición que se obtiene

en el suelo húmedo, así como, en un alto grado de transpiración (Parry y Smithson 1958).

Las formas Alargadas, Puntiformes y Pooides o bien son muy escasos o se encuentran ausentes. La secuencia de eventos registrarían condiciones húmedas seguidas por periodos de sequía, favoreciendo las condiciones xéricas lo que establece un ambiente árido con marcados momentos de mayor humedad.

La edad de la unidad II, reportada por Ortega (1995^a) (anexo 1) es de 11,885 +/- 315 años AP, donde, el techo también está identificado con una línea de conchas de Ostrácodos a los 130 cm (B-II-9) de profundidad, pero es desde B-II-7 donde se presentan gran cantidad de diatomeas y espículas de esponjas, mismos que confirmarían un periodo húmedo.

“Don Beto” Unidad I

La unidad I tiene menor concentración de partículas de sílice en comparación con la unidad II. Tanto las diatomeas como las espículas de esponja y fitolitos se encuentran escasamente (tabla 1).

El piso de esta unidad (B-I-1), presenta formas de células cortas del tipo Chloridoide (64%, tabla 1); autores como Twiss, (1986); Fredlund y Tieszen (1997); Thorn (2004); reportan que estas formas predominan en sitios donde el agua es poca, como por ejemplo: las llanuras centrales de los Estados Unidos, en Dakota del Sur y en Queensland Australia, respectivamente han confirmado estas formas de “silla de montar” recurrentes en pastizales de ambientes áridos y semiáridos, por otra parte Metcalfe (1960) ha observado la distinción de estos pastizales en base a la anatomía de la hoja, ya que poseen una línea de células del mesófilo, que rodean el haz de la vaina, característico en plantas C4.

La escasa presencia de Abanicos (16%), Alargados (12%), Panicoides (8%) y Pooides 0%. Estos porcentajes muestran la continuidad marcada sobre las formas Chlorodoides y por lo tanto del ambiente seco.

El poco sílice recuperado en forma de diatomeas espículas o fitolitos también sugieren un periodo de poca formación de ópalo biogénico, lo que podría indicar periodos de aridez marcada.

Los estratos más recientes muestran una disminución de las formas Chloridoides en un 15% en B-I-3; para ser remplazados por formas de Abanico (46%), así como, por Pooides y Alargados (con el 12%). Esta tendencia en los últimos estratos del perfil, se mantuvo lo que podría manifestar un ambiente menos hostil, Thorn (2004) menciona que bajas cantidades de Chloridoides indican humedad.

Al finalizar la unidad en B-I-5, las formas Pooides presentan 0%, las Chloridoides 11%, los Panicoides 22%, y los Abanicos con 46%, la sombra dibujada por la trayectoria establecida por estas frecuencias permite observar la disminución de las formas Chloridoides, para ser remplazadas por las formas de Abanico y Panicoides.

Como se ha indicado, las formas de Abanico comprende formas poliédricas muy diversas, conocidas como células “atípicas” de silificación, Blackman (1968), McKeague y Cline (1963a) mencionan que es necesario un óptimo suministro de ácido monosílico, humedad, así como, en un alto grado de transpiración, para que estas células se silifiquen. Además el aumento de Panicoides, que prefieren mayores condiciones de humedad que Chloridoides, indicarían al parecer es un cambio ambiental evidente.

En esta unidad, que inicialmente los fitolitos muestran un periodo muy seco, finaliza en un ambiente con mayor humedad, se obtuvo un fechamiento con ^{14}C convencional encontrándose una edad de 1 300 +/- 65 años AP. según el reporte de Ortega (1995^a) (anexo I).

Perfil “El Cano”.

El perfil el cano se encuentra en el lado oeste de la cuenca, presenta tres unidades (gráfica 2), donde se resalta la ausencia de fitolitos en muchos estratos. El reducido número de las formas encontrados dentro de la asociación de fitolitos impide realizar un análisis cuantitativo, por otra parte, esto no guarda una correspondencia con otras formas de sílice opalino como las Diatomeas y espículas de esponja, quienes en muchos

estratos son abundantes; pero las estructuras como los estomatoquistes se encuentran muy escasas y muchos estratos no los contienen.

Es complicado explicar la ausencia de fitolitos en estos estratos. Un ambiente totalmente acuático impediría el crecimiento de las plantas que abastecen al suelo de fitolitos. Por otra parte Lewis (1981) reporta que los fitolitos son susceptibles a pH's extremos y sedimentos fuertemente alcalinos (los formados por conchas no contienen fitolitos identificables, o bien reducen la disponibilidad del sílice o bien propician la disolución de fitolitos (McKeague y Cline, 1963^a). Cambios en el pH pueden dañar a los fitolitos, pero, la misma suerte tendría otras formas de ópalo como las diatomeas.

La unidad III (C-III-1 a C-II-5) no presenta un registro adecuado de los fitolitos, así como, también la unidad II en los estratos C-II-10 y C-II-11, al final de la unidad II (tabla 2, gráfica 2).

Los pastos Pooides en los estratos C-II-6 a C-II-9 se encuentran muy poco representados; sin embargo, las formas Chloridoides, son abundantes en estos estratos junto con las formas de Abanico y Panicoides. Estos escasos registros en la unidad no permiten visualizar un patrón o tendencia, pero sí indica la constancia en los perfiles, de la presencia de Chloridoides por encima de Pooides y Panicoides.

En la parte más superficial del perfil, se encontró una cantidad de fitolitos importante, haciéndose notorio el aumento progresivo de Chloridoides, mientras que, los Panicoides se encuentran concentrados en la región media de la unidad I. Por otra parte, las formas de Abanico, muy numerosos inicialmente, se ven disminuidos en esta parte final como se observa en la grafica II.

Lo que permite conjeturar que las condiciones áridas son una persistencia en los perfiles de Babícora.

“El Cano” Unidad III

Como se aprecia en la gráfica II, la unidad III posee la profundidad máxima del perfil que es de 298 cm en ella no se presenta ningún tipo de registro debido a la naturaleza

del sedimento, que son fragmentos de roca riolítica del tamaño de las arenas y gravas. Los fitolitos suelen quedar atrapados en las partículas conocidas como limos, ya que el tamaño de los fitolitos oscila entre los 5 μ - 50 μ . Por encima de este estrato, Ortega (1995) identifica una línea de conchas de Ostrácodos.

“El Cano” Unidad II.

La unidad II presenta una gran cantidad de estratos sin un registro adecuado de las asociaciones de fitolitos desde los 298 cm y hasta los 255 cm de profundidad (Estratos; C-II-1.1 y C-II-5), Tanto los fitolitos como las diatomeas se presentan en el estrato C-II-6.

Muchos de los fitolitos observados muestran ciertos grados de intemperismo, sobre todo del tipo químico, ya que la superficie de muchos de ellos se muestran corroídos. Este tipo de intemperismo es documentado en el trabajo de Vallejo (2002), quien a través de la microscopía electrónica, analiza el desgaste químico de fitolitos en suelos y paleosuelos. Por lo que es posible que la ausencia de fitolitos se deba al desgaste químico que se llevo a cabo en esta fase de depositación.

En el estrato C-II-6 la clase Panicoides es la que presenta la mayor abundancia con el 33%, seguido por Chloridoideae con cerca del 30%, por lo que son las clases más significativas. Las formas de Abanico tienen el 15 % y los Alargados el 18%; las otras clases se encuentran ausentes o en un porcentaje muy pequeño (tabla 2). Una mayor abundancia de Panicoides, es debido a un aumento en la humedad del ambiente (Twiss, 1986). Thorn (2004) sugiere que porcentajes menores de Chloridoideae con respecto a Panicoides evidencia un ambiente húmedo, Fredlund y Tieszen (1997) también consideran una reducción del periodo seco, y un aumento el periodo de lluvias.

A partir de C-II-7 y C-II-8 la proporción de las formas Chloridoideae de fitolitos aumenta (35%), con respecto a los Panicoides (15%) (tabla 2), lo que podría implicar un periodo de sequía, aunque, las formas Panicoides aumentan en C-II-9 (20%). Es importante la presencia de formas de Abanico (37%) y Alargados (29%), mientras los Chloridoideae llegan a un mínimo en C-II-9, con el 8% (gráfica 2). Es posible que cambios en la humedad o del cuerpo lacustre, provoquen el desplazamiento de unas

especies por otras. También se sabe que en buenas condiciones de humedad permite que cohabiten en el mismo sitio tanto plantas C3 como C4 (Twiss, 1986).

Las condiciones ambientales parecen favorecer tanto a Chloroides como Panicoides. Los Panicoides que dominan al inicio, son plantas que prefieren mejores condiciones que Chloroides, Posteriormente los Chloroides que prefieren el calor y condiciones de crecimiento en seco (Twiss, 1986; Thorn, 2004) son más abundantes, por lo que, es posible interpretar un ambiente con humedad favorable a Panicoides de inicio y después un ambiente seco. Al final del registro de fitolitos de la unidad C-II-9 se repitió el fenómeno. Por lo que, se sugiere existió entonces buenas condiciones de humedad que se mantienen constantes con un régimen de temperatura cálida. La temperatura óptima para este grupo de plantas C 4 esta entre los 30° C y los 45° C (Twiss, 1986), la edad de esta unidad (II) es de 9,614 +/- 130 años AP. como se observa en la gráfica del Anexo I b

“El Cano” Unidad I

La unidad presenta un periodo donde no existe registro de fitolitos, este periodo abarca desde la unidad anterior (C-II-10) hasta la base de la unidad I (C-I-1), este segundo proceso de no depositación de fitolitos, es nuevamente interpretado que es debido a el desgaste químico.

La unidad C-I da inicio a las asociaciones en el estrato C-I-2 presentando formas Pooides con 18%, que luego van disminuyendo a casi ausentes en la asociación en los estratos arriba (1.6%-1.4% en C-I-4 y C-I-5 respectivamente). Estas plantas como reporta Twiss (1986) son preferentemente de climas fríos y crecen entre los 2 000 m snm. y los 3 000 m snm.

Los Chloroides se presentan en forma ascendente iniciando con el 15% C-I-2 hasta 51% en C-I-5. Las formas Panicoides son aún más escasas con el 7% en C-I-2, luego aumenta rápidamente a 38% en C-I-3 y disminuye a 20% en C-I-5 (tabla 2). Esta frecuencias indican, que paulatinamente el ambiente fue cambiando a más seco. Como se puede apreciar en la grafica 2, por el contrario, las formas de Abanico son muy abundantes en C-I-2 (54%), donde los Chloroides y Panicoides son escasos.

Sí estas formas poliédricas, que disminuyen hasta un 15% en C-I-4, provienen de células “atípicas” de depositación como lo sugieren Parry y Smithson (1964), Jones y Handreck (1965), Blackman y Parry (1968), Miller (1980) además estos autores consideran que para que se formen deben de existir buenas condiciones de humedad y la cantidad dependerá de la edad de la planta y la disponibilidad del sílice. La reducción de estas formas indica la reducción del ambiente húmedo y el aumento de Chloridoides de la condición seca (Twiss, 1986: Thorn, 2004).

