

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS



**TAFONOMÍA DE FRUTOS DEL GÉNERO *Tricostatocarpon* (ZINGIBERALES)  
DE LA FORMACIÓN CERRO DEL PUEBLO (GRUPO DIFUNTA, CRETÁCICO  
SUPERIOR), COAHUILA, NORESTE DE MÉXICO**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

**BIÓLOGO**

PRESENTA:

**LAURA ELENA GONZÁLEZ HERNÁNDEZ**



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS

DEPARTAMENTO DE ECOLOGÍA



**TAFONOMÍA DE FRUTOS DEL GÉNERO *Tricostatocarpon* (ZINGIBERALES) DE LA FORMACIÓN CERRO DEL PUEBLO (GRUPO DIFUNTA, CRETÁCICO SUPERIOR), COAHUILA, NORESTE DE MÉXICO**

COMITÉ DE TESIS

APROBADA:

DIRECTOR INTERNO:

DR. LUIS ENCARNACIÓN SILVA MARTÍNEZ

ASESOR EXTERNO

DR. ALBERTO BLANCO PIÑÓN

SECRETARIO:

DRA. SUSANA FAVELA LARA

VOCAL:

BIÓL. M.C. HIDALGO RODRÍGUEZ VELA

*“The nitrogen in our DNA,  
the calcium in our teeth,  
the iron in our blood,  
the carbon in our apple pies  
were made in the interiors of collapsing stars.  
We are made of starstuff.”*

*— Carl Sagan*

## DEDICATORIA

*A mi madre.*

## AGRADECIMIENTOS

Expreso mi más sincero agradecimiento a las personas que me ayudaron a lo largo del desarrollo de la tesis.

Primeramente, al Dr. Alberto Blanco Piñón por su asesoría, tiempo, dedicación y esfuerzo durante las distintas etapas de la tesis, y por la confianza que depositó en mí en invitarme a su proyecto “Evidencias Petrográficas de Oxidación de Sulfuros en Rocas del Cretácico e Implicaciones Astrobiológicas” y por ayudarme a terminar esta tesis. Sin su apoyo, nada de esto hubiera sido posible.

Al Dr. Luis Encarnación Silva Martínez por permitirme ser parte del equipo del Laboratorio de Paleobiología, por sus recomendaciones, apoyo y paciencia.

Agradezco a los miembros del comité de tesis Dra. Susana Favela Lara y al M.C Hidalgo Rodríguez-Vela por sus comentarios, correcciones y sugerencias para este documento. Al Dr. Marco Antonio Guzmán Lucio, especialista del Departamento de Botánica de la Facultad de Ciencias Biológicas de la U.A.N.L. por apoyarme en las descripciones realizadas y compartirme sus conocimientos en su área de investigación.

Especialmente a la Ing. Belinda Espinosa Chávez de la Benemérita Escuela Normal de Coahuila por el apoyo que me brindó en las salidas a campo, e igualmente por sus excelentes comentarios y sugerencias para la tesis.

Al M.C Guillermo Alvarado Valdez y al Ing. Juan Carlos Becerril del Laboratorio de Paleontología, Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí por permitirme usar las instalaciones del laboratorio así como el equipo microscópico. También agradezco su apoyo en la descripción composicional del material colectado, así como en la documentación petrográfica del mismo.

Al Biól. Omar Germán Silva Escalera por ser una de las personas que me brindó su tiempo y apoyo incondicional a lo largo de mi carrera, siempre cuidándome, alentándome a seguir adelante y a creer en mi misma.

Finalmente a todas aquellas personas que han estado conmigo y me han regalado un pedacito de ellas. A mi familia y amigos de toda la vida que siempre están presentes sin importar la distancia, que me hacen ser más fuerte y llenan mi vida de alegría y cariño.

## RESUMEN

Se realizó un estudio tafonómico, así como una identificación y descripción taxonómica de frutos fósiles provenientes de la Formación Cerro del Pueblo colectados en las cercanías de la Presa San Antonio y Porvenir de Jalpa, en el municipio de Parras de la Fuente, ubicado aproximadamente a 75 km al oeste de la ciudad de Saltillo, en la parte sur del estado de Coahuila, México. En la localidad, la Formación Cerro del Pueblo consiste en afloramientos relativamente homogéneos compuestos de marga color gris-verdoso, alternada con capas decimétricas de arenisca con diferente tamaño de grano y capas de lutitas de espesor decimétrico con presencia de algas Charophyta, esta litología sugiere un ambiente de planicie deltaica. Las litologías antes mencionadas están parcialmente cubiertas por aluvión y coluvión. Los ejemplares fósiles colectados y estudiados fueron asignados al género *Tricostatocarpus* de acuerdo con ciertos rasgos anatómicos; estos frutos presentan evidencias de procesos de alteración tafonómica, tanto de la etapa biostratinómica (biodegradación, desplazamiento lateral) como fosildiagenética (mineralización, distorsión, reelaboración, encostramiento). De acuerdo con análisis de difracción de Rayos X (XRD) los frutos están compuestos principalmente por goethita ( $\text{FeO}(\text{OH})$ ), sin embargo la presencia de hábitos típicos de la pirita dentro de las diferentes partes de los frutos sugiere que la preservación primaria de los frutos fue por sulfuros de hierro, como la pirita ( $\text{FeS}_2$ ) y que la goethita es producto secundario tras un proceso de oxidación. La presencia de minerales secundarios en los frutos, tales como kilchoanita ( $\text{Ca}_6(\text{SiO}_4)(\text{Si}_3\text{O}_{10})$ ), calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) y barita ( $\text{BaSO}_4$ ) sugieren eventos hidrotermales en la región, los cuales pudieron alterar la composición original de los frutos fósiles a óxidos de hierro. De igual manera, el estudio de los procesos tafonómicos y alteración de minerales son importantes también para la prospección de vida pasada en Marte. La presencia de óxidos de hierro y de estructuras sedimentarias en el planeta rojo similares a las que existen en la Tierra, como los deltas, sugieren que el pasado de Marte pudo haber tenido las condiciones necesarias para la vida. Para su corroboración es importante el retorno de rocas marcianas a la Tierra, especialmente de lugares que se encuentren relacionadas con ríos o lagos antiguos que pudieran haber sido habitables en el pasado, con el fin de identificar elementos bióticos que puedan ser preservados en óxidos de hierro.

## ABSTRACT

A taphonomic study was carried out, as well as a taxonomic identification and description of fossil fruits from the Cerro del Pueblo Formation, which were collected in the vicinity of the San Antonio Dam and Porvenir de Jalpa in the municipality of Parras de la Fuente, located at approximately 75 km west of the city of Saltillo in the southern part of the state of Coahuila, Mexico. In the study area, the Cerro del Pueblo Formation consists of relatively homogeneous outcrops composed of greenish-gray marl, alternating with decimetric beds of sandstone with different grain size, and shale beds of decimetric thickness bearing Charophyta algae, this lithology suggested a deltaic plain environment. The lithologies mentioned above are partially covered by alluvium and colluvium. The fossil specimens collected and studied were assigned to the genus *Tricostatocarpon* according to different anatomical characteristics, and exhibit evidence of processes of taphonomic alteration, both biostratinomical (biodegradation, lateral displacement) and fossil diagenetic (mineralization, distortion, reworking, embedding). According to X-ray diffractometry analysis (XRD) the fruits are mainly composed of goethite ( $\text{FeO}(\text{OH})$ ), however the presence of typical habits of pyrite within the different parts of the fruits suggests that the primary preservation of the fruits were by iron sulfures such as pyrite ( $\text{FeS}_2$ ) and that the goethite is a secondary product after an oxidation process. The presence of secondary minerals in the fruits, such as kilchoanite ( $\text{Ca}_6(\text{SiO}_4)(\text{Si}_3\text{O}_{10})$ ), calcite ( $\text{CaCO}_3$ ) and barite ( $\text{BaSO}_4$ ) suggest hydrothermal events in the region, which could alter the original composition of the fossil fruits to iron oxides. Likewise, the study of taphonomic processes and alteration of minerals are also important for the prospection of past life on Mars. The presence of iron oxides and sedimentary structures in the red planet similar to those that exist on planet Earth, such as deltas, suggest that in ancient Mars may have had the necessary conditions for life. For its corroboration it is important to bring Martian rocks to Earth, especially from places that are related to rivers or ancient lakes that could have been habitable in the past, in order to identify biotic elements that can be preserved in iron oxides.

<b>ÍNDICE GENERAL</b>	Página
Dedicatoria. . . . .	i
Agradecimientos. . . . .	ii
Resumen. . . . .	.iii
Abstract. . . . .	.iv
Índice general. . . . .	v
Índice de figuras. . . . .	vii
Índice de tablas. . . . .	.ix
Lista de abreviaturas. . . . .	.x
<b>1. GENERALIDADES. . . . .</b>	<b>1</b>
1.1 Introducción. . . . .	1
1.2 Descripción general del área de estudio. . . . .	2
1.2.1 Localización y Vías de acceso. . . . .	2
1.2.2 Aspectos fisiográficos. . . . .	4
<b>2. ANTECEDENTES. . . . .</b>	<b>6</b>
<b>3. HIPÓTESIS. . . . .</b>	<b>9</b>
<b>4. IMPORTANCIA. . . . .</b>	<b>10</b>
<b>5. OBJETIVOS. . . . .</b>	<b>11</b>
5.1 Objetivo General. . . . .	11
5.2 Objetivos Particulares. . . . .	11
<b>6. MATERIAL Y MÉTODO. . . . .</b>	<b>12</b>
6.1 Material y equipo. . . . .	12
6.2 Metodología. . . . .	13
6.2.1 Gabinete I. . . . .	13
6.2.2 Campo. . . . .	13
6.2.3 Laboratorio. . . . .	13
6.2.4 Gabinete II. . . . .	15

<b>7. MARCO GEOLÓGICO.</b>	16
7.1 Geología.	16
7.2 Desarrollo paleogeográfico.	16
7.3 Formación Cerro del Pueblo: Definición y litología.	23
<b>8. DESCRIPCIÓN MORFOLÓGICA Y ANATÓMICA DE EJEMPLARES FÓSILES.</b>	31
8.1 Frutos.	31
8.2 Semillas.	34
<b>9. RESULTADOS.</b>	41
9.1 Formación Cerro del Pueblo en el área de estudio.	41
9.2 Mecanismos de alteración tafonómica.	49
9.2.1 Biodegradación.	49
9.2.2 Desplazamiento lateral (transporte post-mortem).	51
9.2.3 Mineralización.	52
9.2.3.1 Permineralización.	52
9.2.3.2 Cementación de cavidades.	54
9.2.4 Distorsión.	59
9.2.5 Reelaboración.	61
9.2.6 Encostramiento.	62
<b>10. DISCUSIÓN.</b>	63
10.1 Determinación taxonómica.	63
10.2 Tafonomía.	64
10.2.1 Etapa biostratinómica.	65
10.2.2 Etapa fosildiagenética.	68
10.3 Implicaciones astrobiológicas.	75
<b>11. CONCLUSIONES.</b>	78
<b>12. LITERATURA CITADA.</b>	79

