

## Diversidad de microfósiles en la Formación Tarahumara, Sonora

Hugo Beraldi-Campesi\* y Sergio R. S. Cevallos-Ferriz

Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México  
Circuito de la Investigación Científica, Ciudad Universitaria, Coyoacán, 04510 México, D.F., México.

\* hberaldi@servidor.unam.mx

### RESUMEN

*Una gran diversidad de microfósiles permineralizados se encuentran embebidos en pedernal asociado a estromatolitos que afloran en la localidad de Huépac, en una secuencia volcanosedimentaria del Cretácico Superior (Turoniano–Maastrichtiano), perteneciente a la Formación Tarahumara, en Sonora, México. La diversidad está representada por fósiles de microalgas, polen, esporas, conidiosporas, fragmentos de plantas y de artrópodos, acritarcos y estructuras indefinidas de origen biológico, que reflejan el tipo de organismos que vivieron asociados al cuerpo de agua y parte de la biota circundante. Nuestras observaciones apoyan la interpretación de un ambiente de depósito lacustre asociado a magmatismo en esta porción de la Formación. Este trabajo documenta parte de la microflora y microfauna del Cretácico Superior del noroeste de México.*

*Palabras clave: microfósiles, estromatolitos, Formación Tarahumara, Cretácico, Huépac, Sonora, México.*

### ABSTRACT

*A great diversity of permineralized microfossils are found embedded in chert associated to stromatolites that crop out in the Huépac locality, an Upper Cretaceous (Turonian–Maastrichtian) volcano-sedimentary sequence of the Tarahumara Formation, in Sonora, Mexico. The diversity is represented by fossils of microalgae, pollen, spores, conidiospores, fragments of plants and arthropods, acritarchs and undefined structures of biological origin, reflecting the type of organisms that lived associated to the water body and part of the surrounding biota. Our observations support the interpretation of a lacustrine depositional environment associated to magmatism in this portion of the Formation. This work documents part of the Upper Cretaceous microflora and microfauna of the northwestern Mexico.*

*Key words: microfossils, stromatolites, Tarahumara Formation, Cretaceous, Huépac, Sonora, Mexico.*

### INTRODUCCIÓN

Al noreste del poblado de Huépac, en la parte centro-oriental de Sonora, México (Figura 1), aflora una secuencia sedimentaria que forma parte de la Formación Tarahumara (Cretácico: Campaniano–Maastrichtiano) (McDowell *et al.*, 2001; Roldán-Quintana, 2002). A lo largo de esa

secuencia ocurren horizontes estromatolíticos, en ocasiones con intercalaciones de lentes y bandas de pedernal color negro, el cual se halla íntimamente asociado a la laminación estromatolítica. El pedernal contiene una gran cantidad de fósiles, de los cuales se han estudiado plantas Haloragáceas tipo *Myriophyllum* sp. (Hernández-Castillo y Cevallos-Ferriz, 1999), raíces de palmeras tipo *Arecaceae*

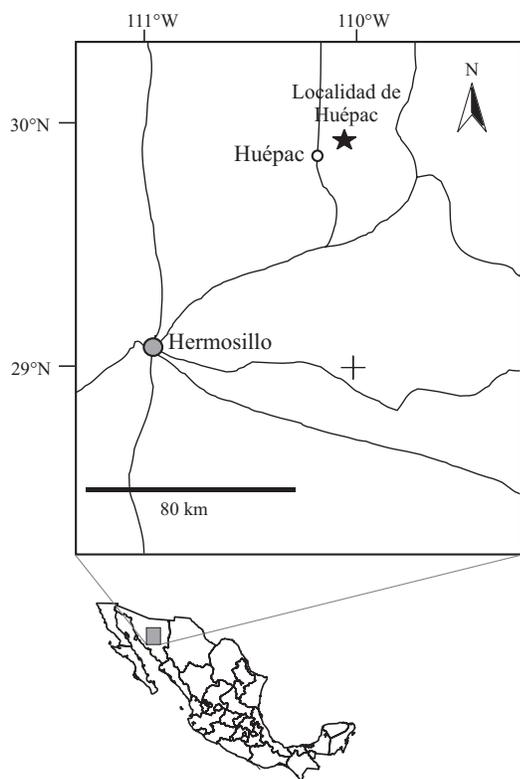


Figura 1. Mapa con la localización de la localidad de Huépac.

(Cevallos-Ferriz y Ricalde-Moreno, 1995) y microfósiles, entre los que destacan cianobacterias, clorofitas, diatomeas y granos de polen (Beraldi-Campesi, 2000; Beraldi-Campesi *et al.*, 2004). Cabe mencionar que las diatomeas fósiles de esta localidad han ampliado el rango estratigráfico de las diatomeas Pennales dulceacuícolas en aproximadamente 10 Ma (Chacón-Baca *et al.*, 2002).

De los 94 morfotipos de microfósiles inicialmente descritos (Beraldi-Campesi, 2000), el 10% se ha identificado, estableciendo parentescos entre los fósiles y géneros de cianobacterias y algas (Beraldi-Campesi *et al.*, 2004). El resto de los microfósiles es aquí presentado. Aunque no identificados plenamente, son parte de la diversidad biológica microscópica que existió en la localidad de Huépac y constituyen una fuente de información complementaria para un entendimiento más profundo de este ecosistema acuático del Cretácico.

## ÁREA DE ESTUDIO

La localidad de Huépac se localiza a unos 12 km al NE del poblado de Huépac, Sonora, México (29°57'40" N y 10°08'21" W) (Figura 1). Ahí se midió una sección de aproximadamente 80 m de altura que es parte de la formación Tarahumara (Jacques-Ayala, com. pers. 2003). Dicha formación contiene mayoritariamente depósitos volcánicos

y volcánoclasticos que se encuentran en varias localidades del estado de Sonora (Roldán-Quintana, 2002). Los afloramientos de rocas sedimentarias en la sección de Huépac están constituidos por areniscas tobáceas, areniscas, lutitas y carbonatos de diferente composición (lutitas y limos calcáreos, *wackestones*, *boundstones* y *packstones* fosilíferos), que en algunos niveles contienen bandas y lentes de pedernal negro (Figura 2). El ambiente de depósito en esta parte de la Formación ha sido interpretado como de cuenca intra-arco, de ambiente lacustre (Roldán-Quintana, 2002).

Por la composición litológica y el contenido fósil, la sección de Huépac se ha correlacionado con las secciones tipo del miembro medio de la Fm. Tarahumara en Cerro El Obispo y Arroyo La Ulvalama–Cerro Tarais, al sur de la localidad (Ricalde-Moreno, 1994; McDowell *et al.*, 2001). Estas secciones contienen rocas volcánicas con edades radiométricas de  $72.5 \pm 0.5$  Ma y  $69.7 \pm 0.6$  Ma, en la base y la cima de la secuencia sedimentaria, respectivamente (McDowell *et al.*, 2001), resultando una edad aproximada de  $71 \pm 1$  Ma para la porción que concierne a los fósiles de Huépac.