Así también, se puede observar en la gráfica 2 que las formas alargadas son muy escasas en esta unidad y llegan a 9% en C-I-4. Sangster (1970) encuentra que las últimas células en silificarse son las células longitudinales, estomas y células buliformes. Parry y Smithson (1964) observaron que cuando la hoja es vieja muchas células largas son silificadas. Debido a esto, se confirma que la condición seca no permite la formación de este tipo de fitolitos.

En el estrato C-I-2 se observó una gran cantidad de Diatomeas que disminuye estratos arriba Las espículas de esponja se encuentran escasamente en toda la unidad, pero los estomatoquistes se presentaron muy abundantes en la unidad, estos últimos corresponden a estructuras de resistencia de Crisoficeas, en momentos donde el cuerpo lacustre disminuye o bien permite sobrevivir el periodo de secas.

Cambios en el régimen de lluvias y de temperaturas medias, son distinguibles, debido al dominio paulatino estratos arriba de formas Chloridoides y Panicoide, indicando temperaturas entre 30 y 45 ° C y, presumiblemente una disminución de la lluvia invernal, debidas a la ausencia de formas Pooides (Twiss. 1986). Un ambiente con mayor humedad se determina al inicio de este periodo, la base de la unidad III que presenta una edad de 7,965 +/- 109 años AP. El diagnostico de las asociaciones de fitolitos, indican un cambio gradual a un ambiente árido, lo que establece la condición seca, en esta parte otro fechamiento es reportada por Ortega (1995) y corresponde a 3, 503 +/- 101 años AP (ver anexo I, figura b).

Perfil “El Diablo”

El perfil se encuentra ubicado en la parte sur de la cuenca, en un sector de tierras bajas y áreas pantanosas. El perfil tiene un registro constante de fitolitos siendo los más

abundantes los Chloridoides, seguidos de los Alargados, los Abanicos y en menor proporción los Panicoides. Los puntiformes son mucho más escasos, pero presentan un mucho mejor registro que en los otros perfiles. Por último, la clase Pooide se encuentra muy reducida y en muchos estratos no se encuentra.

La clase Chloridoide es muy común en todos los perfiles, estas formas de “Silla de Montar” tienen mayores porcentajes en los estratos D-IV-7 y D-IV-8 y también son los estratos que presentaron la mayor cantidad de fitolitos de esta unidad, coincidiendo con una gran cantidad de frustulas de diatomeas. Normalmente este tipo de pasto se encuentran distribuidos en las regiones áridas y semiáridas del mundo (Twiss, 1986).

Las formas Chloridoides generalmente disminuyen donde las formas Alargadas y de Abanico aumentan. Las últimas, son también muy abundantes en este perfil, Sangster (1970) encuentra que las últimas células en silificarse son células longitudinales, estomas y células buliformes, además, un constante suministro de sílice, madurez y senescencia permite que la planta silifique estas células conocidas como “atípicas” y produce la mayor variedad de fitolitos que constituyen estas dos clases.

La clase Panicoides no presenta mucha abundancia en las unidades D-IV y D-III con porcentajes no mayores al 8%; pero es, a partir de la unidad D-II (gráfica 3) donde se observa un aumento de estas formas de cruces y “dumbellas”, que prefieren temperaturas cálidas y alta humedad en verano Twiss (1986), además, menciona que se distribuyen en las regiones tropicales y subtropicales.

La clase Puntiforme son escasos, pero se presentan en mayor cantidad que en otros perfiles. El grupo de los Pooides no muy abundantes en los tres perfiles, tiene como máxima abundancia 10% en D-III-1, y en muchos estratos es muy escasa. Para Twiss (1986) son indicadores de ambientes fríos y condiciones húmedas, evidenciando la poca representatividad de estas formas en Babícora Chihuahua.

“El Diablo” Unidad IV

La base de la unidad IV (D-IV-1) (gráfica III) es el estrato más profundo a los 244 cm. de profundidad. Aquí las formas de abanico están por encima de las demás, con un

37%, seguido de las formas alargadas con el 30% y de las formas de “Silla de Montar” con un 26%. Este último predomina sobre las clases Panicoide, Pooide y Puntiformes, que tienen una representatividad del 1.5% cada una.

Las frecuencias se mantienen constantes, con abundantes formas de abanico, donde resalta el aumento de las formas Alargadas que llegan hasta un 44% en C-IV-4 (gráfica 3). Estudios anatómicos en hojas de Sangster (1970), Parry y Smithson (1964), Jones y Handreck (1965), Blackman y Parry (1968), Miller (1980), han demostrado que las formas Alargadas y de Abanico se deben; a un óptimo suministro de sílice, condición que se obtiene en suelos húmedos, evapotranspiración y senescencia.

Por lo que esta etapa debió de mantener estas condiciones, favorablemente húmeda. También, se denota una disminución de las formas Chloridoides (15%) en este estrato (C-IV-4). Confirmando este periodo húmedo. Las formas largas de fitolitos corresponde a células “atípicas” de silificación, que solo son formadas cuando la hoja es vieja (Parry y Smithson, 1964; Jones y Handreck 1965; Blackman y Parry 1968); además, Sangster (1970) encuentra que las últimas células en silificarse son células longitudinales, estomas y células buliformes. Estas últimas se encuentran incluidas dentro de la clase de Abanicos.

Por otra parte Piperno (1988), basándose en el sistema de clasificación anatómico, propone que la interpretación del material fósil, muchas células longitudinales forman parte del tejido vascular que pueden corresponder a esclereidas y aun cuando no se identifiquen a las especies algunas de estas indicarían la presencia de plantas arbóreas.

Con respecto a las abundantes formas de abanico muchos pueden ser células buliformes. Parry y Smitson (1958) mencionan que probablemente funcionen también como reservorios de agua y no se formarían en pastos de zonas secas. Todo lo anterior confirmaría un inicio con un ambiente húmedo.

A partir de D-IV-5, las formas alargadas disminuyen hasta un 15% en D-IV-7 (tabla 3), donde también, se aprecia una disminución de las formas de Abanico (18%). Los Chloridoides llegan a dominar en el estrato D-IV-7 (198 cm) con el 55 %. Jones y Handreck (1965) mencionan que la proporción de sílice en las plantas se incrementa

progresivamente con la edad y por las grandes transpiraciones de agua que deja grandes concentraciones de sílice. Por lo tanto, en los días de altas temperaturas, grandes aumentos de sílice fueron encontrados en razón de la transpiración y el incremento de la absorción de ácido monosílico. Esto soporta la hipótesis de que el crecimiento de plantas en climas calidos concentran grandes cantidades de sílice, especialmente, si más sílice se hace soluble en presencia de agua (Jones y Handreck, 1965).

En los estratos D-IV-8 y 9 se encontraron grandes cantidades de diatomeas; sin embargo, en D-IV-9 las formas Chloridoides disminuyen al 14% y las formas de Abanico llegan a un 46%, debido probablemente a la humedad en el ambiente. Este periodo corto continúa por la recuperación de las formas Chloridoides, mostrándose más abundantes hasta D-III-3 y manteniendo constantes las condiciones que favorecen a este grupo de plantas C4. Son de estaciones calidas con rangos de eficiencia en la fijación del CO₂, de 49mg dm²/hr y con 40° C de temperatura de la hoja (Twiss, 1986).

Estos pastos de la subfamilia Chloridoide se distribuyen en áreas de altas lluvias estacionales o donde la lluvia es altamente irregular, además son abundantes en las sabanas o pastizales abiertos (Thorn, 2004).

Estas condiciones secas son las causantes, de la disminución de las clases de Abanicos y Alargados; por lo tanto, estas variables pronostican una tendencia hacia un “clímax” de las formas Chloridoides, es decir, una marcada aridez; la disminución de las formas de Abanico y Alargadas indicarían una reducción de la condición de humedad.

Por encima de estos sucesos, las formas Chloridoideae varían poco sus porcentajes, pero en general las condiciones de este grupo persisten, aunque ya no con la mismas intensidad (14 % en D-IV-9 y 38% en D-IV-11). Las formas de Abanico, que habían disminuido con anterioridad, se recuperan mostrando un nuevo máximo de 46% a los 182 cm (D-IV-9) y disminuyen paulatinamente hasta cerca del 18% en D-IV-11. Para las formas Alargadas, que es la otra clase abundante incrementan de 15% en D-IV-7 a un 25% en D-IV-9, desciende a un 22% al final en D-IV-11. Esto muestra un aumento de la humedad.

Por otra parte, las formas Pooides, casi ausentes, llegan a un 8% en D-IV-11. Así mismo, las formas Panicoides poco representados también muestran un ligero aumento al 8% en D-IV-10; disminuyen a poco menos del 6% al final de D-IV-11. Las formas Puntiformes muestran un comportamiento semejante, pero con valores del 10% y 6% respectivamente. Aun cuando las condiciones de aridez se mantienen, las variaciones en las asociaciones muestran un aumento en la humedad como se muestra, por el leve aumento de Panicoides, y la presencia de formas Pooides.

Otro reflejo de esta humedad, son los picos que alcanza en esta etapa las formas de Abanico y Alargadas, tal como lo suponen los autores revisados. Esto corresponde a probables células “atípicas” que comúnmente no se silifican, salvo que el medio sea rico en solutos y presente buenas condiciones de humedad. La edad que reporta Urrutia *et. al.*, (1997) es de 18, 342 +/- 200 años AP.

“El Diablo” Unidad III

En la unidad D-III (tabla 3 y gráfica 3) se distinguen valores altos para las formas más significativas de la interpretación (Chloridoides, Panicoides y Pooides). Así también existe un descenso de sus valores en el estrato final de la unidad. De tal manera los Chloridoides, con un 44%, desciende a 25%; los Pooides pasan de 10% al 6% y los Panicoides de 7% baja a 4%. Ocurre lo mismo con las formas alargadas pero se distinguen crecimientos de las formas Abanico y Puntiformes de un 17% a un 41% y del 6% al 10% respectivamente. Un descenso de la precipitación y humedad afectaría a cualquier forma de pasto y por consiguiente la disminución de los cuerpos de sílice que abastecen el suelo de fitolitos, interpretando aquí una condición seca (tabla 3, grafica 3).

El Diablo” Unidad II

En la unidad D-II, a diferencia con el último estrato D-III-3, muestra un aumento de las categorías Panicoides, al pasar de un 13% a 26%, desplazando en abundancia a Chloridoides que también inicia en el 13% pero solo llega al 17%. Los Pooides

desaparecen en esta unidad, caso contrario ocurre con Puntiformes ausentes en un inicio, se denotan, con un 4%. Por otra parte las formas de Abanico muestran una constante dominancia en promedio del 43%, mientras que los Alargados disminuyen su frecuencia desde un 24% al 8% (tabla 3, gráfica 3).

Esta asociación sugiere la dominancia de las formas Panicoides en este grupo. Se encuentran géneros de pastos con mecanismos C 3 y C 4 de temperaturas cálidas, y, prefieren de mayores condiciones de humedad que los Chloridoides, sobretodo en verano (Frendlund y Tieszen 1997).