## LISTA DE FIGURAS

		Página
Figura 1.	Localización del área de estudio.	3
Figura 2.	Mapa regional del noreste de México indicando la extensión y ubicación de la Cuenca de Parras. Modificado de Eberth <i>et al.</i> (2004).	17
Figura 3.	Paleogeografía del Noreste de México durante el Campaniano-Maastrichtiano. Tomado de Ángeles-Trigueros (2015).	18
Figura 4.	Paleogeografía del Noreste de México durante el Cretácico Tardío. Modificado de Kirkland <i>et al.</i> (2000).	20
Figura 5.	Columna estratigráfica de la parte central de la Cuenca de Parras mostrando las divisiones del Grupo Difunta (modificado de Vogt <i>et al.</i> , 2016).	22
Figura 6.	Frutos fósiles de la Formación Cerro del Pueblo. <b>A.</b> Fruto fósil mostrando una estructura elíptica y fusiforme. <b>B.</b> Ubicación de los septos y los carpelos. <b>C.</b> Corte transversal del fruto mostrando un contorno subtriangular. 1. Semillas. 2. Placenta. 3. Costilla exterior del septo. 4. Carpelo. 5. Borde longitudinal que se extiende a la mitad de cada carpelo.	32
Figura 7.	Ejemplar fósil que muestra cierto grado de deformación.	33
Figura 8.	<b>A.</b> Pericarpio preservado. <b>B y C.</b> Ornamentación a manera de red poliédrica donde se observa la parte superior de las semillas debido a la ausencia del pericarpio. <b>D.</b> Reemplazamiento de la placenta por cristales (la flecha blanca indica los cristales formados dentro del fruto).	35
Figura 9.	<b>A.</b> Corte longitudinal del fruto mostrando la disposición de las semillas. <b>B.</b> Dibujo de la morfología de la semilla (modificada de Rodríguez de la Rosa y Cevallos-Ferriz, 1994). <b>C y D.</b> Corte transversal de la semilla donde se puede observar el contorno hexagonal. <b>E.</b> Corte longitudinal de una semilla observando sus partes: c.e.-cavidad embrionaria; int.-integumentos.	36
Figura 10.	<b>A.</b> Corte transversal de una semilla observando sus capas composicionales. C.e.-cavidad embrionaria; 1-3-Zona integumentaria exterior: 1-capa exterior, 2-capa media, 3-capa interior; 4-Zona integumentaria interior. <b>B.</b> Cavidad embrionaria de la semilla expuesta. <b>C.</b> Corte longitudinal de una semilla observando sus partes: c.e.-cavidad embrionaria; int.-integumentos; o-opérculo.	38

Figura 11.	Distintos rellenos de la cavidad embrionaria.	39
Figura 12.	Filamentos del tubo polínico (señalados con flecha blanca) observado dentro de distintas cavidades embrionarias.	40
Figura 13.	<b>A.</b> Capa de margas de la Formación Cerro del Pueblo en el área de estudio. <b>B.</b> Ripples. <b>C.</b> Fragmento fósil de madera.	42
Figura 14.	Afloramiento de arenisca roja de la Formación Cerro del Pueblo en el área de estudio.	43
Figura 15.	Estructuras sedimentarias encontradas en las capas de arenisca roja de la Formación Cerro del Pueblo en el área de estudio: <b>A.</b> Un gasterópodo incrustado en la arenisca. Se observa a detalle la textura de la roca. <b>B.</b> Laminación paralela. <b>C.</b> Nódulos. <b>D.</b> Intemperismo por viento. <b>E.</b> Presencia de moluscos ostreidos. <b>F.</b> Galerías tipo Thalassinoides.	44
Figura 16.	<b>A.</b> Huellas de dinosaurio (señaladas con flecha negra) en la localidad de Las Águilas. <b>B.</b> Algas charophytas (señaladas con flecha negra) en muestra de roca.	45
Figura 17.	El afloramiento de la tercera litología consiste en arenisca de grano fino, aparentemente sin estructura interna.	46
Figura 18.	<b>A.</b> Capa de aluvión/coluvión de la Formación Cerro del Pueblo en el área de estudio. <b>B.</b> Frutos fósiles encontrados en la capa de aluvión/coluvión. <b>C.</b> Gasterópodo preservado en óxidos de hierro encontrado en la capa de aluvión/coluvión.	48
Figura 19.	Fotografías que muestran ejemplares de frutos fósiles con presencia y ausencia de pericarpio.	50
Figura 20.	Corte transversal de un fruto mostrando un interior sin arreglo determinado.	51
Figura 21.	<b>A.</b> Frutos con la coloración rojiza característica de los óxidos de hierro. <b>B y C.</b> Corte transversal de las semillas que muestra la permineralización de los integumentos (flecha blanca).	53
Figura 22.	Cavidades embrionarias rellenas por distintos minerales que son indicados por una flecha blanca: <b>A y B.</b> Calcedonia; <b>C y D.</b> Calcita. <b>E y F.</b> Relleno ferruginoso.	55
Figura 23.	Valores de difracción de Rayos X en frutos fósiles de la Formación Cerro del Pueblo. <b>A.</b> Muestra identificada con la clave "FRUTO". <b>B.</b> Difractograma de la muestra No.1.	57

Figura 24.	Valores de difracción de Rayos X en frutos fósiles de la Formación Cerro del Pueblo. <b>A.</b> Muestra No. 2. <b>B.</b> Muestra No.3.	58
Figura 25.	<b>A y B.</b> Aplanamiento y deformación de los ejemplares fósiles. <b>C.</b> Deformación de la cavidad embrionaria. <b>D.</b> Deformación del interior de la semilla.	60
Figura 26.	Fruto fósil encontrado en aluvión (indicado por flecha blanca).	61
Figura 27.	Frutos fósiles con distinta cantidad de encostramiento.	62
Figura 28.	Reconstrucción tafonómica del fruto.	67
Figura 29.	Goethita pseudomórfica de pirita. <b>A.</b> Goethita pseudomórfica reportada por Murciego-Murciego <i>et al.</i> (2012). <b>B-F.</b> Micrografías de los hábitos de pirita sustituidos por goethita (con su coloración rojiza característica) presentes en las cavidades embrionarias de las semillas. ( <b>B-D:</b> microscopio óptico, FCB-UANL; <b>E-F:</b> microscopio petrográfico, FI-UASLP). Las flechas señalan los hábitos cúbicos que se encontraron en los ejemplares fósiles.	73
Figura 30.	Etapas del proceso tafonómico de los frutos fósiles encontrados en la localidad de la Formación Cerro del Pueblo.	74

## LISTA DE TABLAS

		Página
Tabla 1.	Valores de porcentaje de goethita y kilchoanita en frutos fósiles de la Formación Cerro del Pueblo en el área de estudio.	56
Tabla 2.	Valores de porcentaje de goethita y kilchoanita en frutos fósiles de la Formación Cerro del Pueblo en el área de estudio.	56
Tabla 3.	Análisis HCl (10%) en muestra de roca, muestra interna de fruto y encostramiento	56

## LISTA DE ABREVIATURAS

°C	grados centígrados.
Bsk	clima semi-árido.
com. pers.	comunicación personal.
cm	centímetro.
EE.UU.	Estados Unidos.
HCl	Ácido clorhídrico.
hrs	horas.
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
km	kilómetro.
m	metro.
mm	milímetro.
N	norte
W	oeste
XRD	X-Ray Diffraction (Difractometría de Rayos X).

# 1. GENERALIDADES

## 1.1 INTRODUCCIÓN

La tafonomía es la disciplina que estudia las leyes del enterramiento (Efremov, 1940), y se refiere al estudio de los procesos de fosilización y formación de yacimientos fosilíferos (Fernández-López, 2000). Esta información permite determinar cuáles fueron los agentes responsables de la formación de yacimientos y cómo se produjeron los eventos acumulativos. Desde la muerte del organismo, a través del entierro y diagénesis, cualquier elemento conservado experimenta modificaciones en su composición, estructura y ubicación espacio-temporal, pudiendo dar lugar a otros restos, o bien, a ser destruido.

En el caso de la flora, los procesos tafonómicos que intervienen en su preservación son complejos, ya que las plantas están compuestas principalmente por partes refractarias que pueden desarticularse con facilidad (hojas, raíces, tallos, estructuras reproductivas, etc.) tanto cuando la planta está viva o después de su muerte. La composición de los tejidos también es importante, (celulosa, lignina, etc.) ya que es un factor determinante para el tipo de fosilización.

Diversos estudios alrededor del mundo se han enfocado a los procesos de preservación en plantas. Locatelli (2014) menciona diferentes tipos de preservación alrededor del mundo entre las que destacan las esferas de carbón de Lancashire (Inglaterra) y American Coal Fields (EE.UU.), la preservación por compresión en ejemplares de Grube Messel (Alemania), Musselshell Creek (EE.UU.) y Shangwang (China), la silicificación mostrada en especímenes de Rhynie Chert (Escocia), Formación Fremouw (Antártida) y North Almont (EE.UU.), la piritización de plantas en Brecon Beacons (Gales) y London Clay (Inglaterra), así como por óxidos de hierro en Clear Fork Group (EE.UU.) y la Formación Crato (Brasil).

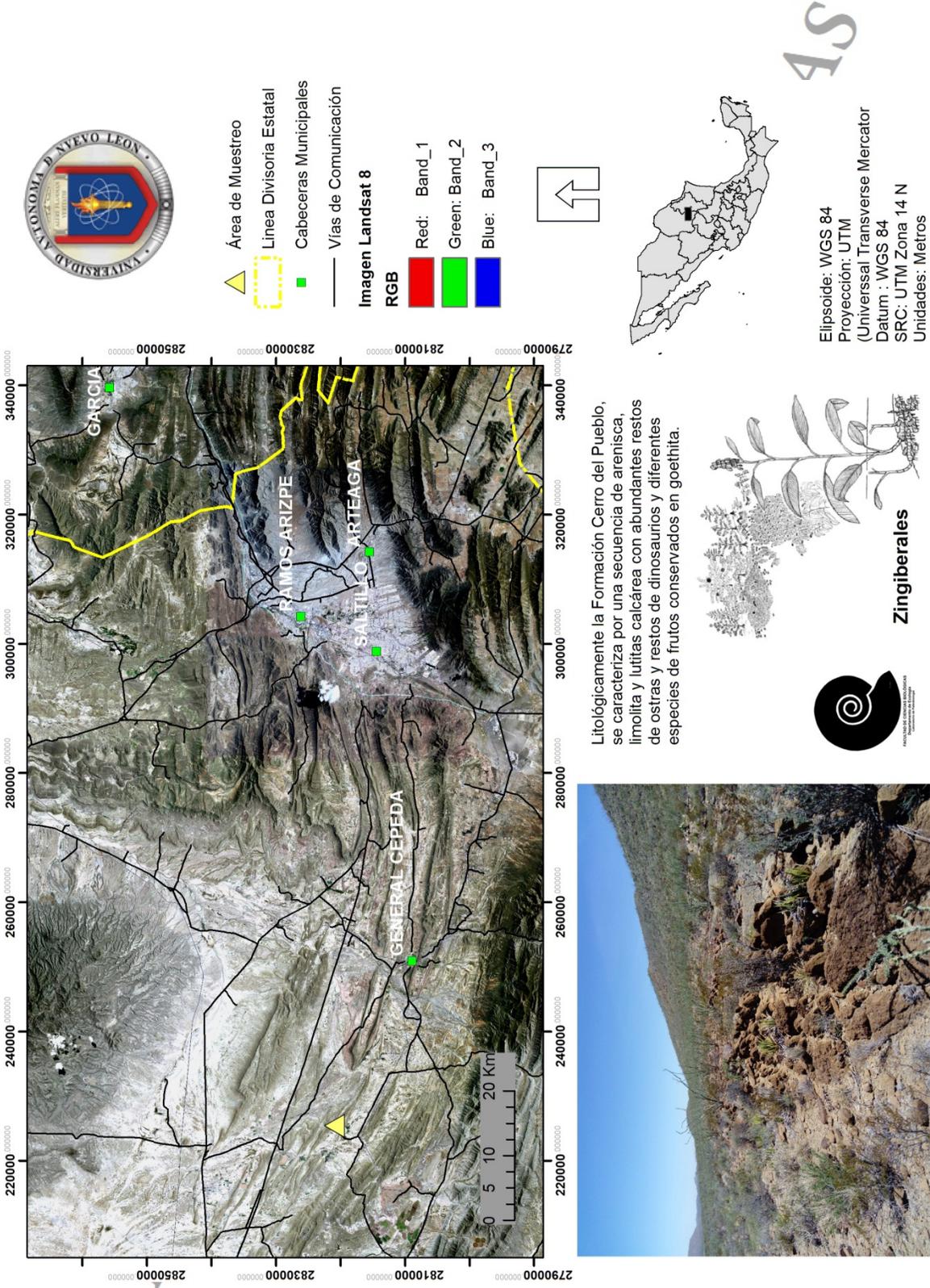
En México existen abundantes trabajos sobre la taxonomía de metazoarios (Blanco-Piñón com. pers. Marzo del 2017) y algunos sobre taxonomía de flora fósil (troncos, tallos, hojas, flores y frutos), pero no existen muchos registros que traten sobre su proceso de preservación. Una de las localidades de yacimientos fosilíferos más importante del país se encuentra en la zona sureste del estado de Coahuila (Grupo Difunta), donde se han reportado ejemplares de frutos fósiles y troncos ferruginosos junto con restos de dinosaurios (Eberth *et al.*, 2004). Como se menciona, uno de los principales tipos de fosilización que se encuentra en esta localidad por óxidos de hierro. Este mecanismo de preservación es importante ya que bajo condiciones distintas, los óxidos de hierro tienen dos posibles génesis, y el estudio de los ejemplares fósiles ayudará a determinar la naturaleza de su preservación.