## MÉTODOS

Las muestras de pedernal que contienen fósiles provienen de un solo horizonte estratigráfico (Figura 2), cercano a la base de la sección. El pedernal es de color negro. El contenido fósil fue observado y fotografiado a partir de láminas delgadas, obtenidas por el siguiente proceso: se corta el pedernal al tamaño de un portaobjetos de vidrio. Se pule una de las caras de cada fragmento y se monta en el portaobjetos usando PVC-termoplástico y se deja secar. Se pule la roca con abrasivos de silicón (No. 600) hasta alcanzar 30  $\mu$ m de espesor. Las muestras se cubren con Bálsamo de Canadá y, tras dejar secar, están listas para ser observadas al microscopio (en este caso un Olympus BH-2 con sistema fotográfico SZH y película Ilford ISO 50).

## RESULTADOS

El pedernal estudiado se encuentra intercalado entre la laminación estromatolítica en forma de lentes y bandas (Figura 3a). Algunos estromatolitos no presentan estas intercalaciones (Figura 3b y 3c). El pedernal contiene una gran diversidad de microfósiles observables en tres dimensiones, con un excelente grado de conservación.

En lámina delgada se observa que la coloración y el contenido fósil son cambiantes de una porción a otra. La mayoría de los fósiles aparecen en las partes donde el sedimento es de color más claro y de textura más homogénea.

El pedernal contiene microfósiles filamentosos, cocales, elipsoidales, agregados en colonias o separados individualmente, así como fragmentos de plantas, ostrácodos, restos de artrópodos y esporas. También son observables



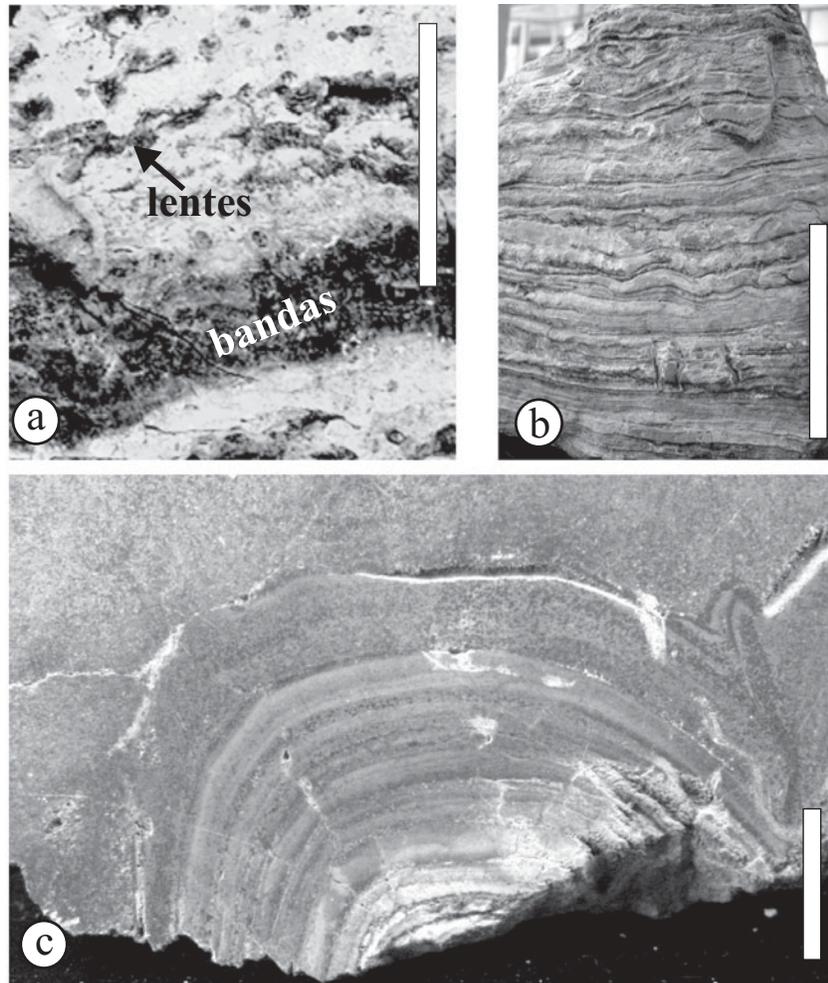


Figura 3. a) Detalle de los lentes y bandas de pedernal asociados a los estromatolitos de Huépac (escala = 5 cm); b) Laminación estromatolítica sin bandas o lentes de pedernal (escala = 10 cm); c) Corte transversal de la cresta de un domo estromatolítico que no presenta pedernal (escala = 2 cm).

5, foto 11). El ancho total del filamento es de 16  $\mu\text{m}$ . Las células varían de 27 a 36  $\mu\text{m}$  de largo y de 9 a 13  $\mu\text{m}$  de ancho. El perímetro celular en corte transversal tiende a ser hexagonal (Figura 5, foto 9).

**Tipo 7 (Figura 5, foto 12)**

Células oblongas u ovoides, en cúmulos de cuatro o más células de contorno remarcado. No se aprecia ningún tipo de envoltura, ornamentación en la pared o contenidos. Los diámetros varían de 7.5 a 10  $\mu\text{m}$ . Pueden estar en uno, dos, o tres planos. El arreglo es variable: pueden estar formando racimos, en tétradas o en péntadas. Los conjuntos así formados, pueden a su vez estar unidos a otros conjuntos (sincenobios).

**Polen**

**Tipo 8 (Figura 5, fotos 13–14)**

Granos de polen bisacados de Pinaceae. Los cuerpos

centrales son esféricos u ovalados, de textura lisa; miden de 17 a 20  $\mu\text{m}$  de diámetro. Los sacos laterales son reticulados o granulados; miden de 6 a 9  $\mu\text{m}$  de diámetro y son más oscuros que el cuerpo central.

**Tipo 9 (Figura 5, fotos 15–17)**

Grano de polen semejante al de Apiaceae, ovalado, tricolporado. Los colpos son anchos en la mitad del grano y van adelgazándose hacia los polos; en la parte central de cada colpo se observa un poro. Estos detalles se aprecian en planos distintos (Figura 5, fotos 16–17). Mide 32.5  $\mu\text{m}$  de largo y 22.5  $\mu\text{m}$  de ancho.

**Tipo 10 (Figura 5, foto 18)**

Grano de polen periporado de Caryophyllaceae, esférico, con nueve poros visibles en dos planos diferentes: seis en uno y tres en otro. Mide 27.5  $\mu\text{m}$  de diámetro; los poros miden de 4 a 5  $\mu\text{m}$  de diámetro. La parte superficial del grano presenta diminutas perforaciones que le dan una apariencia rugosa y granulada.