En esta unidad se ve reflejado, el cambio de las condiciones, a un ambiente más húmedo y cálido por la prevaencia de pastos Panicoides, y el declive de las formas Chloridoides. La edad es de 10,175 +/- 105 años AP. Urrutia *et. al.*, (1997) (ver Anexo I c).

“El Diablo” Unidad I

Por último, en la unidad D-I de la tabla 3, tenemos una dominación de las formas Chloridoides y Panicoides, casi como si se alternasen de estrato en estrato. Aunque en la cima parece imperar los Chloridoides. Las formas Pooides escasas se distingue su disminución muy poco. Las formas de Abanico que eran las más representadas se reducen en general, aun cuando marcan una tendencia en la cima de esta unidad. Las formas Alargadas ofrecen un claro aumento de su frecuencia, llegando a un máximo de 45% en C-I-5 para alcanzar el 21% en la cima. Los Puntiformes, por otra parte, muestran altas y bajas, con picos de 13% y 16% que al finalizar llega a 7.5%.

Debido a lo anterior, un clima más benévolo con una marcada humedad es inferido para el establecimiento de las formas Panicoides, que cohabitan al unísono con plantas C4 de las formas Chloridoides (Twiss, 1986). La edad reportada es de 4, 340 +/- 105 años AP. Urrutia *et. al.*, (1997).

Los resultados analizados implican que la vegetación de la cuenca de Babícora, Chihuahua y sus alrededores han soportado una vegetación de pastizales con dominancia de gramíneas C4 a través del Holoceno.

La flora representada en los fitolitos corresponde a especies de pastos de la subfamilia Chloridoideae (C4) y Panicoideae (C3 y C4) principalmente. Estas familias de pastos sugieren que prevalecieron condiciones de aridez con momentos de mayor humedad.

Los fitolitos de ópalo son solo indicadores de unos grupos de pastos; otros segmentos preservados de las plantas son necesarios para la identificación de taxa específico. Por otra parte, al hacer comparaciones con la flora actual, Gentry (1957) describe los pastizales de grama (*Bouteloua*) que se extiende desde los límites septentrionales de Durango hacia el norte, hasta el interior de Arizona, dentro de su concepto de provincia Apachense y añade que estos pastizales de Chihuahua y Durango son continuos y de composición semejante.

Estos pastizales tienen un complejo de especies dominantes: *Bouteloua*, *Andropogon* e *Hilaria*, en climas bastante uniformes semifrío semiárido.

Estos géneros reportados por Gentry (1957), pertenecen a la subfamilia *Chloridoideae* (*Bouteloua*, *Hilaria*) pastos C4 y la subfamilia *Panicoideae* (*Andropogon*) (C4). En el estudio ecológico, fisiográfico y florístico Gentry (1957) concluye que los géneros más representados y distribuidos es *Bouteloua*, siendo *B. gracilis* la especie de ambiente más Xerófito y de mayor distribución, los géneros que acompañan a *Bouteloua* son *Muhlenbergia*, *Andropogon* que se encuentran en cualquier rango de altitud, así como, *Heteropogon* (ausente en las ciénegas), *Lycuru* e *Hilaria*. Dependiendo de la altura y de la humedad, se encuentran géneros como *Aristida*, *Eragrostis*, *Stipa* y en mejores condiciones de suelo y ambientes húmedos *Sporobolus* y *Panicum*.

Estos pertenecen a la Subfamilia *Chloridoideae* (Tribu *Chlorideae*) *Bouteloua*, *Muhlenbergia*, *Hilaria*, *Aristida* y *Eragrostis*. Todos ellos pastos C4, además *Andropogon* (Tribu *Andropogoneae*) y *Panicum* (Tribu *Paniceae*), pertenecen a la subfamilia *Panicoideae* de mecanismo fotosintético C4, *Stipa* un pasto de C3 de menor importancia en la vegetación, pertenece a la subfamilia *Pooideae*.

Gentry (1957) indica que siempre existió una franja de gramíneas ocupando una especie de óptimo espacial durante toda la gama de variación climática ocurrida durante el cuaternario, siendo *Bouteloua gracilis* la especie con mayor representación.

Brown (1984), identifica en *Bouteloua gracilis* y *B. dactyloides* abundantes “Sillas de Montar” como las observados en los diferentes perfiles de manera constante. Zúñiga (1984) encuentra estas formas en la parte central de México también en *B. gracilis*, *B. hirsuta*, *B. curtipendula*, *B. scopiodes*, *Mulembergia rigida*, *M. robusta*, *M. virescens*, *Lycurus phleoides*, *Eragrostis lugens*, *E. intermedia*.

Por otra parte, los estudios realizados por Zúñiga (1984) ilustran como formas bilobuladas del tipo Panicoide están presentes principalmente en *Aristida divarreta*, *A. adscensionis*, *Eragrostis lugens*, *E. intermedia*, *E. tephrosanthos*, *Bouteloua radicata*, *Mulenbergia rigida*, *M. virescens*, *Stipa ichu*, *S. mucronata*; además, encuentra formas redondas de Pooides en *Eragrostis tephrosanthos*, así como *Festuca myuros* y *Stipa mucronata*.

En los trabajos de Ortega (1995^a, 1995^b), las unidades de los perfiles no pueden ser lateralmente correlacionados. Los datos de radiocarbono sugieren que el perfil “El Cano” representa un intervalo corto de tiempo que está cubierto en el perfil de “El Diablo”; además el perfil El Cano presenta una mala preservación de los fitolitos.

La condición deposicional en el sur, en el perfil el Diablo, fue probablemente menos afectada por cambios en el nivel del agua y en la extensión del lago. El área estuvo probablemente bajo el agua la mayor parte del tiempo, lo cual es reflejado por los fitolitos que son abundantes y presentan un buen registro en todos los estratos a diferencia de los perfiles El Cano y Don Beto.

En resumen, Ortega (1995^a, 1995^b) encuentra dos periodos principales de incremento de humedad durante el Pleistoceno tardío (la parte final del pleistoceno) y el Holoceno temprano, caracterizado por altos niveles del lago con una superficie muy extendida.

El análisis de fitolitos indicaría que durante el Pleistoceno tardío entre los 18 000 años AP y hasta los 10 000 años AP ya se han instalado pastizales C4 del tipo Chloridoide y Panicoide pastizales Chloridoides son muy abundantes indicando con ello ambientes calidos, pero la formación de grandes cantidades de partículas de sílice, y el aumento de Panicoides, sugieren condiciones húmedas en muchos estratos analizados en este lapso

de tiempo. En este intervalo de tiempo el análisis de fitolitos muestra momentos de sequía breves, preponderando esta fase húmeda, que permite el crecimiento de estas plantas de ambientes áridos.

Estas condiciones se extienden a lo largo del Holoceno temprano, entre los 10 000 años AP y los 6 000 años AP, es un periodo húmedo, pero muestra momentos muy fuertes de aridez y la humedad va disminuyendo a medida que transcurre el tiempo; además, un predominio marcado de las formas Chloridoideas en el Holoceno medio evidencia la fase más seca.

Este periodo fue seguido de una sequía gradual, con condiciones de aridez cerca de los 6 000 años AP. La extensión del lago se redujo y la región oeste quedó probablemente expuesta a la erosión. Esto fue seguido de otro periodo húmedo y cambios en la extensión y nivel del Lago. Una fase seca que siguió desde alrededor de los 3 000 a los 2 000 años AP. Esta fase árida está marcada por una superficie de erosión muy extendida, de 2 000 años de antigüedad. (Ortega, 1995^a, 1995^b; Urrutia *et. al.*, 1997).

El análisis indica que entre los 6 000 años AP y los 3 000 años AP, indica ambientes poco húmedos y los eventos de mayor sequía aumentan, mientras que a los 3 000 años AP al presente indica un ambiente totalmente seco que se extenderá al presente, aunque algunos estratos, las formas Panicoides aumentan indicando momentos de humedad.

Los fitolitos de ópalo pueden tener la función de evidenciar temperaturas pasadas en la región, pero son necesarios la combinación del análisis de polen, diatomeas y otros fósiles como espículas de esponja y estomatoquistes.

CONCLUSIONES

Los datos obtenidos mediante el análisis de datos del presente trabajo permite afirmar lo siguiente; los sedimentos finos de la cuenca de Babícora, en el norte de Chihuahua, contienen abundantes microfósiles silicios de gramíneas, que representan la flora dejada por las plantas y evidenciada por los fitolitos depositados en una línea de sedimentación, que va de de los 18 000 años AP, al presente.

Los fitolitos encontrados en los perfiles consisten predominantemente de formas de: “Sillas de Montar”, de la subfamilia Chloridoideae categoría más abundantes; le siguen “Bilobulados”, “Polilubulados” y “Cruces” de la subfamilia Panicoideae y muy escasamente formas “Redondas” y de “Media Luna” de la subfamilia Pooideae en la asociación de fitolitos en el sedimento.

También fueron abundantes en muchos estratos unas grandes variedades de formas poliédricas de la clase Abanicos y la clase Alargadas, características de pastos pero no exclusivas, ya que diversos taxa los presentan. Estas clases son complementarias en la interpretación paleoambiental y facilita la determinación de episodios húmedos.

La interpretación taxonómica de los fitolitos de pastos sugiere una contribución en orden de importancia de los géneros: *Bouteloua* y *Muhlenbergia*, que pertenecen a la subfamilia Chloridoideae (Tribu *Chlorideae*) pastos C4. Les sigue *Andropogon* de la subfamilia Panicoideae (Tribu *Andropogoneae*) pasto C4. Así como *Hilaria*, *Aristida* y *Eragrostis*, que pertenecen a la Tribu *Chlorideae* (Subfamilia Chloridoideae), todos ellos pastos C4 y por último escasamente *Stipa* un pasto C3, así como, *Panicum* pasto C4 de ambientes húmedos.

No es posible realizar una correlación directa entre los diferentes estratos, los eventos son considerados individualmente y eslabonados según los marcajes reportados. El registro de fitolitos indica que siempre existieron las gramíneas durante toda la gama de variación climática ocurrida durante el Cuaternario en el Pleistoceno tardío.

La asociación de fitolitos se interpreta como un reflejo de la presencia de un pastizal dominado por el mecanismo fotosintético C 4, con componentes menores en lugares

restringidos, que se extienden, en los momentos de mayor humedad, en el Pleistoceno tardío (18 000 años AP - 10 000 años AP) y el Holoceno reciente (10 000 años AP – 6 000 años AP). Es posible distinguir a través de la constitución del pastizal una disminución de la humedad en el Holoceno medio (6 000 años AP – 3 000 años AP). Los pastos Chloridoides son más abundantes posiblemente reflejado por una marcada aridez en la cobertura de la cuenca durante este reciente periodo de depositación (Holoceno tardío 3 000 años AP al presente).