## 1.2 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

### 1.2.1 LOCALIZACIÓN Y VÍAS DE ACCESO

El área de estudio se sitúa en la parte sureste del estado de Coahuila, en las cercanías de la Presa San Antonio y Porvenir de Jalpa, en el municipio de Parras de la Fuente, entre las coordenadas N 25°28'55.13" y W 101°43'51.89" aproximadamente a 75 km de la ciudad de Saltillo.

Desde Monterrey, la principal vía de acceso al área de estudio es por la autopista libre federal No. 40 Monterrey-Saltillo, y desde este punto se sigue por la Carretera Saltillo-Torreón hasta llegar al km 41 en el cual se accesa a un camino de terracería en dirección suroeste con dirección a la localidad de estudio.



**Figura 1.** Localización del área de estudio.

## 1.2.2 ASPECTOS FISIAGRÁFICOS

- Fisiografía

La parte sureste del estado de Coahuila se encuentra en la provincia fisiográfica de Sierra Madre Oriental, en específico, dentro de la subprovincia Pliegues Saltillo-Parras que se extienden al sur de Monclova hasta el oeste a la altura de Saltillo (INEGI, 2008).

- Clima

De acuerdo a la clasificación de Koeppen (1936), el tipo de clima que domina en la región es seco estepario (Bsk) con una temperatura media anual inferior a 18 °C. Los meses más cálidos son mayo y junio con temperaturas que pueden rebasar los 39 °C y los meses más fríos son de diciembre a febrero con temperaturas menores que pueden llegar hasta los -3 °C. La precipitación media anual en la parte central del municipio es de 400 a 500 mm, con régimen de lluvias en los meses de abril a octubre, y escasas de noviembre a febrero. La frecuencia anual de heladas es de 20 a 40 días en la parte extremo sur, con granizadas en la parte centro-sur y sureste de uno a dos días.

- Suelos

Los suelos predominantes de la región son Regosol, Leptosol, Chernozem, Phaeozem, Kastañozem y Calcisol.

- Flora y vegetación

En estas áreas se presenta vegetación de estepa caracterizada por plantas herbáceas y xerófilas como mezquite (*Prosopis sp.*), huizache (*Acacia farnesiana*), ocotillo (*Fouquieria splendens*), maguey (*Agave*), lechuguilla (*Agave lechuguilla*), guayule (*Parthenium argentatum*), palma samandoca (*Yucca carnerosana*), candelilla (*Euphorbia antisiphilitica*), sotol (*Dasylyrion wheeleri*), mimbre (*Salix*

*viminalis*), palo blanco (*Celtis laevigata*), fresno (*Fraxinus americana*), pino (*Pinus sp.*), cedro (*Cedrus sp.*), oyamel (*Abies religiosa*) y cactáceas de diferentes variedades.

- Fauna

Animales salvajes como el puma (*Puma concolor*), jabalí (*Sus scofra*), conejo (*Sylvilagus sp.*), liebre (*Lepus sp.*), venado cola blanca (*Odocoileus virginianus*), oso negro (*Ursus americanus*), coyote (*Canis latrans*), gato montés (*Lynx rufus*), tejón (*Taxidea taxus*), zorra (*Vulpes macrotis*), codorniz (*Colinus virginianus*), faisán (*Phasianus colchicus*), paloma (*Passer domesticus*), ceniztonle (*Mimus sp.*), gorrión (*Carpodacus mexicanus*), víboras cascabel (*Crotalus sp.*) y coralillo (*Micrurus sp.*).



FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS  
BIBLIOTECA "BIÓL. MARÍA ANA GARZA BARRINCO"

## 2. ANTECEDENTES

Schopf (1975) enfatizó la importancia de conocer los procesos de preservación de organismos fósiles, y menciona que las diferencias entre ellos recaen principalmente en el grupo al que pertenecen (plantas o animales) y su interpretación es influenciada por los modos de preservación, ya que éstos permiten identificar los procesos responsables de modificar los restos fósiles de animales y plantas

Años más tarde, Fernández-López (1991) reitera el concepto de tafonomía propuesto por Efremov (1940), como el estudio de la incorporación de restos, señales o productos de organismos de la biosfera a la litosfera, e indica que numerosos autores mencionan que los cambios de estado que ocurren durante la fosilización son experimentados no sólo por organismos individuales, sino por entidades paleobiológicas de diferente nivel de organización, como comunidades y ecosistemas que también pueden alcanzar el estado fósil.

Locatelli (2014) menciona que el estudio de la preservación en plantas permite entender cómo ocurre su fosilización, ya que es crucial para interpretar la información ecológica que poseen. Señala que la preservación de plantas fósiles puede ser categorizada en dos tipos: 1) la preservación completa, que es controlada principalmente por el transporte y los fenómenos naturales que ocurran en el momento, y la 2) preservación anatómica, que puede ocurrir a través de distintas vías tafonómicas como lo es la compresión-impresión, silicificación, formación de bolas de carbón, piritización y carbonización.

Estos estudios de preservación en plantas son comunes. Cambra-Moo *et al.* (2013) registra restos vegetales, como hojas, tallos y raíces carbonizadas; también ramas y troncos con resina preservada en las células internas, quedando éstas bien conservadas debido a que fueron enterradas rápidamente en condiciones anóxicas. Contrariamente, la parte externa de los ejemplares fue enterrada en

condiciones óxicas, siendo degradada más intensamente y después carbonificada, con pocas mineralizaciones de yeso y óxidos de hierro. Estos autores explican que los modos de preservación dependen directamente del microambiente de depósito, (canales de distribución arenosos, llanuras fangosas) del tipo (truncos, tallos, ramas, hojas, raíces) y estado (presencia o ausencia de material resinoso) del material.

En México, Castañeda-Posadas *et al.* (2014) describen material fósil colectado de la Formación Agua Nueva del Cretácico Superior, en la localidad de Xilitla, San Luis Potosí. Los especímenes son fósiles de estomatoquistes piritizados de algas Chrysophytas, encontrados en pirita sedimentaria embebida en caliza. La ocurrencia de microbiota (foraminíferos plantónicos, calcisferas, radiolarios) y macrobiota (ammonites, bivalvos inocerámidos y peces) junto con la presencia de especímenes en pirita sedimentaria sugieren que los estomatoquistes fueron preservados bajo condiciones deficientes de oxígeno en un ambiente de mar abierto.

En cuanto a la preservación en óxidos de hierro son pocos los trabajos existentes. Entre aquellos realizados en el noreste de México destaca el llevado a cabo por Blanco *et al.* (2013) y Ángeles-Trigueros (2015), quienes reportan fósiles de macroorganismos, principalmente bivalvos, amonites y peces con distintos grados de preservación, y ocasionalmente reemplazados completamente por óxidos de hierro. Mencionan que hasta ahora, se sabe que los óxidos de hierro que quedan expuestos en los afloramientos de ciertas localidades son el resultado de la oxidación post-diagenética de la pirita sedimentaria bajo distintos procesos geológicos, como eventos hidrotermales. Estos resultados son parte del proyecto "Evidencias Petrográficas de Oxidación de Sulfuros en Rocas del Cretácico e Implicaciones Astrobiológicas" dirigido por el Dr. Alberto Blanco.

A pesar de que los trabajos de plantas fósiles en óxidos son escasos, en México se destacan numerosos trabajos realizados en la Formación Cerro del Pueblo, al sureste del estado de Coahuila. Silva-Pineda (1984), describió dos tipos

de frutos permineralizados colectados cerca de la ciudad de Parras, siendo uno de ellos comparado con *lcacinicarya*. Más adelante estos ejemplares fueron analizados por Rodríguez-De la Rosa y Cevallos-Ferriz (1994), quienes reubicaron su estado taxonómico a *Tricostatocarpon silvapinedae*, y lo asignaron al orden Zingiberales. De la misma manera Estrada-Ruiz y Cevallos-Ferriz (2007) compararon estructuras reproductivas de plantas que existieron en el Cretácico Superior-Mioceno en la formaciones Cerro del Pueblo en Coahuila y El Cien en Baja California Sur, y concluyeron que se documenta una comunidad, indicando que para fines del Cretácico las angiospermas eran diversas y llevaban a cabo interacciones dinámicas en donde ciertos caracteres eran seleccionados. Más recientemente Cevallos-Ferriz y Vázquez-Rueda (2016) realizaron una descripción anatómica interna y externa de infrutescencias permineralizadas de la Formación Cerro del Pueblo, siendo un grupo extinto del orden de los Proteales.

A pesar de la valiosa información taxonómica y de carácter evolutivo que estos trabajos aportan, ninguno realiza un estudio tafonómico a fondo. Por esta razón la presente investigación se enfocó en describir los procesos tafonómicos que le sucedieron al material fósil encontrado en la Formación Cerro del Pueblo, y con esto conocer el escenario sedimentario que se desarrollaba en el lugar.

### 3. HIPÓTESIS

El tipo de preservación de los ejemplares de frutos fósiles colectados en la Formación Cerro del Pueblo, involucra procesos tafonómicos donde ocurrió una piritización y posteriormente mecanismos de oxidación por fenómenos hidrotermales post-diagenéticos.



FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS  
BIBLIOTECA "BIÓL. MARÍA ANA GARZA BARRIENTOS"

#### 4. IMPORTANCIA

El estudio de la tafonomía de fósiles en óxidos de hierro permite conocer las condiciones físico-químicas que existieron en el ambiente de depósito que posibilitaron su fosilización, ya que la producción y modificación de los ejemplares dependen de las condiciones del ambiente externo.



FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS  
BIBLIOTECA "BIÓL. MARÍA ANA GARZA BARRIENTOS"

## 5. OBJETIVOS

### 5.1 OBJETIVO GENERAL:

- Determinar los procesos tafonómicos que permitieron la preservación de frutos fósiles en óxidos de hierro (en la Formación Cerro del Pueblo) y conocer el escenario sedimentario en el que la preservación tuvo lugar.

### 5.2 OBJETIVOS PARTICULARES:

- Caracterizar litológicamente a la Formación Cerro del Pueblo en el área de estudio así como ubicar y coleccionar frutos fósiles dentro de la sección estratigráfica estudiada.
- Conocer los rasgos anatómicos del material paleontológico coleccionado a través de descripciones a escala macroscópica y microscópica mediante microscopio estereoscópico, y lámina delgada en microscopio bacteriológico.
- Conocer la composición mineralógica y elemental de los frutos mediante análisis de Difractometría de Rayos X (XRD).
- Determinación de procesos tafonómicos implicados en la preservación de los frutos, así como su escenario sedimentario mediante la interpretación de los rasgos anatómicos, texturales y geoquímicos obtenidos en los diferentes análisis.

## 6. MATERIAL, EQUIPO Y METODOLOGÍA

### 6.1 MATERIAL Y EQUIPO

El material paleontológico consistió en ejemplares de frutos fósiles de plantas identificadas al género *Tricostatocarpon* (Zingiberales) colectados en las capas de la Formación Cerro del Pueblo (Grupo Difunta) asociados a un yacimiento con restos de dinosaurio.

El material de campo que se utilizó para la colecta de muestras fueron el martillo con una extremidad en pico o bisel y cincel, cinta métrica, libreta de campo, bolsas de plástico para guardar las muestras, brújula, GPS, un lente de mano, una navaja de bolsillo, una libreta de notas, un lápiz 2H, una escala de 15 cm, bolsas de papel grueso para las muestras.

Una vez que los ejemplares fueron embolsados y etiquetados, se llevaron al laboratorio para su análisis y procesamiento. El material de laboratorio utilizado para la merística de los frutos fue el vernier, se usó también una cortadora automática, pegamento epóxico, morteros, microscopio estereoscópico, lupas y otros instrumentos para la observación de los ejemplares fósiles y su análisis de composición elemental.

## 6.2 METODOLOGÍA

Para el cumplimiento de los objetivos de este estudio, se realizaron las siguientes etapas: 1) Gabinete I, 2) Campo, 3) Laboratorio 4) Gabinete II.

### 6.2.1 GABINETE I

La primera etapa consistió en revisión y recopilación bibliográfica, disponible en la biblioteca del Laboratorio de Paleobiología de la Facultad de Ciencias Biológicas de la Capilla Alfonsina y Biblioteca Magna de la Universidad Autónoma de Nuevo León, así como artículos electrónicos.

### 6.2.2 CAMPO

En la etapa de campo se realizó el reconocimiento del área de estudio junto con la descripción de las capas sedimentarias de la Formación Cerro del Pueblo situado en el municipio de Parras de la Fuente, Coahuila. Se hizo medición de cada uno de los estratos en corte vertical, tomando la distancia perpendicular entre base y techo del estrato, con una cinta métrica y se describieron las características litológicas macroscópicas como textura, color, espesor de estratos, estructuras sedimentarias y fósiles presentes. Se realizó la colecta de ejemplares fósiles.

### 6.2.3 LABORATORIO

En la etapa de laboratorio se analizaron cada uno de los ejemplares fósiles colectados en campo.

1. Se realizó una descripción a nivel macroscópico de la anatómica interna y externa de los fósiles colectados,
2. Se realizaron láminas delgadas para observación por microscopio estereoscópico, bacteriológico y petrográfico. El procedimiento que se llevó a cabo fue el siguiente:

- Corte: los ejemplares fósiles fueron escogidos y cortados de manera longitudinal y transversal utilizando una cortadora de disco de diamante (Contempo Lapidary), obteniendo dos piezas. Los distintos tipos de cortes son debido a que se pretendió realizar un análisis más a fondo de la anatomía del fruto.
- Preparación de las muestras: se utilizaron portaobjetos para procesar los frutos y obtener láminas delgadas de cada ejemplar. Cada uno se etiquetó con una pluma de punta de diamante con un número del 1 al 10, el correspondiente a cada ejemplar para su correcta identificación.

Con el fin de obtener una superficie con buena adherencia y facilitar el pegado de las muestras, los portaobjetos se esmerilaron con abrasivo tipo carborundum (carburo de tungsteno) en tamaño de grano de 500. Del mismo modo, se tomó una pieza del corte de cada muestra de fruto y se pulieron con distintos tipos de lijas (600, 800, 1000) para suavizar la superficie y prevenir la formación de burbujas en la etapa del pegado.

- Pegado: las muestras se pegaron al portaobjetos al reverso del etiquetado, colocando la pasta de pegamento epóxico e inmediatamente colocando el ejemplar fósil sobre ella. Se procuró realizar ligeros deslizamientos sobre la pasta para evitar la formación de burbujas. Se dejaron secar aproximadamente 24 hrs.
- Pulido: ya pegadas, las muestras se procesaron en un pulidor (Contempo Lapidary). Se utilizaron distintas lijas (600, 700, 1000, 1200) conforme la lámina se iba adelgazando. Las muestras se revisaron al microscopio cada 1 ó 2 mm que la lámina se

adelgazaba con el fin de observar estructuras presentes y tomar datos de la anatomía interna del fruto.

3. La identificación de estructuras presentes se realizó mediante microscopio estereoscópico y petrográfico.
4. Se realizaron análisis composicionales de los ejemplares fósiles por medio de Difracción de Rayos X (XRD).



#### 6.2.4 GABINETE II

La última etapa consistió en integrar todos los resultados obtenidos en las etapas anteriores, y correlacionar con investigaciones previas para la presentación de resultados.

FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS  
BIBLIOTECA "BIÓL. MARÍA ANA GARCÍA BARRIENTOS"

## 7. MARCO GEOLÓGICO

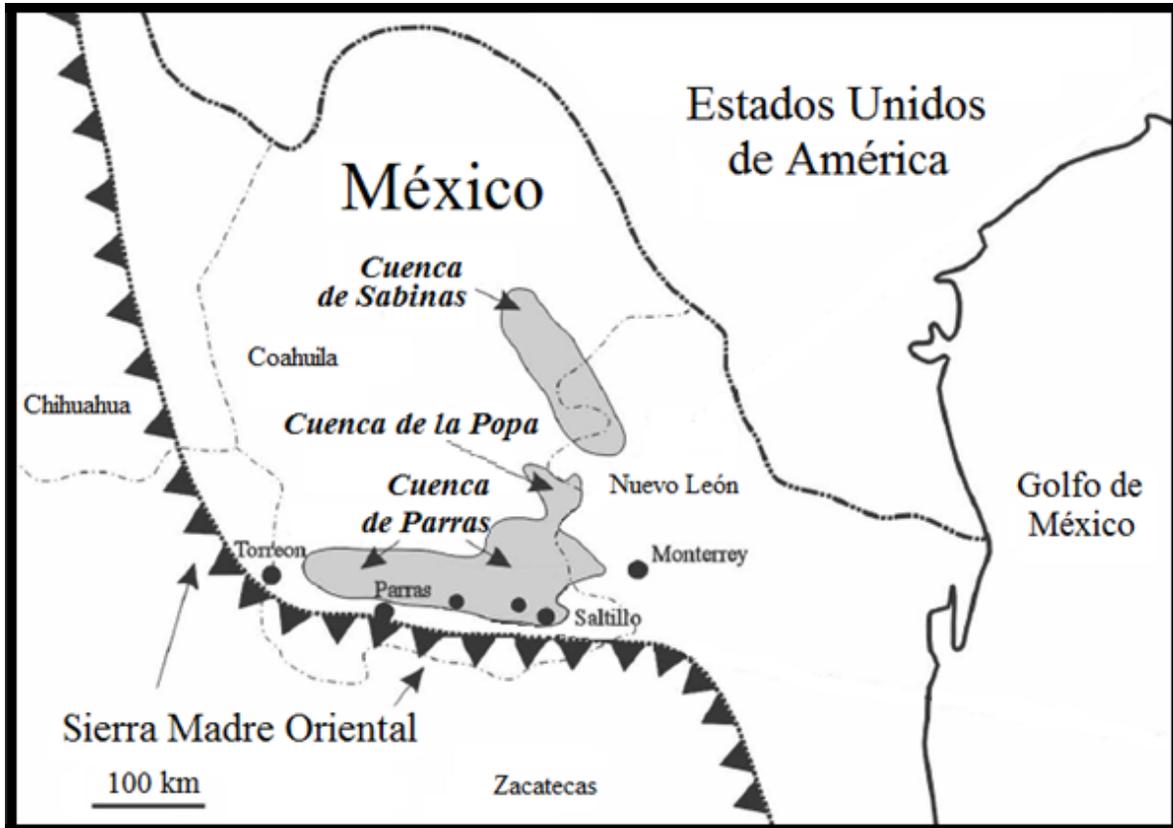
### 7.1 GEOLOGÍA

El área de estudio se encuentra situada en la provincia paleogeográfica de la Cuenca de Parras. Contiene alrededor de 5,500 m de una secuencia sedimentaria que abarcan desde el Mesozoico Superior hasta el Terciario. Cubre un área irregular de aproximadamente 30,000 km<sup>2</sup> (Weidie y Murray, 1967) en la parte sur del estado de Coahuila y también una parte de la región central este del estado de Nuevo León (Figura 2).

Las características estratigráficas y estructurales que presentan las estructuras de la Cuenca de Parras son fácilmente diferenciables y fueron divididas en tres zonas de distinta deformación: media, grande e intensa, al noreste, sureste, y sur-suroeste respectivamente (McBride et al., 1974). Estas estructuras son resultado del plegamiento que le sucedió a los sedimentos deltaicos del Grupo Difunta durante la última parte de la orogenia Laramide (Padilla y Sánchez, 1982).