## Estructuras fúngicas

### Tipo 11 (Figura 5, foto 19)

Conidio fúngico tipo dictiospora, de *Alternaria* sp. Tiene tres septos transversales y uno longitudinal, mide 27.5  $\mu\text{m}$  de largo por 15  $\mu\text{m}$  de ancho.

### Tipo 12 (Figura 5, foto 20)

Filamentos fúngicos (hifas) septados y ramificados, posiblemente de *Alternaria* sp. No presentan contenido ni están asociadas a estructuras que sugieran esporulación. No tienen coberturas externas. Pueden tener de 4 a 6  $\mu\text{m}$  de ancho. La separación de un septo a otro varía de 10 a 12  $\mu\text{m}$ . Pueden encontrarse asociados a restos vegetales.

### Tipo 13 (Figura 5, foto 21)

Dos estructuras esféricas pedunculadas, una de 45  $\mu\text{m}$  y la otra de 50  $\mu\text{m}$  de diámetro. El pedúnculo es una pequeña proyección cónica que parte de la estructura circular. El contorno es oscuro y remarcado, no presentan contenido, y tienen una fina capa externa engrosada que llega a verse granulosa. Se encuentran dentro de las valvas de un ostrácodo.

### Tipo 14 (Figura 5, foto 22)

Células pareadas tipo ascospora. Una de las células es siempre cónica, mientras que la otra es siempre redondeada. En el punto de contacto entre ambas, la pared se hace totalmente plana. No hay ningún tipo de vaina o envoltura. No se observa contenido. Son hialinas. Las células cónicas pueden ir de 3.5 a 6  $\mu\text{m}$  de largo y 6  $\mu\text{m}$  de ancho; las células redondeadas tienen 5  $\mu\text{m}$  de largo y 6  $\mu\text{m}$  de ancho.

## Restos de plantas

### Tipo 15 (Figura 5, foto 23)

Corte transversal incompleto de un estele (Angiosperma?, Gymnosperma?) rodeado por un parénquima de células poligonales de 10 a 20  $\mu\text{m}$  de diámetro.

### Tipo 16 (Figura 5, foto 24)

Corte transversal de un posible fruto. Tiene 600  $\mu\text{m}$  de largo y 500  $\mu\text{m}$  de ancho. El centro es un espacio vacío limitado por una membrana muy fina y tenue de la cual parten radios muy marcados. Entre los radios se observan células regularmente esféricas, de arreglo parenquimatoso.

### Tipo 17 (Figura 5, foto 25)

Corte transversal incompleto de un tallo, con peridermis circular de tres capas, rodeada de un parénquima de células que varían de las 10 a las 30  $\mu\text{m}$  de diámetro. Algunas de las células son poligonales, otras son ovaladas y circulares. En la parte central se encuentra plegada y amorfa una estructura ennegrecida, granulosa y con algunas células globulares.

### Tipo 18 (Figura 5, foto 26)

Corte transversal de una raíz, posiblemente de monocotiledónea. La médula es muy tenue, mide 80  $\mu\text{m}$  de diámetro. Se observa un espacio entre la médula y la peridermis, que tiene un diámetro total de 120  $\mu\text{m}$ ; ésta a su vez se encuentra rodeada de diminutos pelos radiculares que aparecen también en corte transversal, es decir que recorren longitudinalmente a la raíz; éstos no sobrepasan 1  $\mu\text{m}$  de diámetro.

### Tipo 19 (Figura 5, foto 27)

Traqueidas asociadas a restos vegetales (Gymnosperma?). El arreglo de las traqueidas es paralelo, longitudinal con respecto a las fibras vegetales y en varios planos. La espiral en la parte más ensanchada mide hasta 17  $\mu\text{m}$ , en la más constreñida 12  $\mu\text{m}$ . El espesor de cada traqueida no sobrepasa las 2  $\mu\text{m}$ .

## Esporas

### Tipo 20 (Figura 5, foto 28)

Espora trilete regularmente esférica, con pared externa gruesa y semiestratificada de 12  $\mu\text{m}$  de espesor. El diámetro total es de 80  $\mu\text{m}$ . Pueden observarse 3 estrías que parten del centro radialmente y equidistantes unas de otras, sin llegar al contorno interno.

## Restos de artrópodos

### Tipo 21 (Figura 5, foto 29)

Fragmento mandibular de artrópodo. La estructura es curva, dentada en la parte cóncava, con 5 puntas ordenadas de mayor a menor y que siguen la curvatura externa, y no en forma de gancho como ocurre en la mayoría de los escolecodontos. En la parte basal de la estructura dentada se aprecia un adelgazamiento seguido por un tagma, similar

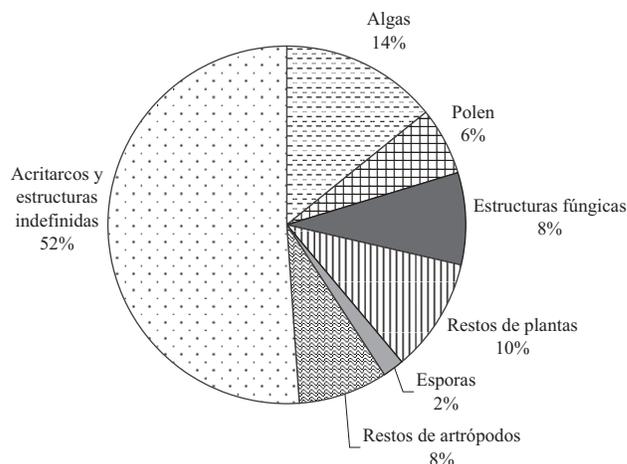


Figura 4. Gráfica con los porcentajes de abundancia de los diferentes tipos de microfósiles provenientes del pedernal de Huépac.