Los cambios en la composición del pastizal en el tiempo son sólo destellos en los perfiles de Babícora, sugiriendo una relativa consistencia de la flora de gramíneas de zonas áridas desde los 18, 000 años AP. Sin embargo, quedan registradas en la composición del pastizal las frecuentes variaciones climáticas ocurridas en la región. Posiblemente estos fenómenos estén relacionados con el efecto regional del fin del periodo glacial y postglacial. Causando una prolongación del ambiente árido.

Es necesario un extensivo examen de la producción de fitolitos por las plantas modernas en la cuenca, lo cual podría, clarificar la composición taxonómica de las comunidades vegetales características de la región norte de Chihuahua esenciales para el estudio paleoambiental y paleoclimático en el norte de México.

BIBLIOGRAFÍA

- Armitage, P. L., 1975. The extraction and identification of opal phytoliths from the teeth of ungulates, *Journal of Archaeological Science* 2: 187-197.
- Baker, G., 1959. Opal phytoliths in some Victorian soils and “Red Rain” residues, *Australian Journal of Botany* 7: 64-87.
- Baker, G., 1960. Fossil opal-phytoliths, *Micropaleontology* 6: 79-85.
- Barber, D. A., and M. G. T. Shone, 1966. The absorption of silica from aqueous solutions by plants, *Journal of Experimental Botany* 17: 569-578.
- Bartoli, F., and L. P. Wilding, 1980. Dissolution of biogenic opal as a function of its physical and chemical properties, *Soil Science Society of America Proceedings* 44: 873-878.
- Bertoldi de Pomar, H. 1971. Ensayo de clasificación morfológica de los silicofitolitos. *Ameghiniana* 8: 317-328.
- Blackman, E., 1968. The pattern and sequence of opaline silica deposition in rye (*Secale cereale* L.). *Annals of Botany* 32: 207-218.
- Blackman, E., 1969. Observations on the development of the silica cells of the leaf sheath of wheat (*Triticum aestivum*). *Canadian Journal of Botany* 47: 827-838.
- Blackman, E., 1971. Opaline silica in the range grasses of southern Alberta, *Canadian Journal of Botany* 49: 769—781.
- Blackman, E., and D. W. Parry, 1968. Opaline silica deposition in rye (*Secale Cereale* L.) *Annals of Botany* 32: 199-206.
- Bozarth, S. R., 1987. Diagnostic Opal Phytoliths from rinds of selected *cucurbita* species. *American Antiquity. Journal of the Society for American Archaeology*. 55 (2): 607-615.
- Bozarth, S. R., 1990. Diagnostic Opal Phytoliths from pods of selected Varieties of common beans (*Phaseolus vulgaris*). *American Antiquity. Journal of the Society for American Archaeology*. 55 (1): 98-104.
- Brown, D., 1984. Prospects and limits of a phytolith key for grasses in the central United States, *Journal of Archaeological Science* 11: 221-243.
- Bryant, V. M., 1974. The role of coprolite analysis in archaeology, *Texas Archaeological Society Bulletin* 45: 1-28.

- Bukry, D., 1979. Comments on opal phytoliths and stratigraphy of neogene silicoflagellates and coccoliths at deep sea drilling project site 397 off northwest Africa, In *Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project* (B. P. Luyendyk and J. R. Canns, eds.), Vol XLIX, pp. 977-1009, Washington, D. C.: U. S. Printing Office.
- Bukry, D., 1980. Opal phytoliths from the tropical eastern Pacific Ocean, deep sea drilling project leg 54, In *Initial Reports of the deep Sea Drilling Project*, (B. R. Rosendahl and R. Hekinian, eds.), Vol LIV, pp. 575-589, Washington, D. C.: U. S. Printing Office.
- Carbone, V., 1977. Phytoliths as paleoecological indicators, *Annals of the New York Academy of Science* 288: 194-205.
- Commoner, B., and M. L. Zucker, 1953. Cellular differentiation: An experimental approach, In *Growth and Differentiation in Plants*, (W. E. Loomes, ed.), pp. 339-392. Iowa: Ames.
- Deflandre, G. 1963. Les phytolithaires (Erenberg): Nature et signification micropaléontologique, pédologique. Et géologique. *Protoplasma* 57 : 234-259.
- Dimbleby, G., 1978. *Plants and Archaeology*, 2nd Ed. Atlantic Highlands, New Jersey: Humanities Press.
- Dormaar, J.F. and L. E. Lutwick, 1969. Infrared spectra of humic acids and opal phytoliths as indicators of paleosols, *Canadian Journal of Soil Science* 49: 29-37.
- Dunne, T., 1978. Rates of chemical denudation of silicate rocks in tropical catchments. *Nature* 274: 244-246.
- Fredlund, G. Tieszen, L., 1997. Phytolith and Carbon Isotope Evidence for Late Quaternary Vegetation and Climate Change in the Southern Black Hills, South Dakota. *Quaternary Research*. 47, 206-217.
- Fujiwara, H., R. Jones, and S. Brockwell, 1985. Plant opals (Phytoliths) in Kakadu archaeological sites. In *Archaeological Research in Kakadu National Park* (R. Jones, ed.), Special Publication No 13, pp. 155-164, Australian National Parks and Wildlife service, Canberra.
- García C. N., 1984. Estudio bioquímico, mineralógico y fisicoquímico de diversos andosoles en México. *Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid*. Madrid España.

- García C.N., Galicia. P.Ma.S., Aguilera. H.N. 1996 Silicofitolitos de la zona chinampera Xochimilco-Tlahuac, D. F. México. Primer encuentro europeo sobre estudio de fitolitos Madrid. España. *Resúmenes de las comunicaciones pp. 12*
- García, E., 1973. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la Republica Mexicana). *Bol. Inst. de Geogr. UNAM*, 246 p.
- Gentry, H. S., 1957. Los pastizales de Durango Estudio Ecológico Fisiográfico y Florístico. *Instituto Mexicano de Recursos Naturales Renovables*, A. C. México DF. 361 pp.
- Grünberger, O., Reyes, G. V., Janeau, J. L., Edi. 2004. Las playas del desierto Chihuahuense (parte mexicana). *Instituto de Ecologia, A.C. Institut de recherche pour le développement. México*. 360 pp.
- Hayward, D. M., and D. W. Parry, 1980. Scanning electron microscopy of silica deposits in the culms, floral bracts and awns of barley (*Hordeum sativum* L.). *Annals of Botany* 46: 541-548.
- Helbaek, H., 1961. Studying the diet of ancient man, *Archaeology* 14: 95-101.
- Helbaek, H., 1969. Palaeo-ethnobotany, In *Science in Archaeology*, (D. Brothwell and E. Higgs, eds.), pp. 177-185, London: Thames and Hudson.
- Iler, R., 1979. The Chemistry of Silica; Solubility, Polymerization, colloid and Surface Properties, and Biochemistry, *New York: Wiley*.
- Jones L. H. P., and K. A. Handreck, 1965. Studies of silica in the oat plant. III. Uptake of silica from soils by the plant, *Plant and Soil* 23:79-96.
- Jones L. H. P., and K. A. Handreck, 1967. Silica in soils, plants and animals, *Advances in Agronomy* 19: 107-149.
- Jones R. L., 1964. Note on occurrence of opal Phytoliths in some Cenozoics sedimentary rocks, *Journal of Paleontology* 38: 773-775.
- Jones R. L., and A. H. Beavers, 1963. Some mineralogical and chemical properties of plant opal. *Soil Science* 96:375-379.
- Jones R. L., and A. H. Beavers, 1964. Aspects of catenary and depth distribution of opal Phytoliths in Illinois soils, *Soil Science Society of America Proceedings* 28: 413-416.
- Jones R. L., W. W. Hay, and A. H. Beavers, 1963. Microfossils in Wisconsin loess and till from western Illinois and eastern Iowa, *Science* 140: 1222-1224.

- Kaufman, P. B., P. Takeoka, W. C. Bigelow, J. D. Jones and R. Iler, 1981, Silica in shoots of higher plants, In *Silicon and Siliceous Structures in Biological Systems* (T. L. Simpson and B. E. Volcani, eds.), pp. 409-449, New York: Springer-Verlag.
- Lanning, F. C., 1961. Silica and calcium in black raspberries, *Proceedings of the American Horticultural Society* 77: 367-371.
- Lewis, R. O., 1981. Use of opal phytoliths in paleo-environmental reconstructions, *Journal of Ethnobiology* 1: 175-181.
- Livingston, D. A., and W. D. Clayton, 1980. An Altitudinal cline in tropical African grass floras and its paleoecological significance, *Quaternary Research* 13: 392-402.
- Locker, S., and E. Martini, 1986. Phytoliths from the southwest Pacific, site 591. In *Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project*, pp. 1079-1083. Washington, D. C.: U. S. Printing Office.
- McClung de Tapia, E., Serra P. Ma. C., Limon D. 1986. Formative lacustrine adaptation: botanical remains from terremote Tlaltenco, D. F. México. *Journal of Field Archaeology* 16(1): 99-113.
- McClung de Tapia. E., Gonzáles, V. J., Zurita, N. J., Ibarra, M. E. 1996 La domesticación prehispánica de *Amaranthus* sp. *Cuadernos de trabajo. iia 2* INAH. UNAM. Pp.30-32.
- McClung de Tapia. E., Villalpando, J.L., Solleiro. E., Gama. J., 2001 Paleosols in the Teotihuacan Valley, México: evidence for paeloenvironmentand human impact. *Abstracts of VI International Symposium and field workshop on Paleopedology*. p. 30.
- McKeague, J. A., and M. G. Cline, 1963a. Silica in soil solutions I. The form and concentration of dissolved silica in aqueous extracts of some soils, *Canadian Journal of Soil Science* 43: 70-82.
- McKeague, J. A., and M. G. Cline, 1963b. Silica in soil solutions II, The absorption of monosilicic acid by soil and by other substancies, *Canadian Journal of Soil Science* 43: 83-96.
- Melia, M. B., 1980. Distribution and provenance of palynomorphs in northeast Atlantic aerosols and bottom sediments (microfilms), *Ann Arbor: University of Michigan*.