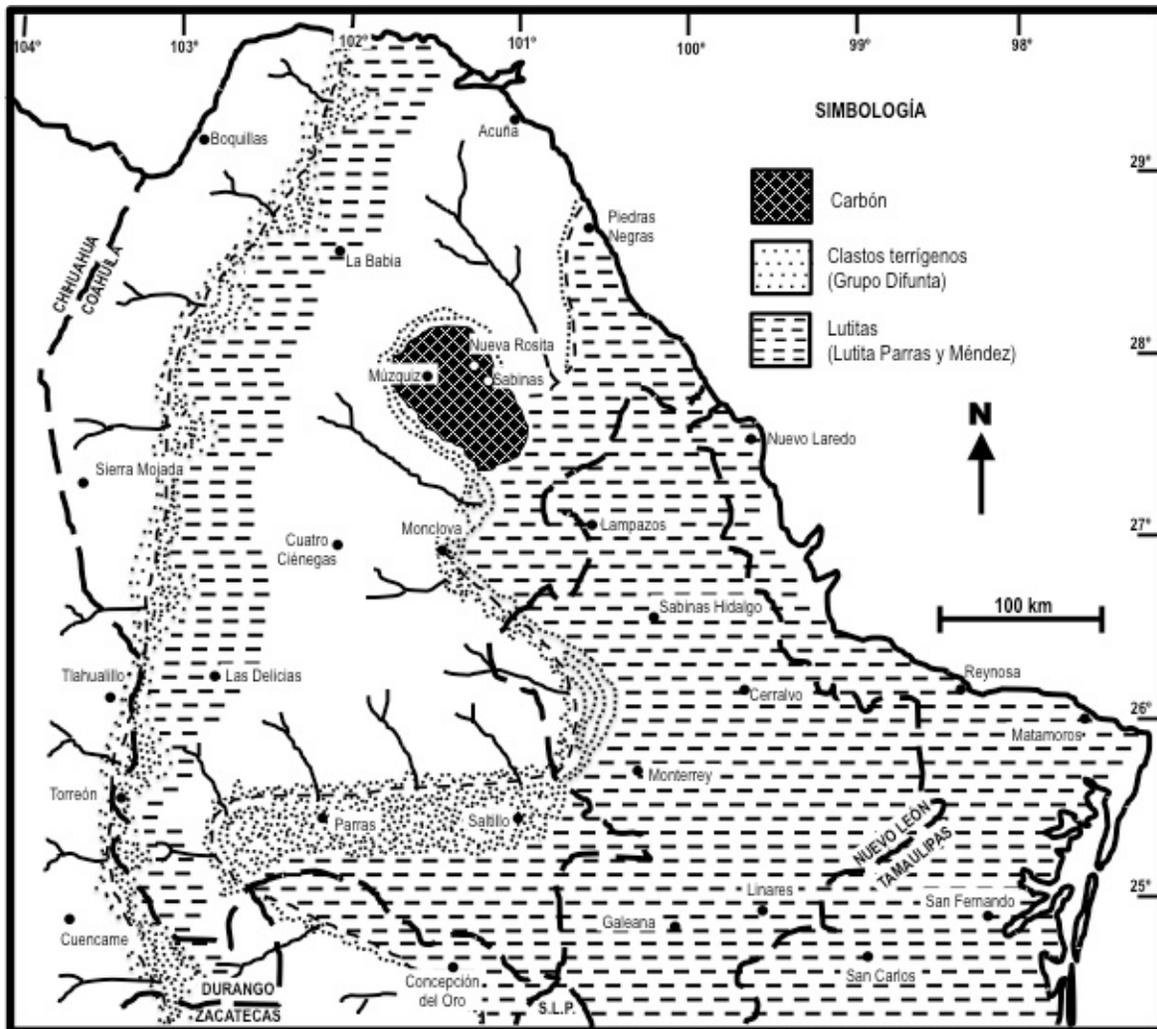
### 7.2 DESARROLLO PALEOGEOGRÁFICO

El inicio de la sedimentación de la Cuenca de Parras durante el Cretácico Tardío está caracterizada por sedimentos de carácter turbidítico de las Formaciones Cuesta del Cura, Indidura y Caracol. Debido a la continua subsidencia de la cuenca, durante el Cenomaniano-Turoniano la región quedó cubierta por aguas marinas (Padilla y Sánchez, 1985). Para el Santoniano Tardío se depositaron clastos de grano fino provenientes de elementos erosionados de la Sierra Madre Oriental ubicada al oeste, conformando una secuencia de lodolitas negras con intercalaciones aisladas de areniscas calcáreas correspondientes a la Formación Parras (Quintero-Legorreta y Aranda-García, 1985).



**Figura 2.** Mapa regional del noreste de México indicando la extensión y ubicación de la Cuenca de Parras. Modificado de Eberth *et al.* (2004).

Para el Cretácico Tardío, la interpretación del escenario ambiental que ocurría durante este periodo se encuentra aún en discusión. Durante el Campaniano-Maastrichtiano, el ambiente de depósito más aceptado es el dominado por eventos cíclicos producidos por transgresiones y regresiones de ambientes marinos, estuarinos y de agua dulce (McBride *et al.*, 1974; Rodríguez-De la Rosa y Cevallos-Ferriz, 1998; Kirkland *et al.*, 2000) que propiciaron el desarrollo de sistemas deltaicos que permitieron la compleja sedimentación del Grupo Difunta (Figura 3). Se sugieren ambientes como planicies costeras, prodeltas, planicies y plataformas deltaicas (Wolleben, 1977); así como planicies costeras influenciadas por cambios frecuentes en el nivel del mar o por eventos catastróficos naturales (Eberth *et al.*, 2004).



**Figura 3.** Paleogeografía del Noreste de México durante el Campaniano-Maastrichtiano. Tomado de Ángeles-Trigueros (2015).

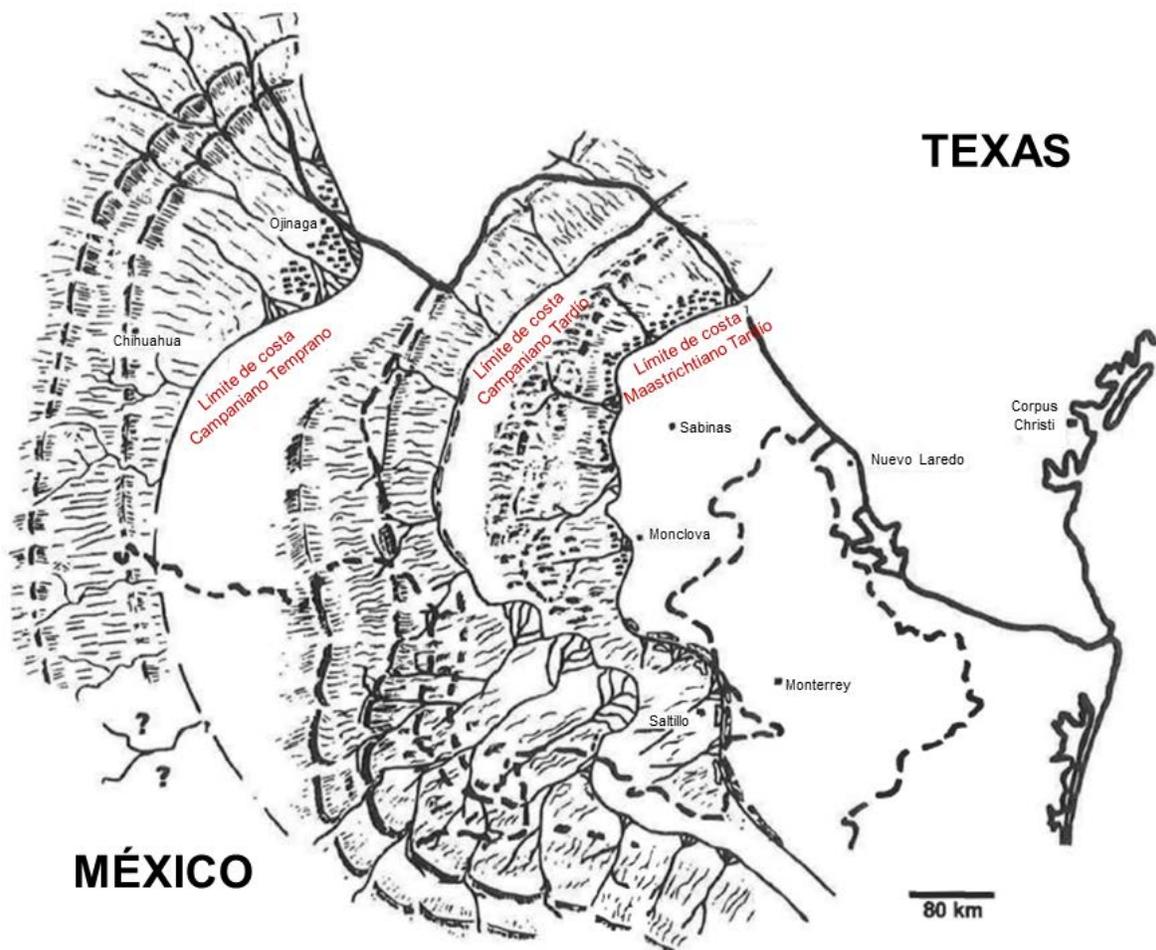
FACULTAD DE  
BIBLIOTECA "BIOL. N"

En cualquiera de los casos anteriores, se sugiere que los sedimentos más antiguos del grupo derivan de aportaciones fluviales provenientes del suroeste, oeste y noroeste de la región (McBride *et al.*, 1974), depositándose una secuencia clástica de areniscas y limolitas calcáreas de grano fino a medio de color gris-café; así como de lutita calcárea de color gris-negro con contenido de arenisca calcárea de grano grueso con tonalidades gris-café (Murray *et al.*, 1962), conglomerado (McBride *et al.*, 1974), y caliza formada por bancos de moluscos (Soegaard *et al.*, 2003) que corresponden a la Formación Cerro del Pueblo, la primera unidad del Grupo Difunta (Padilla y Sánchez, 1982; Kirkland, 2000; Vega-Vera *et al.*, 1989).

Posteriormente, durante lo que se sugiere fue la primera regresión marina predominó un ambiente de una extensa planicie deltaica que dio lugar a sedimentación formada por lodolita (85%), claystone (5%), arenisca (7%), limolita (2%), y conglomerado (1%) característica de la Formación Cerro Huerta (McBride *et al.*, 1974).

Más adelante, el mar regresó y predominó un ambiente de tipo frentes deltaicos, plataforma deltaica, prodelta y cuenca (McBride, 1974; Wolleben, 1977). La litología que se presenta es arenisca calcárea de grano fino color gris a ocre, limolita arenosa y lutita correspondientes a la Formación Cañón del Tule; la parte superior de la formación es más arenosa que la parte inferior (Murray *et al.*, 1962).

La segunda regresión marina produjo igualmente un ambiente de planicie deltaica con sedimentación terrígena. Esta secuencia litológica consta aproximadamente de 70% de lodolitas, 30% de areniscas y limolitas y cantidades traza de conglomerados, y se denomina como Formación Las Imágenes. Esta unidad es similar a la Formación Cerro Huerta y sólo se pueden distinguir una de otra debido a su posición estratigráfica (McBride *et al.*, 1974).