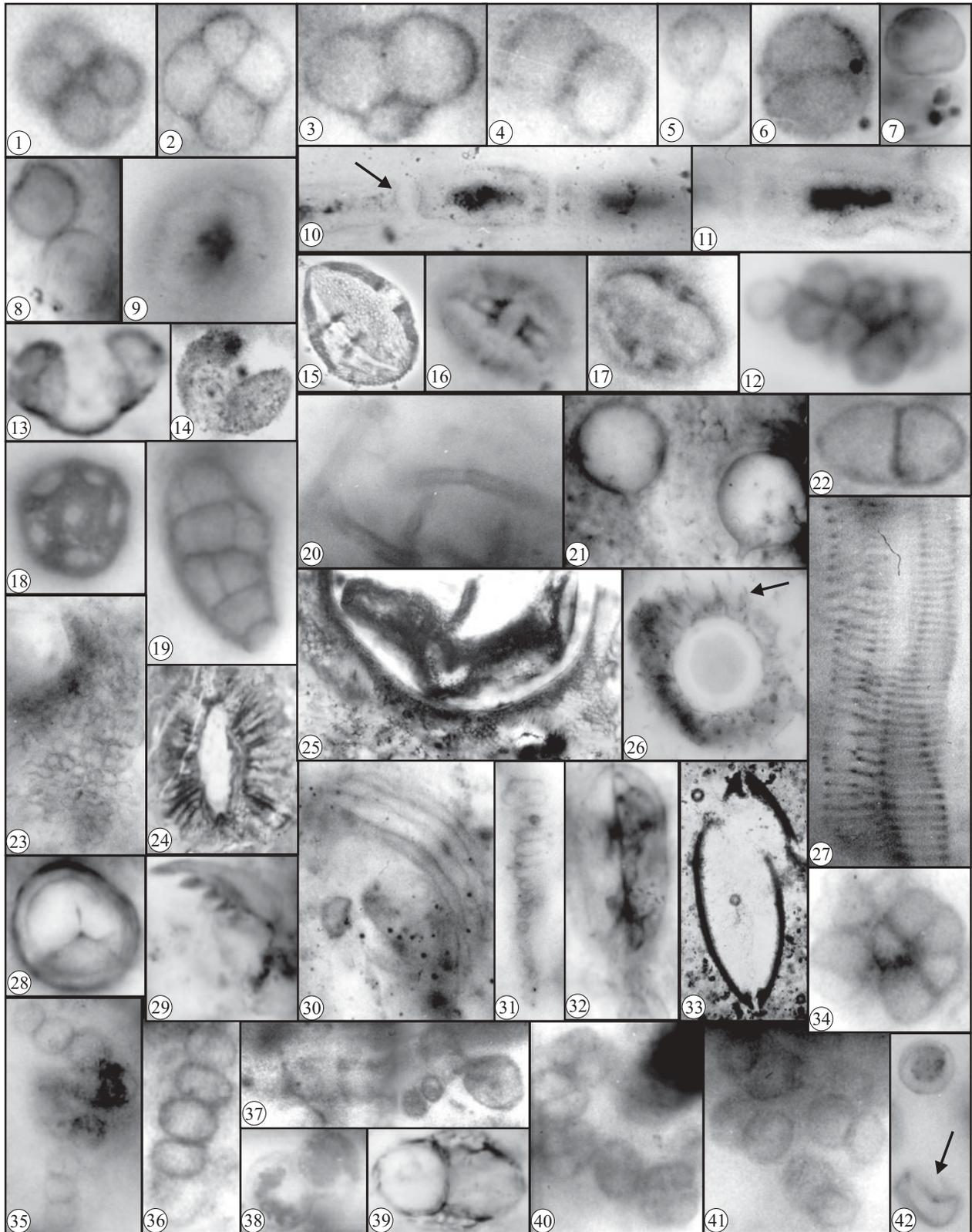


Figura 5. **Algas:** 1) Tétrada de células con espacio intercelular y vaina hialina; 2) Tétrada de células con espacio intercelular reducido y paredes celulares aplanadas por el contacto con las células vecinas; 3) Trío de células, dos mayores y una pequeña, con paredes celulares planas en el contacto de las células isométricas; 4) y 5) Pares de células ovaladas, sin contenido y sin vainas externas; 6) Células semicirculares envueltas por una vaina simple; 7) Células con posibles magnetosomas al interior; 8) Células pareadas sin contenido, con achatamiento en uno de los polos y vaina externa; 9) Corte transversal de un filamento, mostrando la forma hexagonal, la vaina externa y el contenido central; 10) Células del tricoma con concavidad polar (flecha), ensanchamiento central y vaina externa; 11) Célula redondeada de la parte terminal del tricoma; 12) Conjunto de células oblongas formando un racimo. **Polen:** 13) y 14) Granos de polen bisacados de la familia Pinaceae; 15) Grano de polen actual de Apiaceae. *Continúa en la página siguiente.*

a la coyuntura de una mandíbula móvil. Su color hialino sugiere que esta estructura se formó por ecdisis. La parte más ancha tiene 20  $\mu\text{m}$  y el largo total es de 60  $\mu\text{m}$ .

**Tipo 22 (Figura 5, fotos 30–31)**

Estructuras acostilladas, hialinas, arregladas metaméricamente en paralelo. Pueden ser vistas en corte transversal o longitudinal (Figura 5, fotos, 30–31). El arco de una punta a otra de las estructuras es de aproximadamente 90  $\mu\text{m}$ , y el ancho de cada una varía de 2 a 5  $\mu\text{m}$ .

**Tipo 23 (Figura 5, foto 32)**

Copépodo con dos prolongaciones externas segmentadas, que parten del extremo más estrecho del cuerpo principal. El contenido está desorganizado, compartimentalizado asimétricamente a lo largo del interior, la mayoría de un solo lado; éste se aprecia en forma de membranas plegadas que confinan espacios separados, dentro de los cuales aparecen diminutos corpúsculos. El contorno externo es delgado. El largo de la parte anterior es de 175  $\mu\text{m}$  y el ancho de 83  $\mu\text{m}$ ; los pedúnculos miden 88  $\mu\text{m}$  de largo cada uno.

**Tipo 24 (Figura 5, foto 33)**

Corte sagital de un ostrácodo. En los polos se observa la separación de cada valva. El largo es de 1.2 mm y el ancho de 500  $\mu\text{m}$ .

**Acritarcos y estructuras indefinidas**

**Tipo 25 (Figura 5, foto 34)**

Estructuras con células trapezoidales, hialinas, de contorno remarcado y arregladas en forma de espiral, con 6 o más células. La pared entre las células es plana, mientras que por fuera son redondeadas. No se observaron contenidos ni ornamentaciones. El diámetro celular varía de 4 a 6  $\mu\text{m}$ .

**Tipo 26 (Figura 5, fotos 35–36)**

Células esféricas u ovaladas que forman pseudofilamentos. Las células son de contorno remarcado. No hay ornamentación ni cubiertas externas. En algunas se aprecian posibles contenidos a manera de puntos, parietales o centrales. En ocasiones los pseudofilamentos parecen plegarse sobre sí mismos (Figura 5, foto 35) formando “nudos” en donde se vuelve difícil apreciar unitariamente a las células. El diámetro de las células varía de 4 a 7  $\mu\text{m}$ .