- Metcalfe, C. R., 1960. Anatomy of the Monocotyledons. I. Gramineae. *Oxford, Clarendon Press*: 731.
- Miller, A., 1980. Phytoliths as indicators of farming techniques, *Paper presented at the 45th annual meeting of the society for American Archaeology, Philadelphia*.
- Mulholland, S., 1989. Phytolith shape frequencies in North Dakota grasses: A comparison to general patterns. *Journal of Archaeological Science* 16: 489-511.
- Mullholland, S. C., and Rapp, G. Jr, (Eds. 1992) Phytolith Systematics. *Emerging Issues. Plenum Press, New York*.
- Mullholland, S. C., and Rapp, G. Jr., 1989. Characterization of grass phytoliths for archaeological analysis. *Materials Research Society Bulletin* 14 (3): 36-39.
- Netolitzky, F., 1929. Die Kieselkörper. *Linsbauer's Handbuch der Pflanzenanatomic* 3/1 a: 1-19.
- Ortega, R. J., 1990. Le sommet du remplissage Quaternaire de la Laguna Babícora (Etat de Chihuahua, Nord-Oest du Mexique): reconstitution des paléoenvironnements a partir de la sedimentologie et de la stratigraphie. *These de Doctorat de l'Université Louis Pasteur de Strasbourg, France*, 345 pp.
- Ortega, R. J., 1995a. Los paleoambientes Holocénicos de la Laguna de Babícora, Chihuahua, México. *Geofísica Internacional*, 34: 107-116.
- Ortega, R. J., 1995b. Correlación estratigráfica de los depósitos cuaternarios de la laguna de Babícora, Chihuahua, México. *Geofísica Internacional*, 34:117-129
- Parry, D. W., and F. Smithson, 1958. Silification of bulliform cells in grasses. *Nature* 181:1549-1550.
- Parry, D. W., and F. Smithson, 1964. Types of opaline silica depositions in the leaves of British grasses. *Annals of Botany* 28:169-185.
- Parry, D. W., M. J. Hodson, and A.G. Sangster, 1984. Some recent advances in studies of silicon in higher plants. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B* 304:537-549.
- Pearsall, D. M. and M. Trimble, 1984. Identifying past agricultural activity through soil phytolith analysis: A case study from the Hawaiian Islands. *Journal of Archaeological Science* 11:119-133
- Pearsall, D. M., 1978. Phytolith analysis of archaeological soils: Evidence for maize cultivation in formative Ecuador. *Science* 199:177-1778.

- Pearsall, D. M., 1979. The application of ethnobotanical techniques to the problem of subsistence in the Ecuadorian formative. Ph.D. dissertation, Urbana: *University of Illinois*.
- Pease, D. S., 1967. Opal Phytoliths as indicators of paleosols. *Unpublished master's thesis*, New México State University, University Park.
- Piperno, D. R., 1984. A Comparison and differentiation of phytoliths from maize and wild grasses: Use of morphological criteria. *American Antiquity* 49:361-383.
- Piperno, D. R., 1985. Phytolith analysis and tropical paleo-ecology: Production and taxonomic significance of siliceous forms in New World plant domesticates and wild species. *Review of Paleobotany and Palynology* 45:185:228.
- Piperno, D. R., 1988. *Phytolith Analysis: An Archaeological and Geological Perspective*. New York, Academic Press: 280 p.
- Powers, A. H. and Gilbertson, D. D. 1987. A simple Preparation technique for the Study of Opal Phytoliths from Archaeological and Quaternary Sediments. *Journal of Archaeological Science*. 14: 529-535.
- Rosen, A. M., 1987. Phytolith studies at Shiqmin. In Levy, TE. Ed, Shiqmin I: Studies concerning Chalcolithic societies in the northern Negev Desert, Israel (1982-1984) *British Archaeological Reports, International Series* 356: 243-249.
- Rovner, I., 1971. Potential of opal phytoliths for use in paleoecological reconstruction. *Quaternary Research* 1:343-359.
- Rovner, I., 1983. Plant opal phytolith analysis: Major advances in archaeobotanical research. In *advances in Archaeological Method and Theory* (M. B. Schiffer, ed.), Vol. 6, pp. 225-266. New York: Academic Press.
- Rovner, I., 1986b. Downward percolation of phytoliths in stable soils: A non-issue. In *Plant Opal Phytolith Analysis in Archaeology and Paleoecology* (I. Rovner, ed.) pp. 23-30. Occasional Papers No.1 of the Phytolitharien Raleigh: North Carolina State University.
- Rovner, I., ed 1986a. Plant opal phytolith analysis in archaeology and paleoecology: Proceedings of the 1984 Phytolith Research Workshop, North Carolina State University, Raleigh: North Carolina, *Occasional Papers of The Phytolitharien* No.1 147 p.
- Sangster, A. G., 1970. Intracellular silica deposition in mature leaves in three species of the Gramineae. *Annals of Botany* 34: 245-257.

- Sangster, A. G., and D. W. Parry, 1969. Some Factors in relation to bulliform cell silicification in the grass leaf. *Annals of Botany* 33:315-323.
- Sangster, A. G., and D. W. Parry, 1981. Ultrastructure of silica deposits in higher plants. In Simpson, TL and Volcani, B. E. Eds. *Silicon and Siliceous Structures in Biological Systems*. New York, Springer-Verlag: 383-407.
- Sase, T. and Kondo, R. 1974. (The study of opal phytoliths in the humus horizon of buried volcanic ash soils in Hokkaido) Obihiro Chikusan Daigaku Gakujutsu Kenkyo Hokoku Dai-I-Bu, Japan (*Research Bulletin of Obihiro Zootechnical University, Series I*) 8: 465-483.
- Siever, R., 1957. The silica budget in the sedimentary cycle. *American Mineralogist* 42:821-841.
- Smithson, F., 1956. Plant opal in soil. *Nature* 178:107.
- Smithson, F., 1958. Grass opal in British soils. *Journal of Soil Science* 9:148.
- Starna, W. A., and D. A. Kane, Jr., 1983. Phytoliths, archaeology and, caveats: A case study from New York. *Man in the Northeast* 26:21-31.
- Tejero, D. J., Granillo, V. M., Ed. 1988. *Plantae Introducción al estudio de las plantas con embrión. UNAM Iztacala. México.* 303 p.
- Thorn, V.C., 2004. Phytolith evidence for C-4 dominated grassland since the early Holocene at Long Pocket northeast of Queensland, Australia. *Quaternary Research* 61: 168-180.
- Twiss, P. C., 1983. Dust deposition and opal phytoliths in the Great Plains. *Transactions of the Nebraska Academy of Science* XI: 73-82.
- Twiss, P. C., 1986. Morphology of opal phytoliths in C3 and C4 Grasses. In *Plant Opal Phytolith Analysis in Archaeology and Paleoecology* (I. Rovner, ed.), pp 4-11. Occasional Papers No.1 of the Phytolitharien Raleigh: North Carolina State University.
- Twiss, P. C., E. Suess, and R. M. Smith, 1969. Morphological classification of grass phytoliths. *Soil Science Society of America Proceedings* 33:109-115.
- Urrutia, F. J., Ortega, R. J., and Cruz G. R., 1997. Rock magnetic study of late Pleistocene-Holocene sediments from the Babícora lacustrine basin, Chihuahua northern México. *Geofísica Internacional*. 10 (2): 77-86.
- Vaclav. S., 1997. Cycles of Life. Civilization and the Biosphere. *Scientific American Library*. Pp. 20-25

- Vallejo G. E., 2002. Morfología e intemperismo de fitolitos, en suelos modernos y paleosuelos de la parte central del eje neovolcánico. Tesis de Doctorado. *Facultad de Ciencias. UNAM. México.*
- Wilding, L. P., and L. R. Drees, 1971. Biogenic opal in Ohio soils. *Soil Science Society of America Proceedings* 35:1004-1010.
- Wilding, L. P., and L. R. Drees, 1973. Scanning electron microscopy of opaque opaline forms isolated from forest soils in Ohio. *Soil Science Society of America Proceedings* 37:647-650.
- Wilding, L. P., and L. R. Drees, 1974. Contributions of forest opal and associated crystalline phases to fine silt and clay fractions of soils. *Clays and Clay Mineralogy* 22:295-306.
- Witty, J. E., and E. G. Knox, 1964. Grass opal in some chestnut and forested soils in north central Oregon. *Soil Science of American Proceedings* 28:685-688.
- Yoshida, S., Ohnishi, Y. and Kitagishi, K. 1962. Histochemistry of silica in Rice Plant II. Localization of silicon within rice tissues. *Soil Science and Plant Nutrition* 8: 36-41.
- Zúñiga G. G., 1984. Fitólitos del Suelo en el ecotono entre el pastizal de *Hilaria cenchroides* y el bosque de encino en el valle de México *E.N.C.B.*
- Zurita, N. J. 1987 Análisis de fitólitos de muestras de suelos del sitio arqueológico de Guachimonton, Teuchitlan, Jal. Tesis de Licenciatura. *ENAH. México.*

Anexo I

Muestra las dataciones radiométricas realizadas con C^{14} convencional de los diferentes perfiles a) “Don Beto”, b) “El Cano” y c) “El Diablo”, obtenidos por Ortega (1995^a), Urrutia *et. al.*, (1997). En los cuales destaca los diferentes estratos su profundidad así como las edades, así como el porcentaje de los diferentes tamaños de partículas (arena, limo y arcilla) y su distribución en el perfil.

PERFIL "DON BETO"