**Figura 4.** Paleogeografía del Noreste de México durante el Cretácico Tardío. Modificado de Kirkland *et al.* (2000).

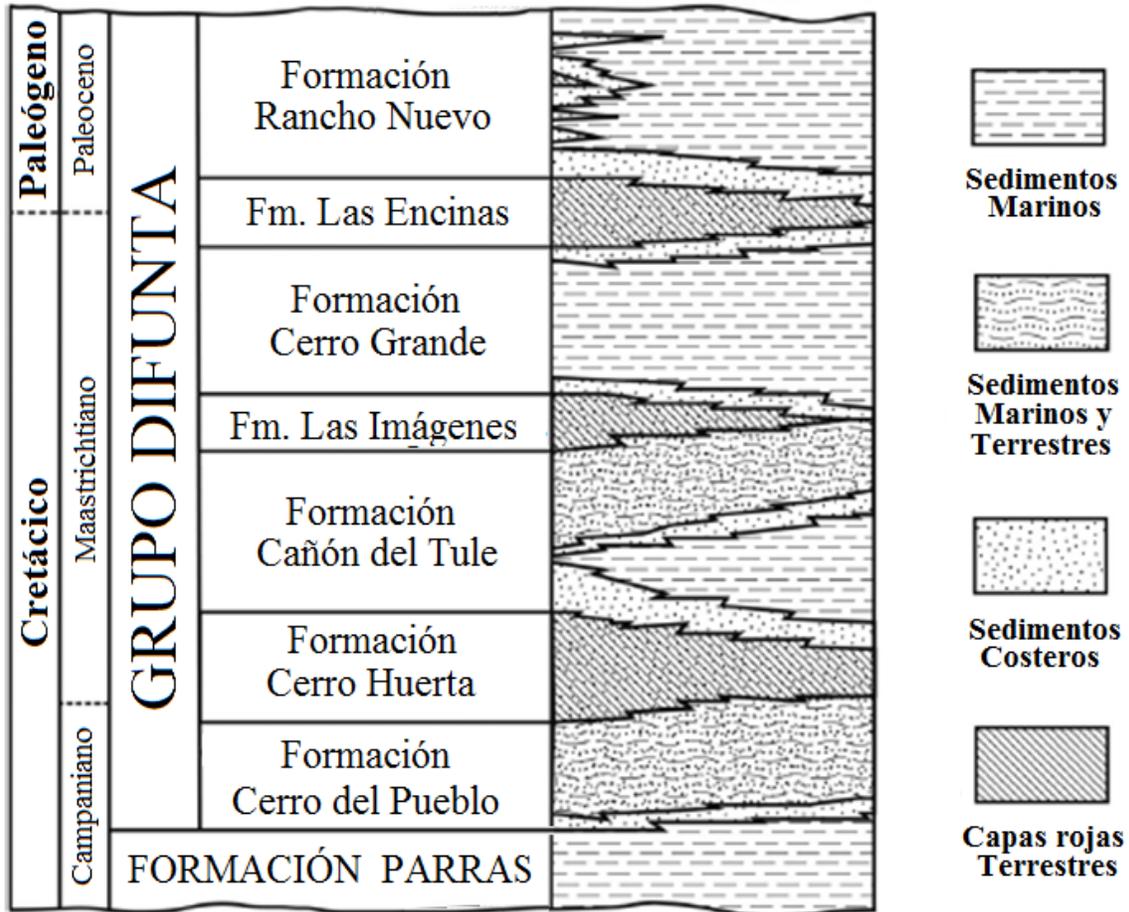
Durante el límite Maastrichtiano Tardío-Terciario predominó un ambiente de complejos deltaicos donde se incluyen prodeltas, frentes, planicies, plataformas y flancos (Wolleben, 1977; Soegaard *et al.*, 2003), aunque también se han reportado ambientes tipo llanuras costeras y canales tributarios (McBride *et al.*, 1974), y ambientes con ciclos de transgresiones y regresiones marinas (Crawley, 1975; Kirkland *et al.*, 2000). La sedimentación que ocurrió debido a este ambiente fue una secuencia compuesta por areniscas argilíticas calcáreas, de tonos grises y cafés, y se caracteriza por presentar un gran porcentaje de materiales detríticos de grano grueso que corresponden a la Formación Cerro Grande. Se añade la presencia de limolita y arenisca con intercalaciones de arenisca conglomerática,

así como glauconita de manera local. McBride *et al.*, (1974) confirma la composición de la unidad por arenisca y arcilla de granos gruesos (70%), lutita (30%) y de conglomerado de pedernal y guijarros (0.5%).

Durante el límite Cretácico Tardío-Terciario predominó un ambiente de planicie costera y deltaica que propició la sedimentación de limolita calcárea de color rojo, y en menor medida arenisca calcárea roja de grano fino, lutitas y arcillas de tonos rojos y verdes, así como arenisca roja de grano medio a grueso que corresponden a la Formación Las Encinas (Murray *et al.*, 1962). McBride *et al.*, (1974) confirma la composición de la unidad en 45% de arcillas, 30% de lutitas y 15% de arenisca o limolita.

Tras el depósito de la Formación Las Encinas, predominó un ambiente de depósito de plataforma marina, incluyendo depósitos de planicie deltaica, frente deltaico, planicie de marea y depósitos de bancos carbonatados que dieron lugar a una sedimentación con predominancia de areniscas (80%), lodolitas (12%) y de calizas (5%) de la Formación Rancho Nuevo (McBride *et al.*, 1974), última unidad del Grupo Difunta.

W Cuenca de Parras E



**Figura 5.** Columna estratigráfica de la parte central de la Cuenca de Parras mostrando las divisiones del Grupo Difunta (modificado de Vogt *et al.*, 2016).

FACULTAD DE...  
BIBLIOTECA "BO...M"

### 7.3 FORMACIÓN CERRO DEL PUEBLO: DEFINICIÓN Y LITOLOGÍA

- Descripción

La Formación Cerro del Pueblo fue descrita por primera vez por Imlay (1936), quien originalmente la definió como Formación Difunta. Años más tarde Murray *et al.* (1962) define formalmente a esta unidad como Grupo Difunta en la Cuenca de Parras, asignando siete unidades litológicas (formaciones) a este grupo, siendo la Formación Cerro del Pueblo la más antigua.

- Localidad tipo

La Formación Cerro del Pueblo tiene su localidad tipo en el cerro del mismo nombre situado en el límite noroeste de la ciudad de Saltillo (Murray *et al.*, 1962). Sin embargo, Eberth *et al.* (2004) proponen tres nuevas secciones de referencia como neoestratotipo, dado que el agrandamiento de la ciudad de Saltillo ha urbanizado el Cerro del Pueblo, quedando mal expuesto el estratotipo original propuesto por Murray *et al.* (1962).

- Descripción litológica

En su descripción original, Murray *et al.* (1962) mencionan que la Formación Cerro del Pueblo en la localidad tipo consiste principalmente de arenisca calcárea y limolita color gris-café de grano fino a medio, de lutita calcárea de color gris-negro de textura físil a nodular, y en menor proporción de arenisca calcárea de grano grueso color gris-café. De acuerdo a este autor, este carácter litológico es relativamente uniforme a través de las secciones de la formación, la cual se distribuye a lo largo de toda la Cuenca de Parras pero aflora sólo en la parte central y oeste de la cuenca (Murray *et al.*, 1962; McBride *et al.*, 1974).

Esta unidad litoestratigráfica exhibe distintos espesores que varían desde 310 m en la localidad tipo (Murray *et al.*, 1962), hasta 540 m en la localidad de Las Águilas, y se continua engrosando en dirección oeste hacia la ciudad de Saltillo

(Eberth *et al.*, 2004). A lo largo de la Cuenca de Parras, la Formación Cerro del Pueblo presenta algunas variaciones litológicas. Por ejemplo, en la localidad de La Escondida presenta una tendencia a una frecuencia mayor de lodos calcáreos limo-arenosos, muy similar a lo presente en la localidad de Rincón Colorado, además de presentar coquinas y/o areniscas hacia el techo de la unidad (Eberth *et al.*, 2004). Por otro lado, en la localidad de Las Águilas se observa una mayor cantidad de estratificación lenticular (Eberth *et al.*, 2004), y en otros sitios como la localidad de Benito Juárez se distingue por la presencia de capas de la glauconita (Murray *et al.*, 1962).

Un rasgo importante reportado por McBride *et al.* (1974) es la presencia de depósitos cíclicos y no cíclicos de lodolita (limolita y lutita) y arenisca fina alternando con cuerpos de canal rellenos con arenisca, observable en la localidad tipo y que han aportado información para la interpretación del ambiente de depósito.

- Contactos

La base de la Formación Cerro del Pueblo está definida por la capa más baja de arenisca mayor a un metro que sobre yace concordantemente a las lodolitas de la Formación Parras, y subyace concordantemente a la primera capa roja o verde de la Formación Cerro Huerta (Murray *et al.*, 1962). La formación es lateralmente equivalente a la Formación Méndez al este (Murray *et al.*, 1962) y a la parte superior de la Formación Muerto también al este de las cuencas de Parras y La Popa (McBride *et al.*, 1974).

- Contenido fósil

La Formación Cerro del Pueblo es conocida por su amplio contenido paleontológico. Se registra una compleja estratigrafía de capas ricas en material fósil (vertebrados e invertebrados terrestres y marinos, así como plantas) intercaladas con capas de limolita y areniscas calcáreas (Eberth *et al.*, 2004) repitiéndose en intervalos de unos cuantos metros (Kirkland *et al.* 2000).

Se encuentra gran cantidad de invertebrados tanto marinos como de agua dulce (Murray *et al.*, 1962; Wolleben, 1977; Cifuentes-Ruiz *et al.*, 2006; Vogt *et al.*, 2016), observándose varios ejemplares de moluscos como amonites, gasterópodos, y bivalvos (Vivas-González, 2013; Vogt *et al.*, 2016), en las capas basales de areniscas (McBride *et al.*, 1974). Kirkland *et al.* (2000) registran tres conjuntos distintivos de invertebrados marinos que se repiten en intervalos de unos cuantos metros, siendo el primero de organismos de agua dulce, el segundo un conjunto de organismos estuarinos, y el tercero un conjunto de organismos de aguas salobres; Eberth *et al.* (2004) reportan que los invertebrados marinos aparecen solamente en dos zonas discretas de la formación: una en la parte superior de la arenisca basal (15-24 metros), y la otra en la parte superior del primer tercio de la sección (115-125 metros). Se reporta muy poca cantidad de microfósiles (Vivas-González, 2013).

Numerosos ejemplares de plantas fósiles han sido colectados en esta unidad, entre ellos se encuentran restos de las familias Musaceae y Strelitziaceae (Rodríguez-de la Rosa y Cevallos-Ferriz 1994), Phytolaccaceae (Cevallos-Ferriz *et al.*, 2008), Hamamelidaceae (Pérez-Hernández y Cevallos-Ferriz, 1998), Ranunculaceae y Lythraceae (Rodríguez-de la Rosa *et al.* 1998).

Se reportan también algunos fragmentos de madera fósil (Murray *et al.*, 1962; McBride *et al.*, 1974), estructuras reproductivas de algas carofitas (Vogt *et al.*, 2016) y ejemplares completos del género *Platychara sp.* y *Porochara gildemeisteri* (Aguillón-Martínez, 2010).

Una gran cantidad de infrutescencias permineralizadas han sido registradas, siendo algunas de ellas asignadas a los géneros *Striatornata sanantoniensis* y *Tricostatocarpon silvapinedae*, relacionadas al orden Zingiberales (Rodríguez-de la Rosa y Cevallos-Ferriz, 1994), otras asignadas al género *Operculifructus* (*O. lopezii* y *O. latomatensis*) con caracteres que las asemejan a miembros de Alismatales (Estrada-Ruiz, 2004; Estrada-Ruiz y Cevallos-Ferriz, 2007), y *Coahuilacarpon phytolaccoides*, similar al género actual *Phytolacca* (Cevallos-

Ferriz *et al.*, 2008). Por otro lado, un fruto con caracteres similares a miembros de Hamamelidaceae y Platanaceae, y representantes extintos de Proteales han sido documentados por Vázquez-Rueda *et al.* (2011).