**Tipo 27 (Figura 5, foto 37).**

Estructura reproductora algal o fúngica compuesta básicamente por tres partes: un brazo con dos pequeñas esferas en la base, cabeza y un tronco, que es la parte más alargada y está septada. El largo total (desde la cabeza hasta el extremo de la parte septada) es de 80  $\mu\text{m}$ ; la cabeza mide 20  $\mu\text{m}$  de diámetro, y el tronco septado mide 25  $\mu\text{m}$  de ancho, y la separación entre septos es de 10  $\mu\text{m}$ . Las pequeñas esferas miden 5  $\mu\text{m}$  cada una. Se encuentra asociado con una gran cantidad de células de 5 a 6  $\mu\text{m}$  de diámetro apenas distinguibles.

**Tipo 28 (Figura 5, foto 38)**

Cuerpos globulares solitarios o por pares, de forma regularmente esférica u ovalada. En el caso de que se encuentren solitarios, siempre habrá otros cercanos del mismo tipo que estén pareados. No hay recubrimiento, pero en ocasiones la pared externa presenta pliegues que acompañan a la misma curvatura del contorno. En todos los casos hay contenido disperso u organizado que ocupa gran parte del interior. Los cuerpos miden de 15 a 19  $\mu\text{m}$  de diámetro.

**Tipo 29 (Figura 5, foto 39)**

Posible grano de polen, conformado por células pareadas, con pared externa remarcada, hialinas y sin contenido, de forma redondeada hacia los extremos. Se observan dos sacos laterales semicirculares, ubicados a la altura de la línea de sutura, uno de cada lado. Estos sacos están finamente reticulados y son más pequeños que las células. La línea de sutura es perpendicular al eje longitudinal, el cual mide 55  $\mu\text{m}$ . Las células miden 32.5 y 40  $\mu\text{m}$  de diámetro; los sacos miden aproximadamente 25  $\mu\text{m}$  de diámetro.

**Tipo 30 (Figura 5, foto 40)**

Células que forman tétradas en un solo plano y concatenadas entre sí; no tienen ningún tipo de vaina externa. Las paredes son planas cuando están en contacto las células; nunca son más de cuatro células por cenobio. No se aprecian espacios intercelulares centrales. Las células miden de 6 a 7  $\mu\text{m}$  de diámetro.

**Tipo 31 (Figura 5, foto 41)**

Células de forma circular o ligeramente ovaladas, de 9–15  $\mu\text{m}$  de diámetro. Sin contenido. Se aprecia una delgada vaina hialina individual. Se encuentran arregladas en colonias de pocos individuos. Las colonias se encuentran

Figura 5 (Continuación). 16) y 17) Grano de polen fósil semejante al de Apiaceae, mostrando los colpos en diferentes planos; 18) Grano de polen periporado de Caryophyllaceae. **Hongos:** 19) Conidiospora de *Alternaria* sp; 20) Hifas septadas y ramificadas; 21) Estructuras esféricas pedunculadas y cubierta granulosa; 22) Ascospora. **Plantas:** 23) Corte transversal y parcial de un estele con células del parénquima; 24) Corte transversal de un fruto; 25) Corte transversal de un tallo, mostrando diferentes arreglos celulares; 26) Corte transversal de una raíz, rodeada de pelos radiculares (flecha); 27) Traqueidas. **Esporas:** 28) Espora trilete. **Artrópodos:** 29) Resto mandibular de un artrópodo; 30) y 31) Estructuras acostilladas posiblemente pertenecientes al cuerpo de un artrópodo; 32) Corte longitudinal de un copépodo (Crustacea); 33) Corte longitudinal de un ostrácodo. **Acritarcos:** 34) Células trapezoidales con arreglo espiralado; 35) y 36) Células ovaladas formando pseudofilamentos; 37) Estructura reproductora algal o fúngica; 38) Cuerpos globulares pareados con contenido disperso; 39) Posible grano de polen con un par de células mayores y dos sacos laterales de textura superficial rugosa; 40) Tétradas de células que forman cadenas; 41) Células ovaladas con vainas individuales, sin contenido; 42) Células con contenido compacto, en ocasiones colapsadas (flecha).

generalmente alejadas unas de otras.

**Tipo 32 (Figura 5, foto 42)**

Células esféricas de 20  $\mu\text{m}$  de diámetro. Tienen contenido compacto, esférico, de 7  $\mu\text{m}$  de diámetro. El contorno celular es muy claro. No se observan vainas externas. En ocasiones se encuentran colapsadas y aplanadas.

**Tipo 33 (Figura 6, fotos 1–2)**

Estructuras regularmente esféricas, de superficie rugosa y pilosa. La superficie es densa y gruesa, de hasta 2  $\mu\text{m}$ . No se observan contenidos. El diámetro total varía de 15 a 17  $\mu\text{m}$ .

**Tipo 34 (Figura 6, fotos 3–4)**

Células esféricas, hialinas, de contorno delgado. La mayoría presenta un recubrimiento a veces casi imperceptible; de no ser evidente este recubrimiento, en su lugar hay un halo blanco alrededor de las células con el mismo espesor que las que lo presentan. No se observan contenidos. Miden de 72 a 75  $\mu\text{m}$  de diámetro.

**Tipo 35 (Figura 6, foto 5)**

Conjunto de células ovaladas, hialinas y con contenido compacto ovalado y central. No se observa ningún recubrimiento. Las células varían de 7 a 9  $\mu\text{m}$  en el diámetro mayor.

**Tipo 36 (Figura 6, fotos 6–7)**

Estructuras con forma oblonga. Tienen una vaina hialina de espesor variable. El contorno interno es irregular. En el interior se observan corpúsculos diseminados. Miden 90  $\mu\text{m}$  de largo por 65  $\mu\text{m}$  de ancho. La vaina tiene espesores de 5  $\mu\text{m}$  a 14.5  $\mu\text{m}$ .

**Tipo 37 (Figura 6, foto 8)**

Estructuras luniliformes, confinadas a espacios circulares de 60 a 70  $\mu\text{m}$  de diámetro. Se arreglan en pequeños conjuntos de varios miembros.

**Tipo 38 (Figura 6, foto 9)**

Estructuras luniliformes y arqueadas confinadas en un espacio circular; algunas pierden la forma luniliforme dependiendo del plano en que se miren, y adoptan una forma reniforme. Pueden observarse coberturas o paredes externas que acompañan a su curvatura. No se observa contenido. El diámetro de los círculos en que se encuentran miden de 110 a 115  $\mu\text{m}$ . Los agregados se componen de por lo menos 10 individuos, cercanos siempre a restos vegetales.

**Tipo 39 (Figura 6, fotos 10–12)**

Estructuras fusiformes, estriadas longitudinalmente. Estas estrias son siempre dos y parecen líneas de dehiscencia, que pueden encontrarse formando una abertura (foto 10), se agregan por conjuntos de seis u ocho individuos, aunque algunas pueden estar aisladas. Son hialinas, no presentan

contenido. Miden de 25 a 30  $\mu\text{m}$  de largo y de 15 a 17  $\mu\text{m}$  de ancho.