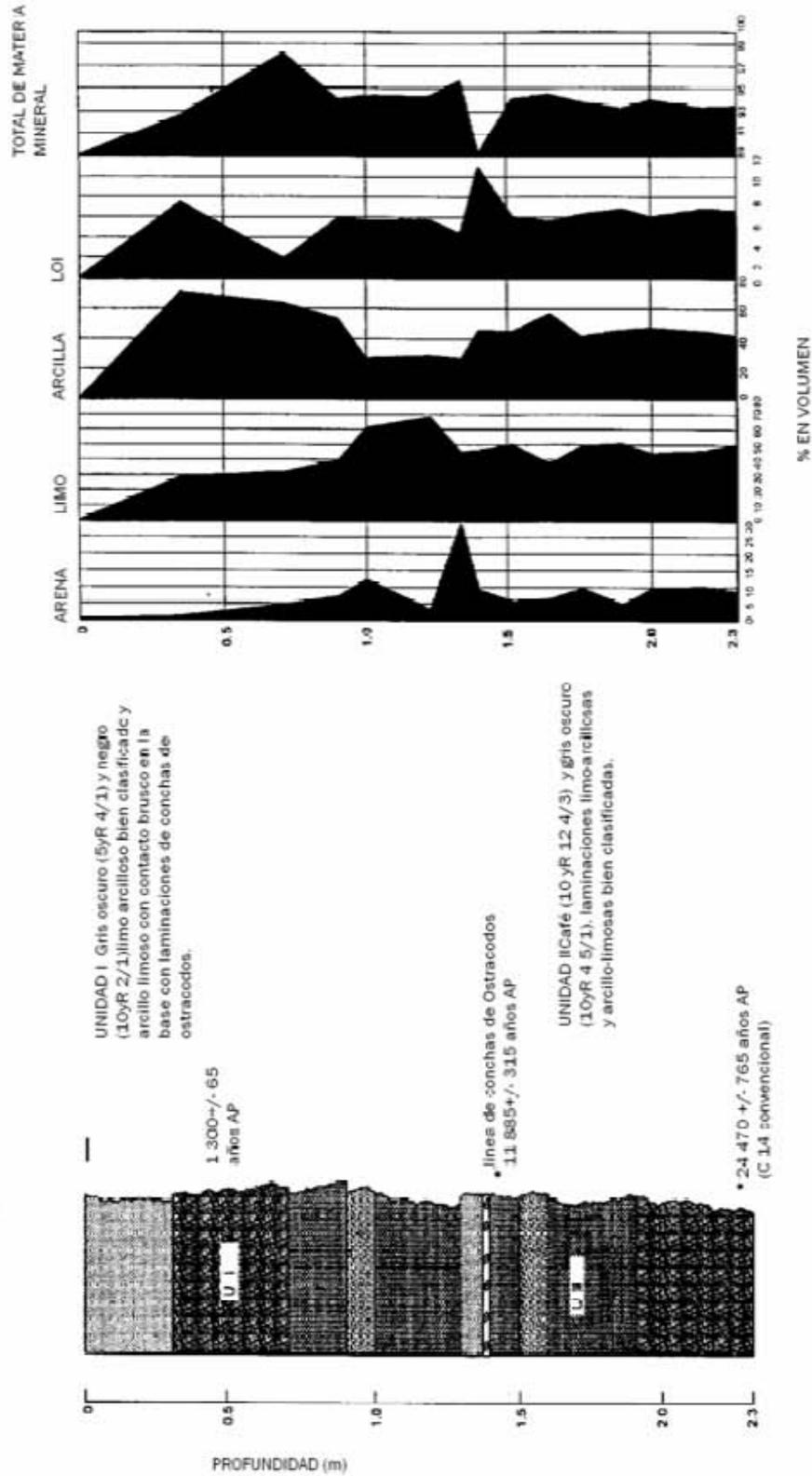


Figura a) Perfil Don Beto

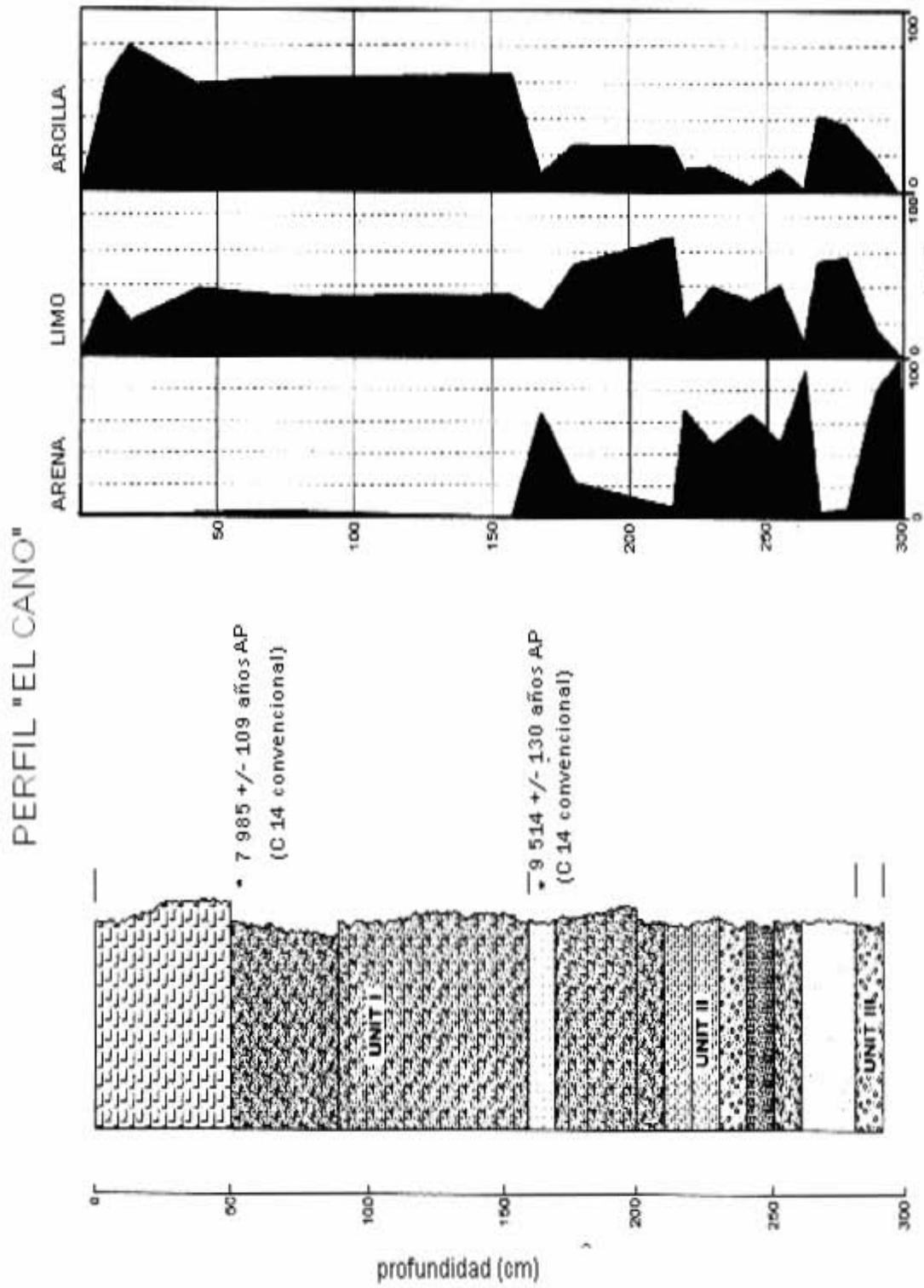


Figura b) Perfil "El Cano"

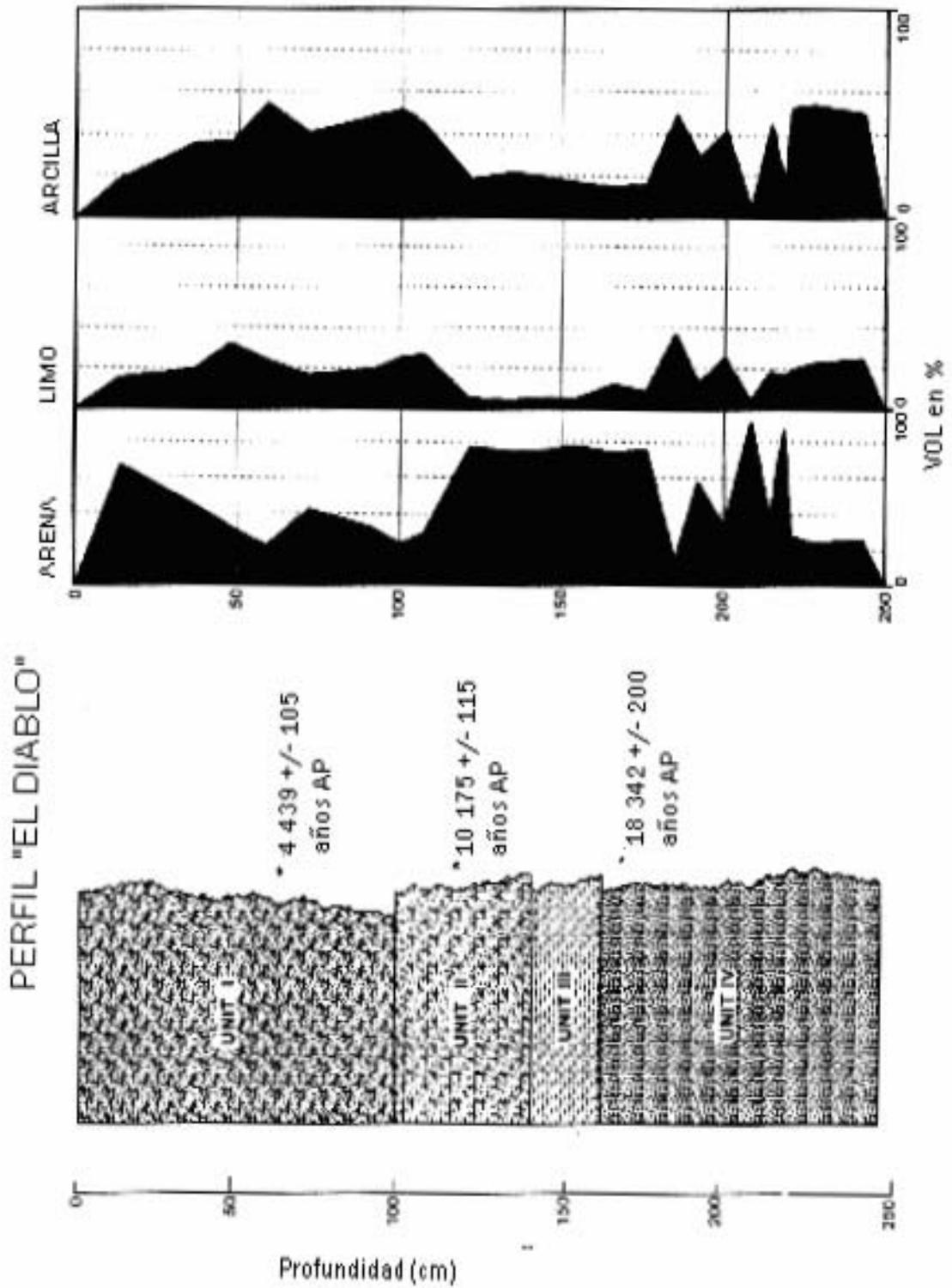


Figura c) Perfil "El Diablo"

Anexo II.

Los siguientes esquemas muestran las asociaciones de Fitolitos observados, indicando el perfil y la secuencia de estratos, Clase I: Poides, Clase II: Cloridoides, Clase III: Panicoides, Clase IV: Elongados, Clase V: Trapezoides, Clase VI: Puntiformes.

Perfil “Don Beto”

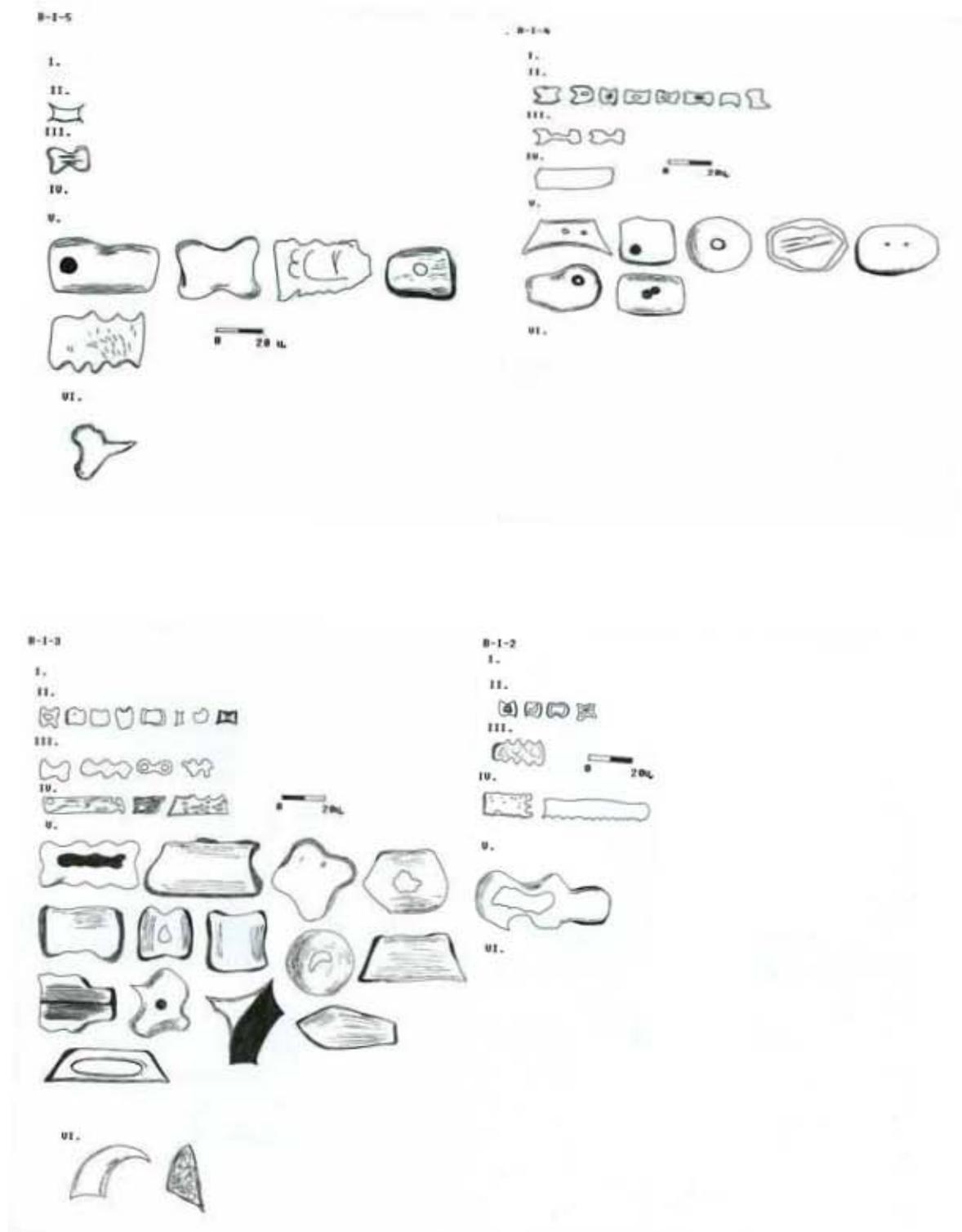


Figura I. Muestra los esquemas realizados correspondientes a los estratos 5, 4, 3 y 2 de la unidad I del perfil “Don Beto” (B-I-5---B-I-2). El orden corresponde a la secuencia de eventos de más recientes a más antiguos. La barra indica los micrómetros de referencia. Los números romanos dentro de los esquemas corresponden a las clases de fitolitos.

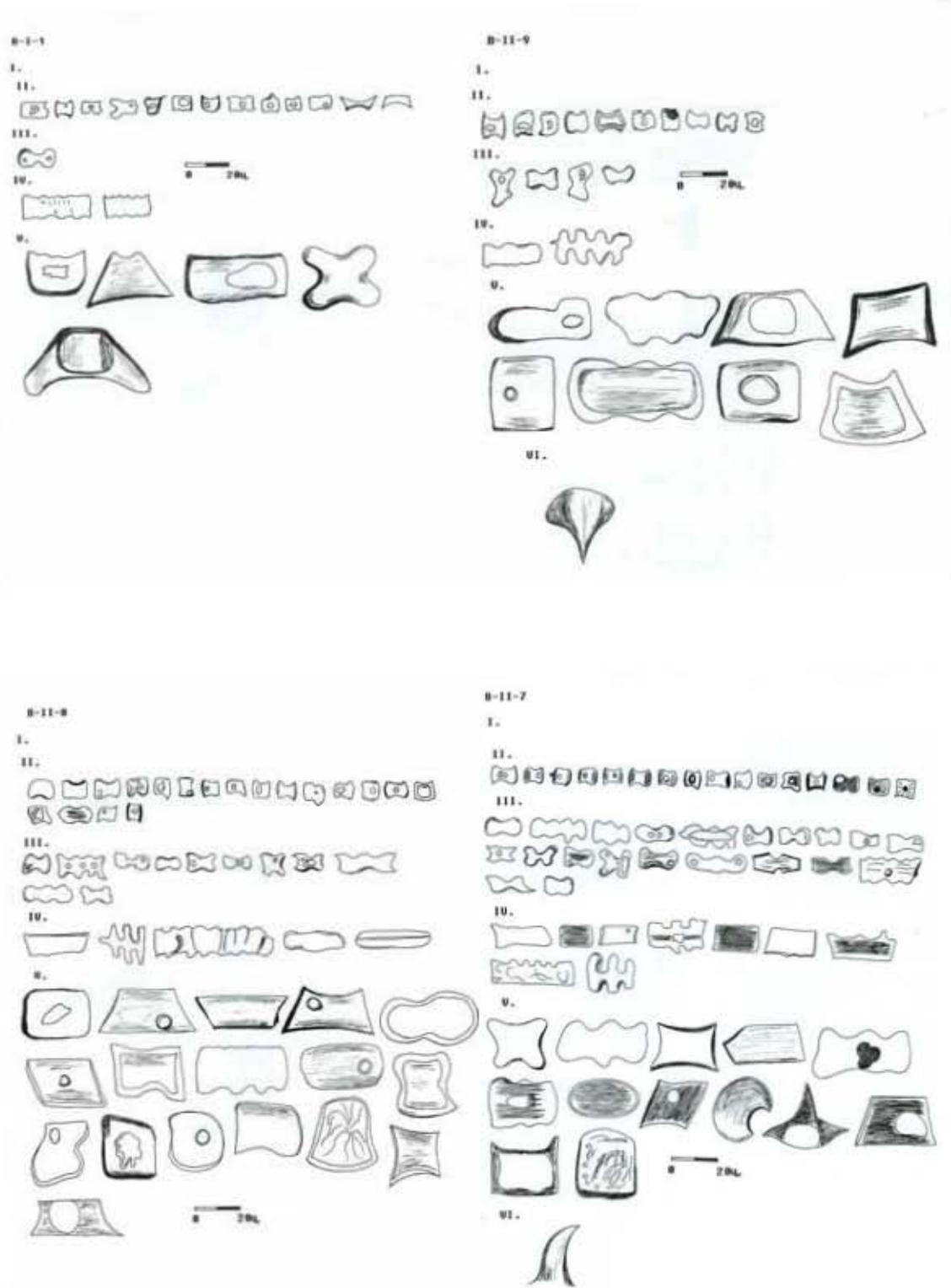


Figura II. Muestra los esquemas realizados correspondientes a los estratos (B-I-1) de la unidad uno y B-II-9, B-II-8 y B-II-7 de la unidad dos, del perfil “Don Beto”. El orden corresponde a la secuencia de eventos de más recientes a más antiguos. La barra indica los micrómetros de referencia. Los números romanos dentro de los esquemas corresponden a las clases de fitolitos.

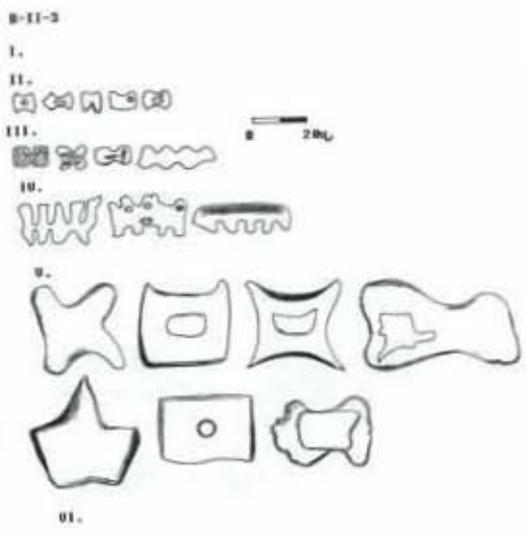
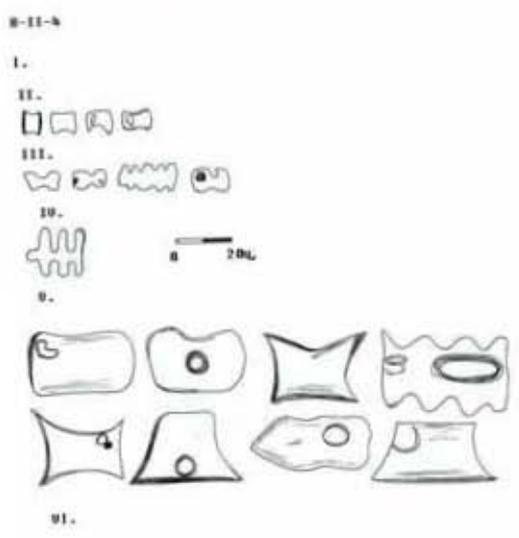


Figura III. Muestra los esquemas realizados correspondientes a los estratos B-II-6, B-II-5, B-II-4 y B-II-3 de la unidad dos, del perfil "Don Beto". El orden corresponde a la secuencia de eventos de más recientes a más antiguos. La barra indica los micrómetros de referencia. Los números romanos dentro de los esquemas corresponden a las clases de fitolitos.

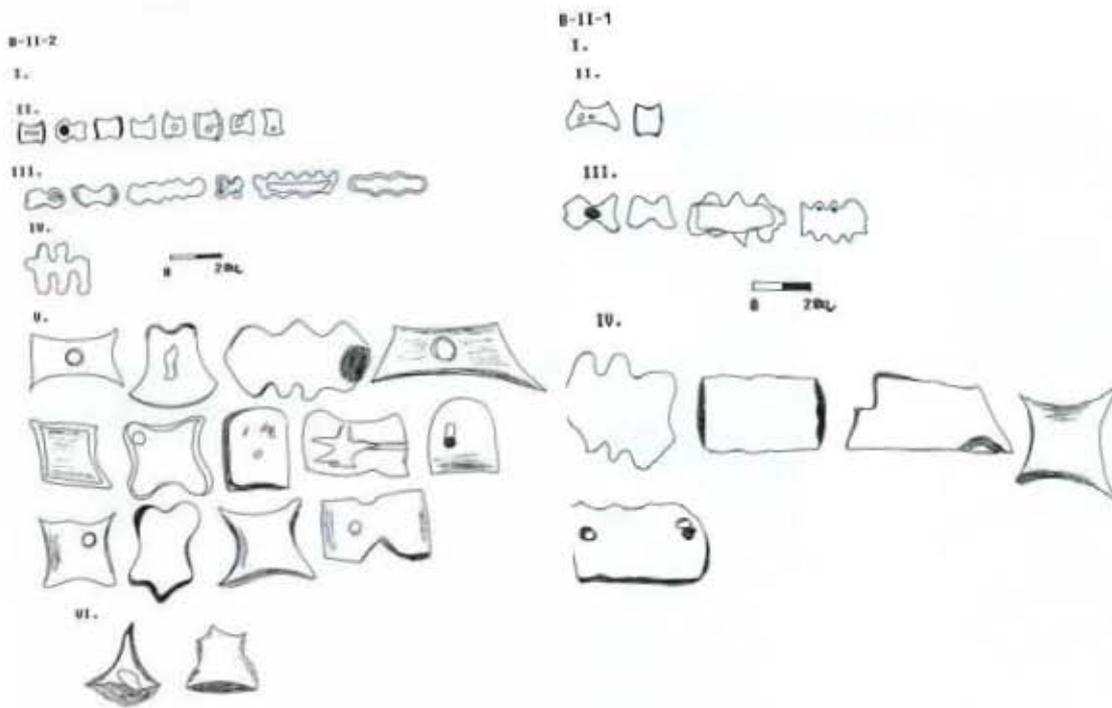


Figura IV. Muestra los esquemas realizados correspondientes a los estratos B-II-2 y B-II-1 de la unidad dos, del perfil "Don Beto". El orden corresponde a la secuencia de eventos de más recientes a más antiguos. La barra indica los micrómetros de referencia. Los números romanos dentro de los esquemas corresponden a las clases de fitolitos.