**Tipo 40 (Figura 6, fotos 13–14)**

Células regularmente esféricas, en ocasiones un poco ovaladas. Tienen contenido compacto central o semicéntrico. La pared es simple, sin envolturas o vainas, a veces de contorno irregular (Figura 6, foto 14). Los diámetros varían de 35 a 60  $\mu\text{m}$ . No se encuentran asociadas a algún tipo de organismo en particular, son más bien solitarias y destacan entre la demás flora por su tamaño y por los contenidos tan marcados.

**Tipo 41 (Figura 6, foto 15)**

Célula esférica, solitaria, de pared simple. La textura es lisa en la parte central, mientras que la pared es rugosa. En el interior de la célula hay un contenido compacto circular muy marcado envuelto en un velo de forma trapezoidal y membranoso. El diámetro total es de 120  $\mu\text{m}$ .

**Tipo 42 (Figura 6, foto 16)**

Estructura esférica hialina de 75  $\mu\text{m}$  de diámetro que parece estar liberando a una estructura esférica de 70  $\mu\text{m}$  de diámetro, de color oscuro, por una abertura en uno de los polos. Ninguna tiene contenido.

**Tipo 43 (Figura 6, foto 17)**

Estructura pedunculada con forma ovovada de 50  $\mu\text{m}$  de diámetro, que se encuentra dentro de un halo hialino circular de 85  $\mu\text{m}$  de diámetro. La estructura tiene dos corpúsculos internos, uno circular y otro alargado. En la parte externa al halo se observan cúmulos pilosos desorganizados y entramados, perpendiculares al perímetro.

**Tipo 44 (Figura 6, foto 18)**

Posible estructura reproductora algal, apreciablemente deformada e invaginada. La superficie tiene textura rugosa y ornamentada con estrías o surcos que pueden recorrer total o parcialmente el diámetro, por donde pudieron ser expulsadas las esporas una vez maduras. No se observa contenido. Mide 30  $\mu\text{m}$  de diámetro.

**Tipo 45 (Figura 6, fotos 19–20)**

Estructuras regularmente circulares, con pared externa delgada y hialina. Las paredes externas son siempre circulares u ovoidales. Tienen contenido disperso y complejo. Pueden encontrarse en pequeños grupos de 3 y 4 individuos o solitarias, pero siempre cercanas unas de otras. Los diámetros varían de 115 a 125  $\mu\text{m}$ ; el espesor de las paredes externas va de 6 a 10  $\mu\text{m}$ . Se encuentran en zonas de transición entre la laminación del estromatolito y el pedernal.

**Tipo 46 (Figura 6, fotos 21–22)**

Estructuras circulares, a veces ovoidales, con pared externa delgada. No se observa contenido. Pueden encontrarse en pequeños grupos de tres y cuatro individuos o

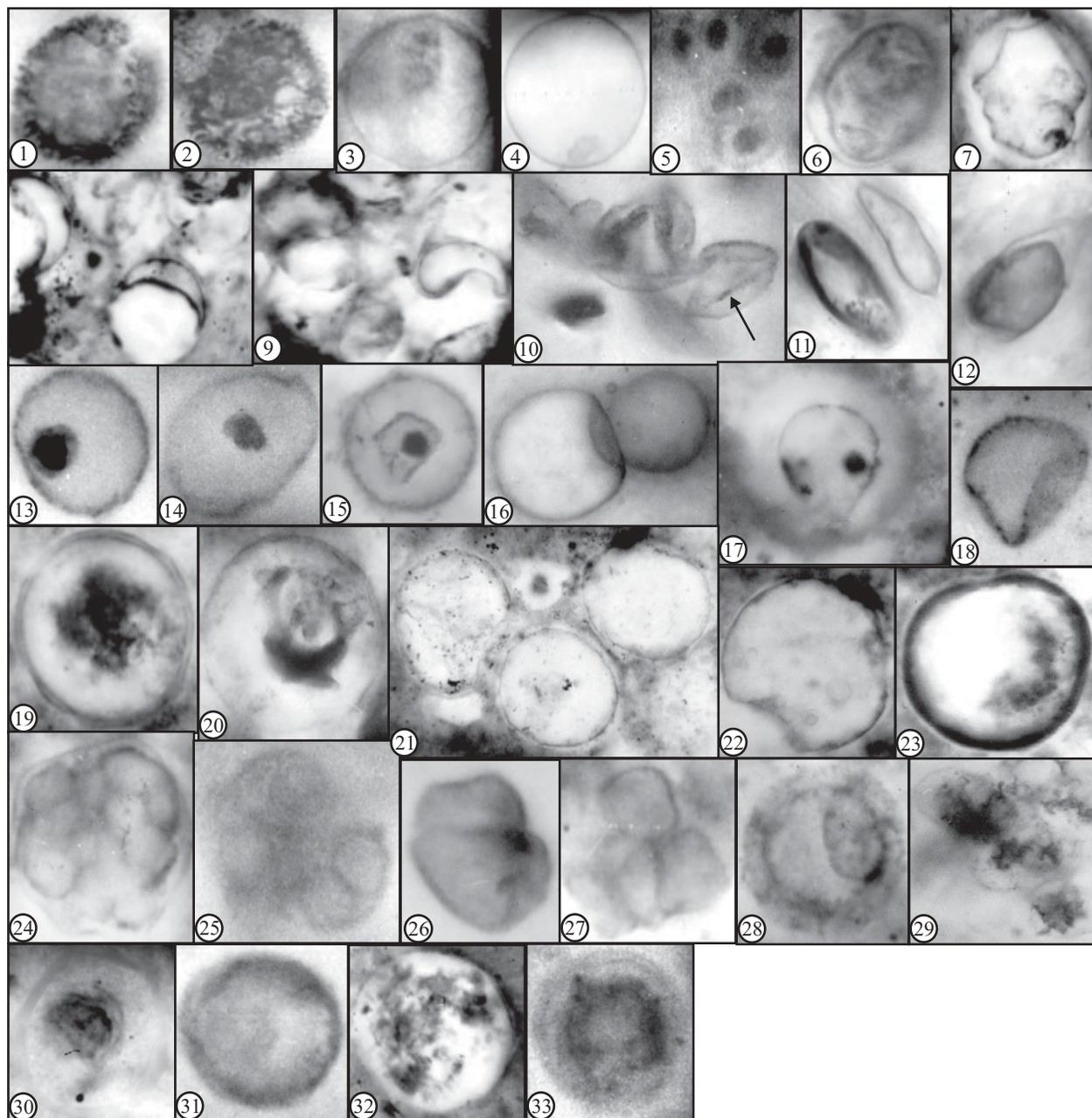


Figura 6. **Acrítarcos:** 1) y 2) Estructuras con superficie pilosa y rugosa; 3) y 4) Células hialinas con vaina externa; 5) Conjunto de células con contenido compacto; 6) y 7) Estructuras oblongas con cobertura hialina y contenido complejo y corrugado; 8) Estructuras luniliformes confinadas a espacios esféricos; 9) Estructuras con forma reniforme o luniliforme con cobertura externa; 10), 11) y 12) Estructuras fusiformes y con contenido, en ocasiones se observan aberturas (foto 10, flecha); 13) y 14) Células de contorno irregulares, con contenido central compacto; 15) Célula de pared rugosa y contenido compacto envuelto por una membrana irregular; 16) Estructura esférica hialina que parece estar liberando a otra estructura esférica más oscura; 17) Estructura pedunculada, con contenido y rodeada por estructuras pilosas; 18) Posible estructura algal colapsada e invaginada; 19) y 20) Estructuras circulares con pared engrosada y contenido complejo; 21) y 22) Estructuras circulares con pared adelgazada y contenido disperso, que se agregan en colonias (foto 21) o en solitario (foto 22); 23) Estructuras regularmente esféricas con pared muy gruesa y oscura; 24) y 25) Masas globulares recubiertas por una vaina hialina; 26) y 27) Estructuras conformadas por tres subestructuras de forma triangular; 28) Estructura con una capa gruesa y pilosa en la periferia y contenido ovalado; 29) Conjunto de células con pared muy delgada y contenido disperso; 30) Célula con pared hialina y contenido en forma de hebras superpuestas; 31) Posible estructura algal con pared rugosa y granulada; 32) Estructura esférica pedunculada, con pared pilosa y contenido compuesto por grumos y envolturas hialinas; 33) Célula con capa externa y contenido en forma de copa.

solitarias, pero siempre cercanas unas de otras. El diámetro varía de 100 a 125  $\mu\text{m}$ ; el espesor de las paredes externas va de 9 a 12  $\mu\text{m}$ .

**Tipo 47 (Figura 6, foto 23)**

Estructuras regularmente esféricas, con pared gruesa y remarcada, y una envoltura hialina alrededor de toda la estructura. Todas tienen contenido semidisperso. El diámetro varía de 24  $\mu\text{m}$  a 37  $\mu\text{m}$ .

**Tipo 48 (Figura 6, fotos 24–25)**

Estructuras ovoides u oblongas, parecidas a grumos algales con pliegues circunvolucionados, recubiertos por una vaina hialina regularmente esférica. La vaina puede tener espesor variable. Las vainas pueden ser de 20 a 100  $\mu\text{m}$  de diámetro, y las células internas que logran definirse miden de 9 a 11  $\mu\text{m}$  de diámetro.

**Tipo 49 (Figura 6, fotos 26–27)**

Estructuras divididas en tres porciones, cada una con forma más o menos triangular, vértices redondeados y bien delimitados unos de otros. Las porciones pueden encontrarse fusionadas o ligeramente separadas. No tienen contenido. El diámetro total aproximado es de 23  $\mu\text{m}$ .

**Tipo 50 (Figura 6, foto 28)**

Estructura esférica, de textura superficial reticulada y pilosa. Tiene una capa gruesa externa, homogénea, también reticulada y pilosa. En el interior se observa un contenido ovalado oscurecido. El diámetro es de 45  $\mu\text{m}$ . El espesor de la capa externa es de 7.5  $\mu\text{m}$ .

**Tipo 51 (Figura 6, foto 29)**

Conjunto de tres células. La célula central es oblonga y la pared que la une a sus vecinas es plana, perpendicular al eje longitudinal. Las células de los extremos son más alargadas y redondeadas en la punta. No presentan recubrimiento externo o vainas. La membrana del contorno es delgada y tenue. En el interior de todas las células hay contenido disperso, ennegrecido y desordenado que ocupa gran parte del interior de cada una. El diámetro de las células varía de 35 a 40  $\mu\text{m}$ .

**Tipo 52 (Figura 6, foto 30)**

Célula de forma elíptica, cubierta por una capa hialina apenas perceptible. El contenido es oscuro, formado por varias hebras curvadas concéntricamente. El diámetro celular es de 40  $\mu\text{m}$ , el del contenido es de aproximadamente 16  $\mu\text{m}$ .

**Tipo 53 (Figura 6, foto 31)**

Posible estructuras algal, de forma esféricas, con contorno remarcado y granuloso. Pueden apreciarse algunos contenidos indefinidos a manera de manchas al interior. Los diámetros oscilan entre las 27 y 32  $\mu\text{m}$ . Son abundantes en muestras de matriz clara y homogénea.

**Tipo 54 (Figura 6, foto 32)**

Estructura circular con un diminuto pedúnculo, con contenidos muy variados, desde grumos oscuros hasta lo que parecen ser envolturas hialinas plegadas. Tiene una cobertura externa pilosa que se extiende radialmente hacia afuera; esta cubierta es visible sólo en un plano, mientras que todo lo demás se encuentra en planos a profundidad variable. Mide 415  $\mu\text{m}$  de diámetro. Se encuentra asociadas a restos de conchas.

**Tipo 55 (Figura 6, foto 33)**

Célula esférica, solitaria, con envoltura externa. El contenido tiene forma de copa o herradura y ocupa casi toda la parte interna. La textura es más o menos granulada en la superficie. El diámetro es de 30  $\mu\text{m}$ .

## DISCUSIÓN

La gran diversidad de fósiles encontrados en el pedernal de Huépac y su carácter alóctono y autóctono es reflejo de la diversidad de organismos que vivieron en el cuerpo de agua donde crecían los estromatolitos y en los alrededores. El arreglo colonial de algunos conjuntos algales (Tipos 26, 30, 31 y 35) sugiere que fueron sepultados *in situ*, pues ello evitaría su dispersión, y por tanto es posible que crecieran adheridos a la superficie del estromatolito e incluso participado en su construcción. Lo mismo ocurriría con las formas filamentosas, que suelen ser bentónicas (Tipo 6). Esta distinción ha sido discutida anteriormente (Beraldi-Campesi *et al.*, 2004). Otros fósiles, como polen y restos de plantas, representan en cambio a la paleobiota circundante, la cual, al parecer, era también muy diversa.

A pesar de la excelente conservación de los microorganismos, no siempre es posible contar con las características necesarias para su identificación (planos de división, ciclo de vida, pigmentos, tipo de esporas, etc.); sin embargo, hay caracteres que son fácilmente apreciables, por ejemplo si el arreglo es colonial o cenobial (dependiendo del tamaño de las células), si hay separación entre las células, si hay o no cubierta mucilaginosa, si hay vainas, si las vainas son o no estratificadas, si los individuos están aislados unos de otros, si aparecen asociados en patrones reconocibles, si tienen o no contenido. Estas características son suficientes para diferenciarlos y agruparlos distintivamente (Figura 4). Así, poder distinguir a los organismos alóctonos y autóctonos, bentónicos y planctónicos resulta útil para reconocer roles ecológicos propios de los organismos y enriquece la comprensión del ecosistema.