Perfil “El Cano”



Figura V. Muestra los esquemas realizados correspondientes a los estratos C-I-5, C-I-4, C-I-3 y C-I-2 de la unidad uno, del perfil “El Cano”. El orden corresponde a la secuencia de eventos de reciente a más antiguo. La barra indica los micrómetros de referencia. Los números romanos dentro de los esquemas corresponden a las clases de fitolitos.



Figura VI. Muestra los esquemas realizados correspondientes a los estratos C-II-9, C-II-8, C-II-7 y C-II-6 de la unidad dos, del perfil "El Cano". El orden corresponde a la secuencia de eventos de reciente a más antiguo. La barra indica los micrómetros de referencia. Los números romanos dentro de los esquemas corresponden a las clases de fitolitos.

Perfil “El Diablo”

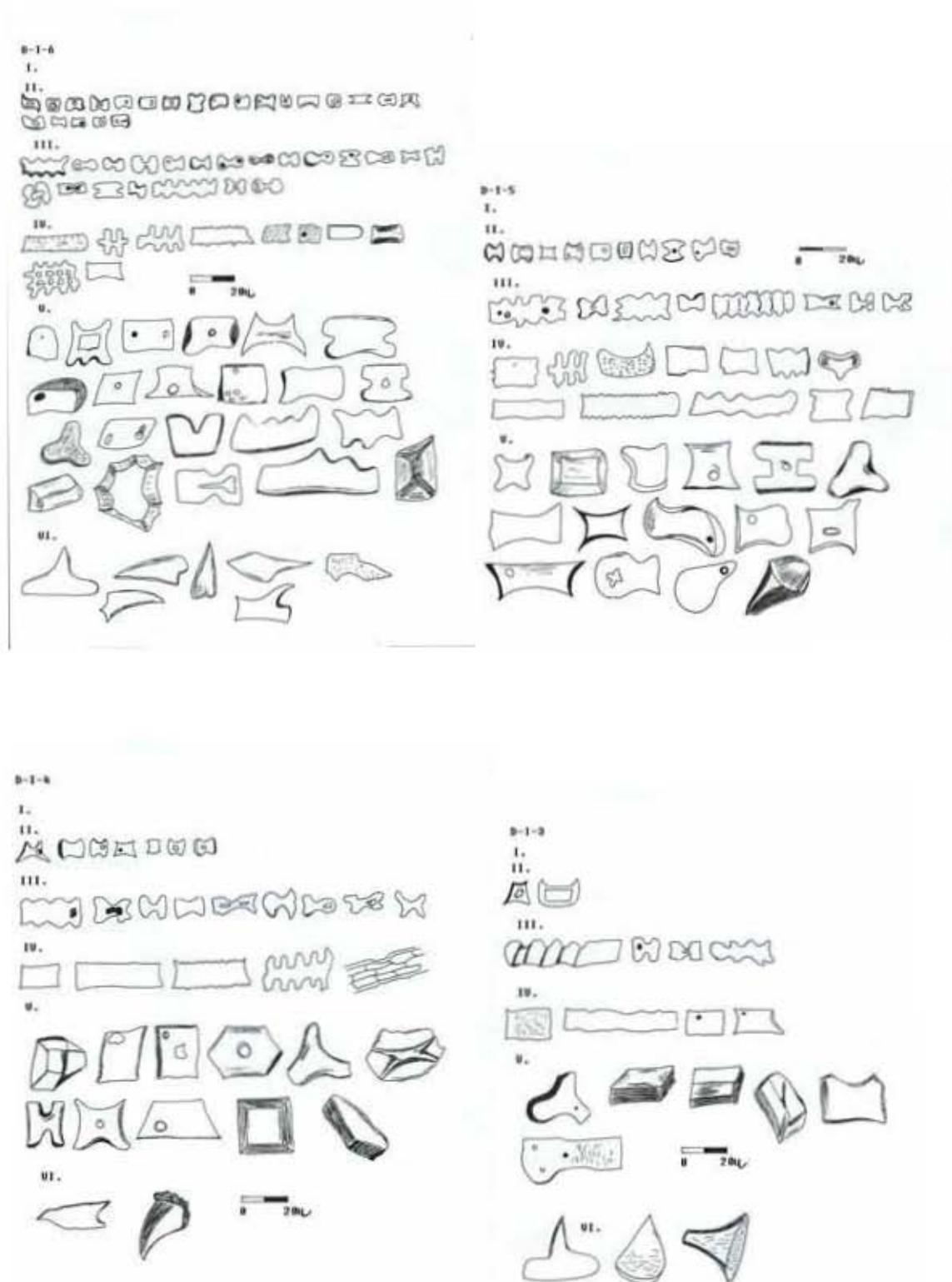


Figura VII. Muestra los esquemas realizados correspondientes a los estratos D-I-6, D-I-5, D-I-4 y D-I-3 de la unidad uno, del perfil “El Diablo”. El orden corresponde a la secuencia de eventos de reciente a más antiguo. La barra indica los micrómetros de referencia. Los números romanos dentro de los esquemas corresponden a las clases de fitolitos.

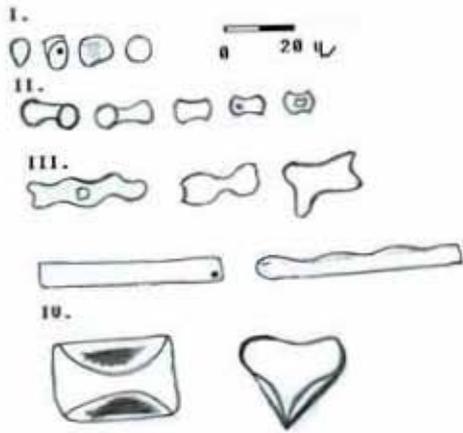


Figura VIII. Muestra los esquemas realizados correspondientes a los estratos D-I-2, D-I-1, D-I-1' de la unidad uno y D-II-3 de la unidad dos del perfil "El Diablo". El orden corresponde a la secuencia de eventos de reciente a más antiguo. La barra indica los micrómetros de referencia. Los números romanos dentro de los esquemas corresponden a las clases de fitolitos.

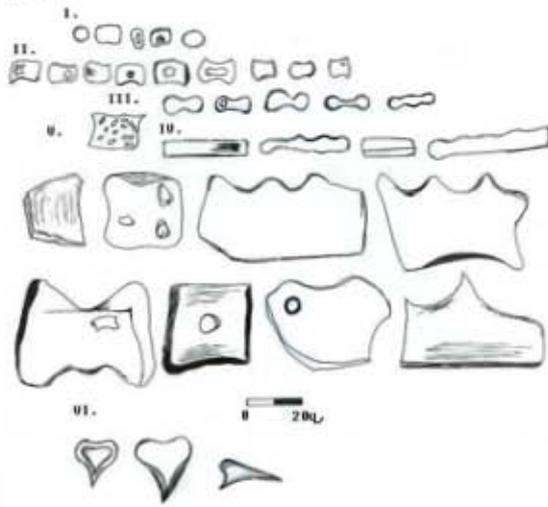


Figura IX. Muestra los esquemas realizados correspondientes a los estratos D-II-2, D-II-1 de la unidad dos y los estratos D-III-3 y D-III-2 de la unidad tres del perfil "El Diablo". El orden corresponde a la secuencia de eventos de reciente a más antiguo. La barra indica los micrómetros de referencia. Los números romanos dentro de los esquemas corresponden a las clases de fitolitos.

D-III-1



D-IV-11



D-IV-10



D-IV-9

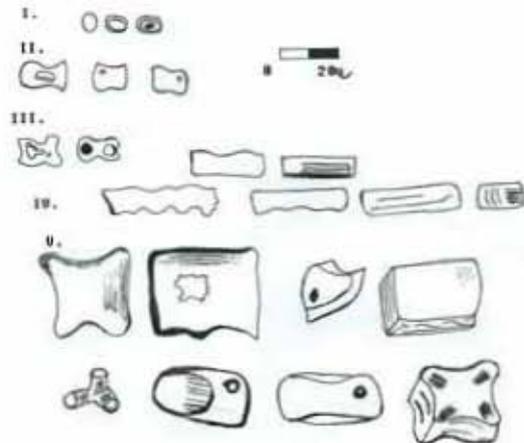


Figura X. Muestra los esquemas realizados correspondientes a los estratos D-III-1, de la unidad tres y D-IV-11, D-IV-10 y D-IV-9 de la unidad cuatro, del perfil "El Diablo". El orden corresponde a la secuencia de eventos de reciente a más antiguo. La barra indica los micrómetros de referencia. Los números romanos dentro de los esquemas corresponden a las clases de fitolitos.

D-IV-8



D-IV-7



D-IV-6



D-IV-5

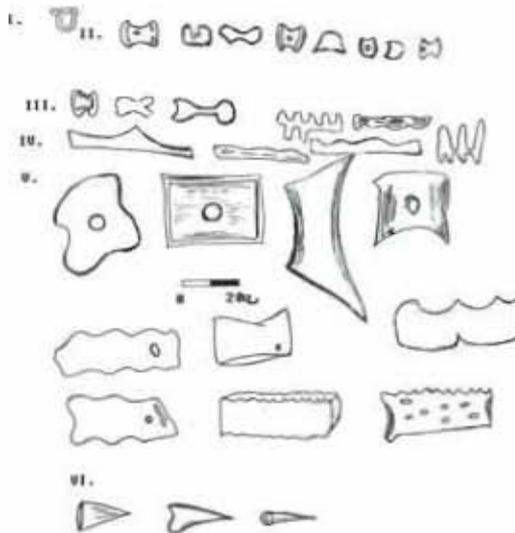


Figura XI. Muestra los esquemas realizados correspondientes a los estratos D-IV-8, D-IV-7, D-IV-6 y D-IV-5 de la unidad cuatro, del perfil "El Diablo". El orden corresponde a la secuencia de eventos de reciente a más antiguo. La barra indica los micrómetros de referencia. Los números romanos dentro de los esquemas corresponden a las clases de fitolitos.



Figura XII. Muestra los esquemas realizados correspondientes a los estratos D-IV-4, D-IV-3, D-IV-2 y D-IV-1 de la unidad cuatro, del perfil "El Diablo". El orden corresponde a la secuencia de eventos de reciente a más antiguo. La barra indica los micrómetros de referencia. Los números romanos dentro de los esquemas corresponden a las clases de fitolitos.