Dentro de la diversidad fósil, algunos morfotipos han sido relacionados con especies actuales de organismos que viven únicamente en agua dulce (e.g. *Tetraedron* sp., *Tabellaria* sp., *Melosira* sp.; Beraldi-Campesi *et al.*, 2004). Otros fósiles previamente estudiados (plantas Haloragáceas y raíces de palmeras), también sugieren que se trataba de un cuerpo de agua dulce (Ricalde-Moreno, 1994; Hernández-

Castillo, 1998). Más aún, estudios geológicos sustentan la idea de que esta parte de la Formación Tarahumara se depositó en una cuenca continental intra-arco (Roldán-Quintana, 2002), con cuerpos de agua no marinos que pudieron funcionar como cuencas hidrológicas en el Cretácico Tardío (Amaya-Martínez y González, 1993). Dadas estas características, es posible que algunos de estos cuerpos de agua hayan sido termales (*hot springs*), lo cual explicaría la presencia de pedernal, pues en análogos actuales ocurre la precipitación de sílice; el proceso de silicificación conserva las delicadas estructuras celulares de los microorganismos que ahí viven (Konhauser *et al.*, 2003). Sin embargo, falta mucho para comprender a profundidad la historia geológica y biológica de esta región.

Es probable que esta biota no viviera en un cuerpo de agua oligotrófico, donde es común encontrar poca diversidad, sino en uno rico en nutrientes y luz suficiente para el desarrollo de productores primarios (fotosintéticos) y el resto de la red trófica. La presencia de los estromatolitos sugiere que el cuerpo de agua era somero, posiblemente de baja energía, con el pH y solutos necesarios para su desarrollo.

A pesar del constante cambio que pudiera sufrir el entorno a consecuencia del volcanismo registrado en la Formación Tarahumara, la frecuente aparición de horizontes estromatolíticos en la sección estratigráfica hace evidente que los cuerpos de agua subsistieron, aunque no de manera continua, durante largos periodos de tiempo. La búsqueda de fósiles en otros niveles estratigráficos de Huépac, así como un estudio sedimentológico completo, será necesario para comprender con más claridad la paleoecología del lugar a través del tiempo.

## AGRADECIMIENTOS

Este proyecto fue realizado gracias al apoyo de la DGAPA-UNAM (IN208500). Agradecemos a Antonio Altamira y Enrique González Torres, Instituto de Geología, UNAM; Fernando Chiang Cabrera y José Luis Godínez, Instituto de Biología, UNAM; Eberto Novelo, Rosa Luz Tavera, Gustavo Montejano, Javier Carmona y Francisco Valadéz, Laboratorio de Ficología; Guadalupe Vidal y Joaquín Cifuentes, Laboratorio de Micología; María Antonieta Aladro y María Esther Murillo, Laboratorio de Protozoología, Facultad de Ciencias, UNAM; César Jacques Ayala y Jaime Roldán Quintana, Estación Regional del Noroeste, Instituto de Geología, UNAM; Javier Helenes Escamilla, Departamento de Geología, CICESE e Isabel Israde Alcántara, Departamento de Geología y Mineralogía, Instituto de Investigaciones Metalúrgicas, por sus comentarios y apoyo en diferentes aspectos del trabajo. Cultivos

algales y material fotográfico para comparaciones fueron proporcionados por H. Beraldi y personal de los laboratorios de Ficología de la Facultad de Ciencias y el Instituto de Biología, UNAM.

## REFERENCIAS

- Amaya-Martínez, R., González, M.M. 1993. Las rocas volcánicas de la Formación Tarahumara y su relación con las secuencias volcano-sedimentarias en la porción centro-oriental del Estado de Sonora (resumen), *en* Memorias del II Simposio de la Geología de Sonora y Áreas Adyacentes: Hermosillo, Sonora, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología y Universidad de Sonora, Departamento de Geología, p. 32.
- Bazylinski, D.A., Heywood, B.R., Mann, S., Frankel R.B., 1993, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> and Fe<sub>2</sub>S<sub>4</sub> in a bacterium: Nature, 366, 218.
- Beraldi-Campesi, H., 2000, Microfósiles permineralizados asociados a estromatolitos cretácicos de Sonora: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ciencias, Tesis de Licenciatura, 80 p.
- Beraldi-Campesi, H., Cevallos-Ferriz, S.R.S., Chacón-Baca, E., 2004, Microfossil algae associated with Cretaceous stromatolites in the Tarahumara Formation, Sonora, Mexico: Cretaceous Research, 25(2), 237-253.
- Cevallos-Ferriz, S.R.S., Ricalde-Moreno, O., 1995, Palmeras fósiles del norte de México: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Anales del Instituto de Biología, Serie Botánica, 66, 97-106.
- Chacón-Baca, E., Beraldi-Campesi, H., Cevallos-Ferriz, S.R.S., Knoll, A., Golubic, S., 2002, 70 Ma nonmarine diatoms from northern Mexico: Geology, 30(3), 279-281.
- Hernández-Castillo, G.R., 1998, Plantas fósiles permineralizadas del Cretácico Superior de Sonora, México: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ciencias, Tesis de Maestría, 48 p.
- Hernández-Castillo, G., Cevallos-Ferriz, S.R.S., 1999, Reproductive and vegetative organs with affinities to Haloragaceae from the Upper Cretaceous Huepac Chert Locality of Sonora, Mexico: American Journal of Botany, 86, 1717-1734.
- Konhauser, K.O., Jones, B., Reysenbach, A., Renaut, R.W., 2003, Hot spring sinters; keys to understanding Earth's earliest life forms: Canadian Journal of Earth Sciences, 40, 1713-1724.
- McDowell, F.W., Roldán-Quintana, J., Connelly, J.N., 2001, Duration of Late Cretaceous-early Tertiary magmatism in east-central Sonora, Mexico: Geological Society of America Bulletin, 113, 521-531.
- Ricalde-Moreno, O., 1994, Anatomía de ejes vegetativos de palmeras fósiles del norte de México: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ciencias, Tesis de Licenciatura, 113 p.
- Roldán-Quintana, J. 2002. Caracterización geológico-geoquímica y evolución del arco magmático Mesozoico-Terciario, entre San Carlos y Maycoba, Sur de Sonora: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Tesis Doctoral, 190 p.

Manuscrito recibido: Junio 4, 2004

Manuscrito corregido recibido: Febrero 3, 2005

Manuscrito aceptado: Febrero 28, 2005