Cevallos-Ferriz y Vázquez-Rueda (2016) reportan hallazgos de infrutescencias permineralizadas pertenecientes a un género extinto *Patocarpus coahuilensis*, de la familia de las Proteales. También se han reportado ejemplares de plantas acuáticas (Eberth *et al.*, 2004) asignadas a *Ceratophyllum lesii* (Ceratophyllaceae) y *Decodon tiffneyi* (Lythraceae) en dos distintas localidades (Estrada-Ruiz y Cevallos-Ferriz, 2007; Estrada-Ruiz *et al.*, 2009), una nueva especie de flor *Coahuilanthus belindae* (Rhamnaceae) (Calvillo-Canadell, 2000; Calvillo-Canadell y Cevallos-Ferriz, 2007), así como hojas de palma (Vogt, 2016).

Mucho del trabajo paleontológico de la formación se concentra en ejemplares de vertebrados terrestres y marinos representados por los siguientes taxones: peces (Rodríguez-de la Rosa y Cevallos-Ferriz 1998; Vivas-González, 2013), anura, caudata, squamata (Aguillón-Martínez, 2010; Vivas-González, 2013), crocodylia (Rodríguez-de la Rosa y Cevallos-Ferriz 1998; Aguillón-Martínez, 2010; Vivas-González, 2013), testudines (Rodríguez-de la Rosa y Cevallos-Ferriz 1998; Aguillón-Martínez, 2010; García y Reynoso, 2002; Brinkman y Rodríguez de la Rosa, 2006; Brinkman *et al.*, 2009, 2016; Vivas-González, 2013; Brinkman, 2014). Existen también hallazgos de los taxones pterosauria (Rodríguez-de la Rosa y Cevallos-Ferriz 1998), plesiosauria (Vogt *et al.*, 2016) y lepidosauromorpha (Eberth *et al.*, 2003).

También existe información sobre icnofósiles donde se realiza un compendio de los trabajos que se han publicado en México (Rodríguez-de-la-Rosa *et al.*, 2004), y en la Formación Cerro del Pueblo sobre huellas de distintos vertebrados (Rodríguez-de la Rosa, 1998, 2003, 2007; Eberth *et al.*, 2004; Vivas-González, 2013; Vogt, 2016) y coprolitos que contienen insectos, huesos, cutículas y semillas (Rodríguez-de la Rosa *et al.*, 1998). Muchos de estos coprolitos se han preservado como nódulos de fosfato, o en algunos casos como nódulos de siderita

(Kirkland *et al.*, 2000). También se encuentran dientes de tiburón, lentes de conglomerado que contienen a su vez madera fósil y nódulos de calcita (Eberth *et al.*, 2004).

Existe mucha información acerca de dinosaurios en México (Hernández-Rivera, 1997, 2000; Ramírez-Velasco y Hernández-Rivera, 2015). La Formación Cerro del Pueblo es una unidad importante y cuenta con distintos grupos taxonómicos registrados como Tyrannosauridae (Aguillón-Martínez, 2010; Rivera-Sylva *et al.*, 2011; Vivas-González, 2013; Rivera-Sylva y Carpenter, 2014), Ornithomimidae (Torres-Rodríguez, 2006; Aguillón-Martínez, 2010; Rivera-Sylva *et al.*, 2011; Vivas-González, 2013; Rivera-Sylva y Carpenter, 2014), Dromaeosauridae (Aguillón-Martínez, 2010; Vivas-González, 2013), Velociraptorinae (Aguillón-Martínez, 2010), Troodontidae (Rodríguez-de la Rosa y Cevallos-Ferriz, 1998; Aguillón-Martínez, 2010; Rivera-Sylva y Carpenter, 2014), y otros Theropoda (Rodríguez-de la Rosa y Cevallos-Ferriz, 1998; Torres-Rodríguez, 2006; Aguillón-Martínez, 2010; Rivera-Sylva y Carpenter, 2014); Nodosauridae (Martínez-Díaz, 2011; Rivera-Sylva *et al.*, 2011), Ankylosauria (Rivera-Sylva y Espinosa-Chávez, 2006; Rivera-Sylva *et al.*, 2011), Ceratopsidae (Hernández-Rivera *et al.*, 1995; Aguillón-Martínez, 2010; Loewen *et al.*, 2010), Centrosaurinae (Loewen *et al.*, 2010), Chasmosaurinae (Lund *et al.*, 2007; Loewen *et al.*, 2010), Hadrosauridae (Rodríguez-de la Rosa y Cevallos-Ferriz, 1998; Hernández-Rivera y Delgado-de Jesús, 2000; Kirkland *et al.*, 2006; Serrano-Brañas, 1997, 2006; Serrano-Brañas *et al.*, 2009; Vivas-González, 2013; Ramírez-Velasco *et al.*, 2014; Serrano-Brañas y Espinosa-Chávez, 2017), Hadrosaurinae (Kirkland *et al.*, 2006; Brinkman *et al.*, 2002), Lambeosaurinae (Espinosa-Arrubarrena *et al.*, 1989; Serrano-Brañas, 1997, 2006; Gates, 2007; Gates *et al.*, 2007; Prieto-Márquez y Serrano-Brañas, 2012; Vivas-González, 2013; Aguilar *et al.*, 2014; Ramírez-Velasco *et al.*, 2014; Rivera-Sylva y Carpenter, 2014), Saurolophinae (Serrano-Brañas *et al.*, 2006; Prieto-Márquez y Serrano-Brañas, 2012; Ramírez-Velasco *et al.*, 2014) del clado Ornithischia.

Ejemplares de mamíferos multituberculados y marsupiales como el de los grupos taxonómicos Taeniolabididae, Cimolomyidae, y los géneros extintos *Turgidodon sp.* y *Pedionomys sp.* (Aguillón-Martínez *et al.*, 2004; Aguillón-Martínez, 2010).

- Edad

La edad de la Formación Cerro del Pueblo fue considerada por mucho tiempo de Campaniano Superior-Maastrichtiano Inferior (Murray *et al.*, 1962; McBride *et al.*, 1974; Ifrim *et al.* 2010) debido a la presencia de *Exogyra costata* (Wolleben, 1977) que transiciona a *Exogyra ponderosa* en la parte baja de la unidad al centro y oeste de la Cuenca de Parras y La Popa. Sin embargo, estudios más recientes la ubican más precisamente en el Campaniano tardío debido a la presencia del bivalvo *Inoceramus vanuxemi* (Vogt *et al.*, 2016), ya que la superposición del rango estratigráfico con el amonite *Sphenodiscus* es correlativa con *Baculites reesidei* y *B. jenseni* en Estados Unidos (Kirkland *et al.*, 2000; Eberth *et al.*, 2004).

Estudios magnetoestratigráficos indican que la unidad fue depositada en las magnetocronozonas 32n.3r-32n.2n con una edad máxima absoluta de 72.3 millones de años (Eberth *et al.*, 2004), y a través de mediciones de isótopos de estroncio en conchas de ostiones fósiles se prevee una edad absoluta de hasta 73.1 millones de años (Vogt *et al.*, 2016), correspondiendo al Campaniano Tardío.

- Ambiente de depósito

Debido a la extensión y complejidad de la unidad, los estudios hasta hoy realizados sobre el ambiente de depósito de la formación pueden diferir de una localidad a otra (ej. ambientes estuarinos contra evento de tipo catastrófico natural como inundaciones o crecidas de río). Sin embargo, dichos estudios coinciden en que la Formación Cerro del Pueblo dominaba un ambiente marino somero.

Las estructuras sedimentarias y el material fósil de flora y fauna sugieren que los sedimentos de la Cuenca de Parras fueron depositados en una extensa planicie costera de bajo gradiente y entornos marinos poco profundos. Según Soegaard *et al.* (2003) estos depósitos pertenecieron a cortos eventos cíclicos de transgresión y regresión asociados con progradación y retrogradación de deltas que desembocaban en el antiguo Golfo de México. El resultado fue la formación de ambientes pantanosos cercanos a la costa (Kirkland *et al.*, 2000). McBride *et al.* (1974) mencionan que las transgresiones fueron el resultado de la subsidencia de la cuenca y las regresiones resultado de su estabilidad, creando así ambientes intermitentes límnicos, estuarinos y marinos someros durante el Campaniano tardío-Maastrichtiano temprano (Kirkland *et al.*, 2000; Vogt *et al.*, 2016).

Los regímenes de deposición en la llanura costera incluyen canales pequeños de baja sinuosidad, diques, humedales ricos en vegetación, lagos, estanques y sedimentos de bahía (McBride *et al.*, 1975). Los ambientes estuarinos se reconocen debido a la presencia de invertebrados marinos como *Lissapiopsis sp.* y *Cerithium nodosa* junto a organismos de agua dulce como *Trionyx sp.* (Vivas-González, 2013).

Por otro lado, Eberth *et al.* (2004) señalan poca evidencia de la existencia de deltas. Mencionan que la Formación Cerro del Pueblo estaba conformada por depósitos de planicies costeras que fueron dominados por canales, diques y lagunas, estableciendo un ambiente de depósito producido por cambios episódicos de transgresión-regresión y/o a eventos de tormentas extremas que puntuaron la sucesión general de regresión, dejando áreas inundadas a nivel cercano de la costa. Mencionan que las capas ubicadas al sur de la Cuenca de Parras consisten en sedimentos depositados durante dos distintas fases de progradación: una fase temprana cuando la subsidencia fue más alta al oeste y los clastos progradaron lentamente hacia el este rellenando el canal desde Parras hasta Saltillo. Una segunda fase cuando la zona de máxima subsidencia había cambiado hacia el este y los clastos progradaron hacia el norte de Saltillo, formando una vasta cuña clástica.

Las muestras de sedimento no revelan la presencia de ningún tipo de microfósil que aporte mayor información con respecto al ambiente de depósito de la formación (Vivas-González, 2013).



FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS  
BIBLIOTECA "BIÓL. MARÍA ANA GARZA BARRIENTOS"

## 8. DESCRIPCIÓN MORFOLÓGICA Y ANATÓMICA DE LOS EJEMPLARES FÓSILES

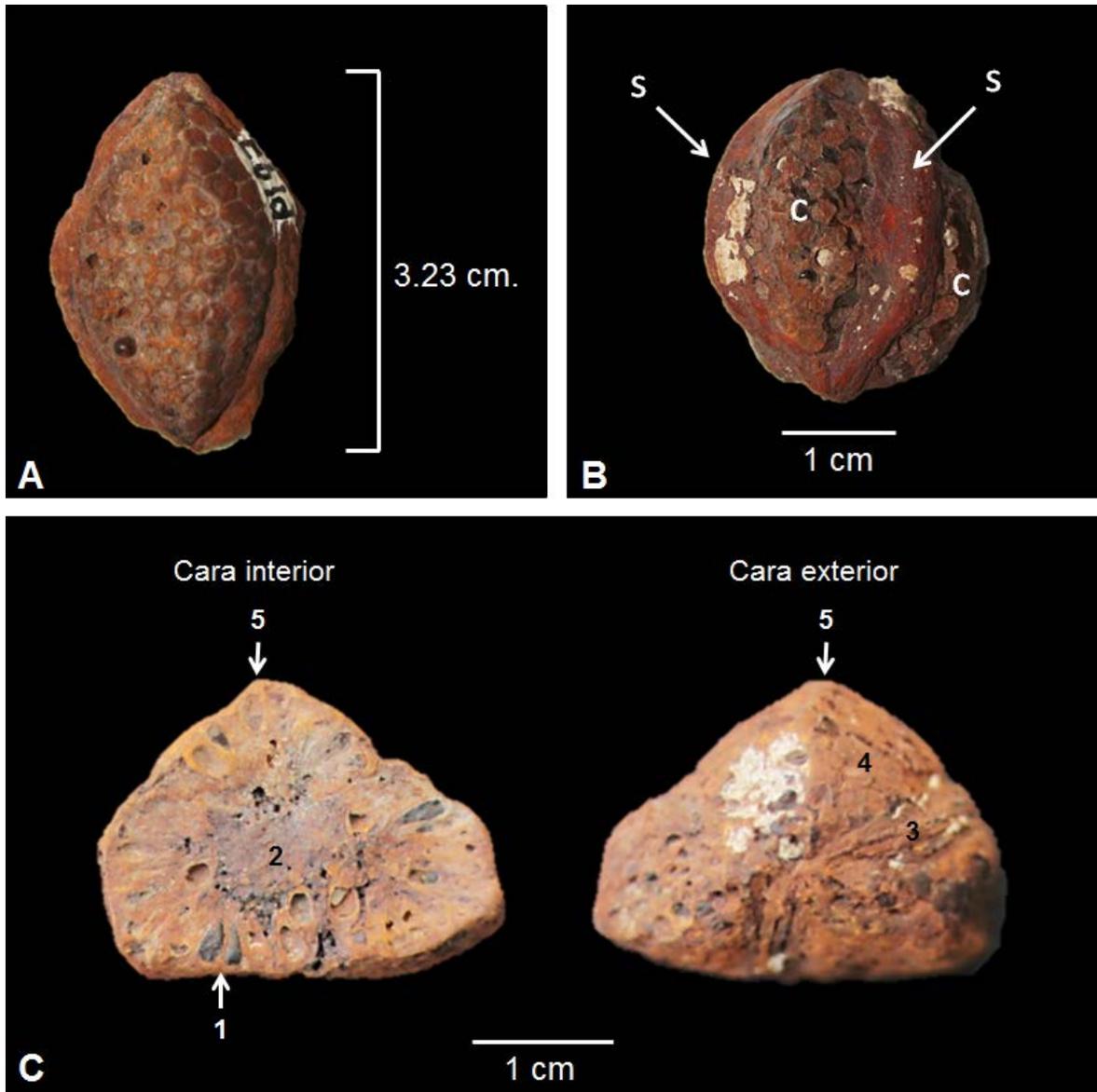
### 8.1 FRUTOS

Un total de 10 frutos fósiles fueron descritos. Su tamaño varía aproximadamente entre 3.84 cm a 2.50 cm de largo y 2.93 cm a 1.90 cm de ancho.

Los ejemplares muestran una forma elíptica y fusiforme en vista longitudinal, y en sección transversal se observa un contorno subtriangular debido a que tienen una estructura tricarpelar y trilocular. Cada lóculo se encuentra separado uno de otro por septos formados por la fusión de las paredes carpelares laterales, proyectándose hacia el exterior formando tres costillas longitudinales arcos que sobresalen por encima de la pared carpelar que cubre los lóculos (Figura 6).

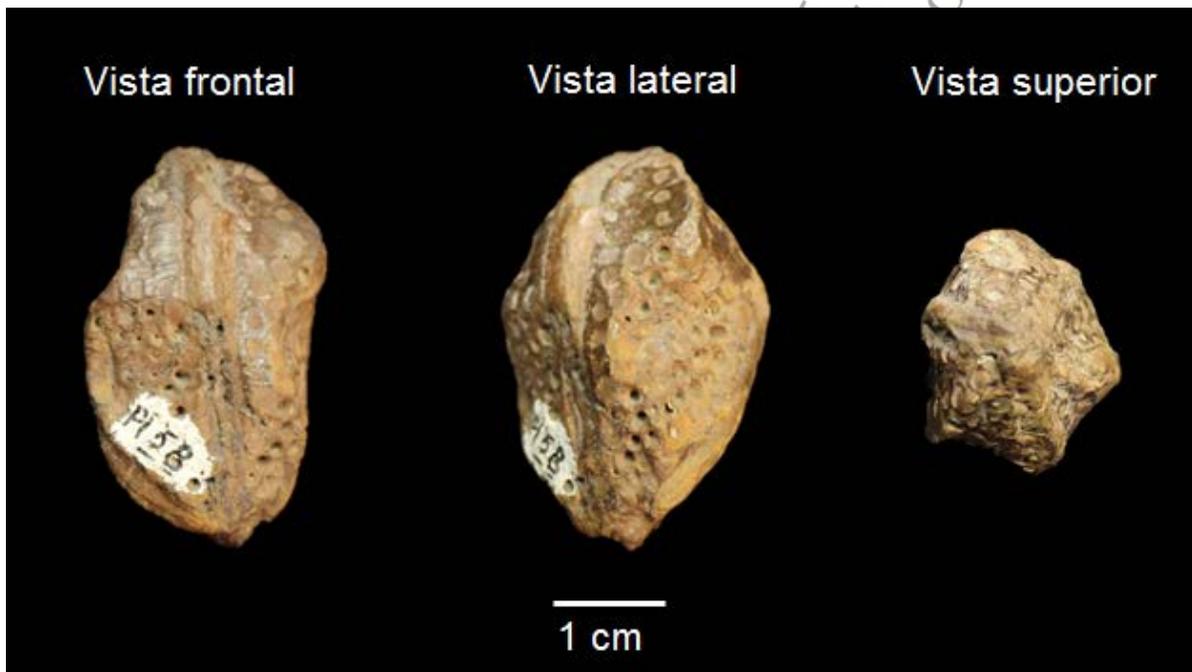
En el plano dorsal medio de la pared externa de cada carpelo, un borde longitudinal paralelo a las costillas atraviesa el fruto (Figura 6.C). Esto puede ser resultado del acomodo aglutinado de la gran cantidad de semillas que se presentan. La zona que correspondería a la placenta de forma elíptica, que se encuentra al centro donde está el eje.

Se observó que el pericarpio, constituido por los septos y la pared carpelar, se encuentra sustituido por óxidos de hierro.



**Figura 6.** Frutos fósiles de la Formación Cerro del Pueblo. **A.** Fruto fósil mostrando una estructura elíptica y fusiforme. **B.** Ubicación de los septos y los carpelos. **C.** Corte transversal del fruto mostrando un contorno subtriangular. 1. Semillas. 2. Placenta. 3. Costilla exterior del septo. 4. Carpelos. 5. Borde longitudinal que se extiende a la mitad de cada carpelo.

A pesar que todos los ejemplares presentan la misma anatomía, algunos presentan una morfología distinta, deformada, algo más aplanada y/o más o menos alargada, teniendo también una distancia desigual entre cada costilla (Figura 7). Esta condición es probablemente consecuencia de los distintos procesos tafonómicos que sufrieron los frutos durante la fosilización.



**Figura 7.** Ejemplar fósil que muestra cierto grado de deformación.

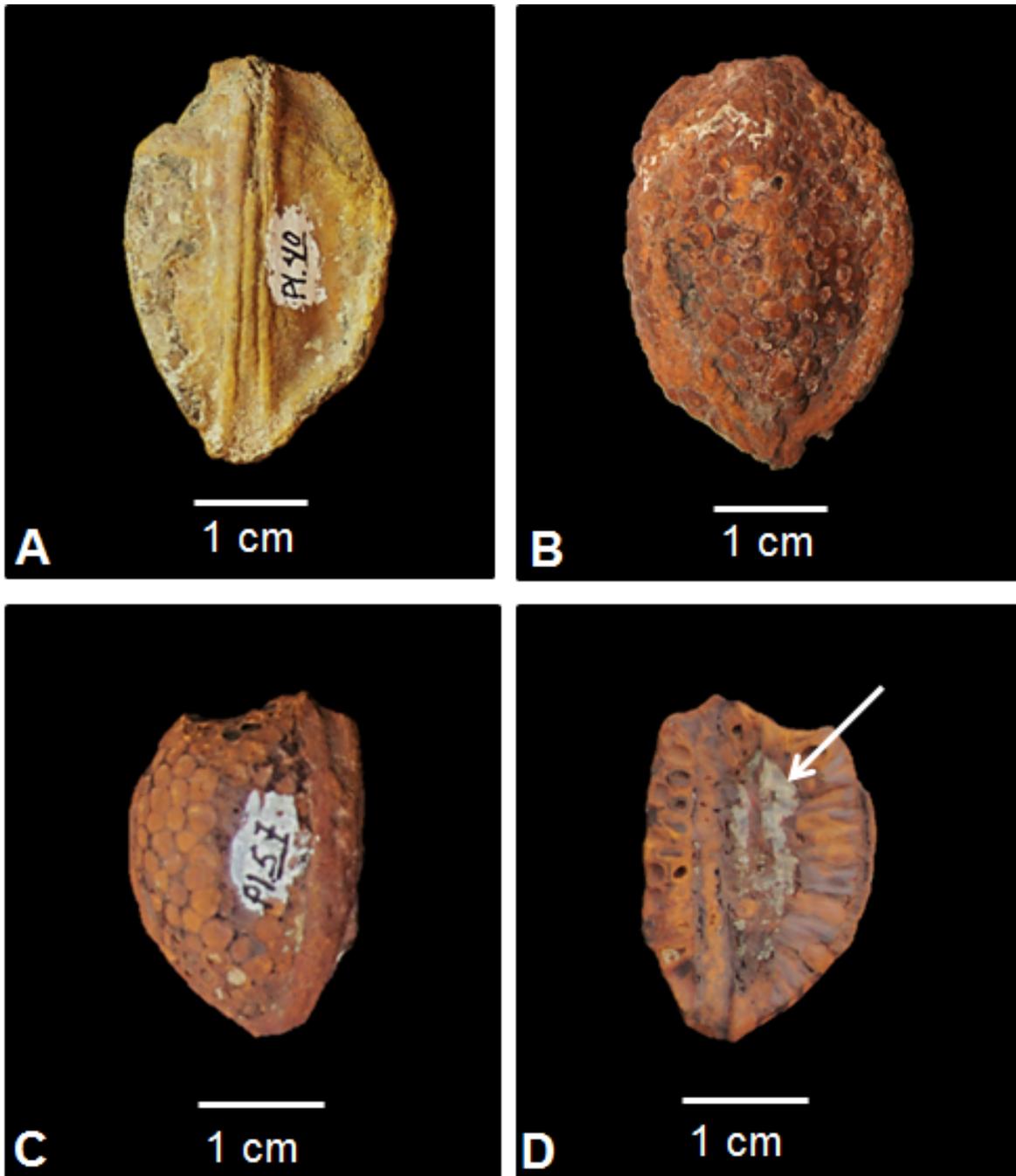
El estilo de preservación puede variar de un ejemplar a otro. En algunos frutos el pericarpio está completo imposibilitando la observación de las semillas (Figura 8.A). Sin embargo, en la mayoría de los ejemplares no se presenta esta estructura, y se puede observar una ornamentación a manera de red poliédrica que corresponde a la parte superior de las semillas que se encuentran dentro de los carpelos (Figura 8.B. y C). La preservación parcial del pericarpio es posiblemente debida a la erosión de la superficie externa del fruto y al proceso de cristalización durante la fosilización. En algunos ejemplares, el centro del fruto se observa reemplazado por cristales (Figura 8.D).

## 8.2 SEMILLAS

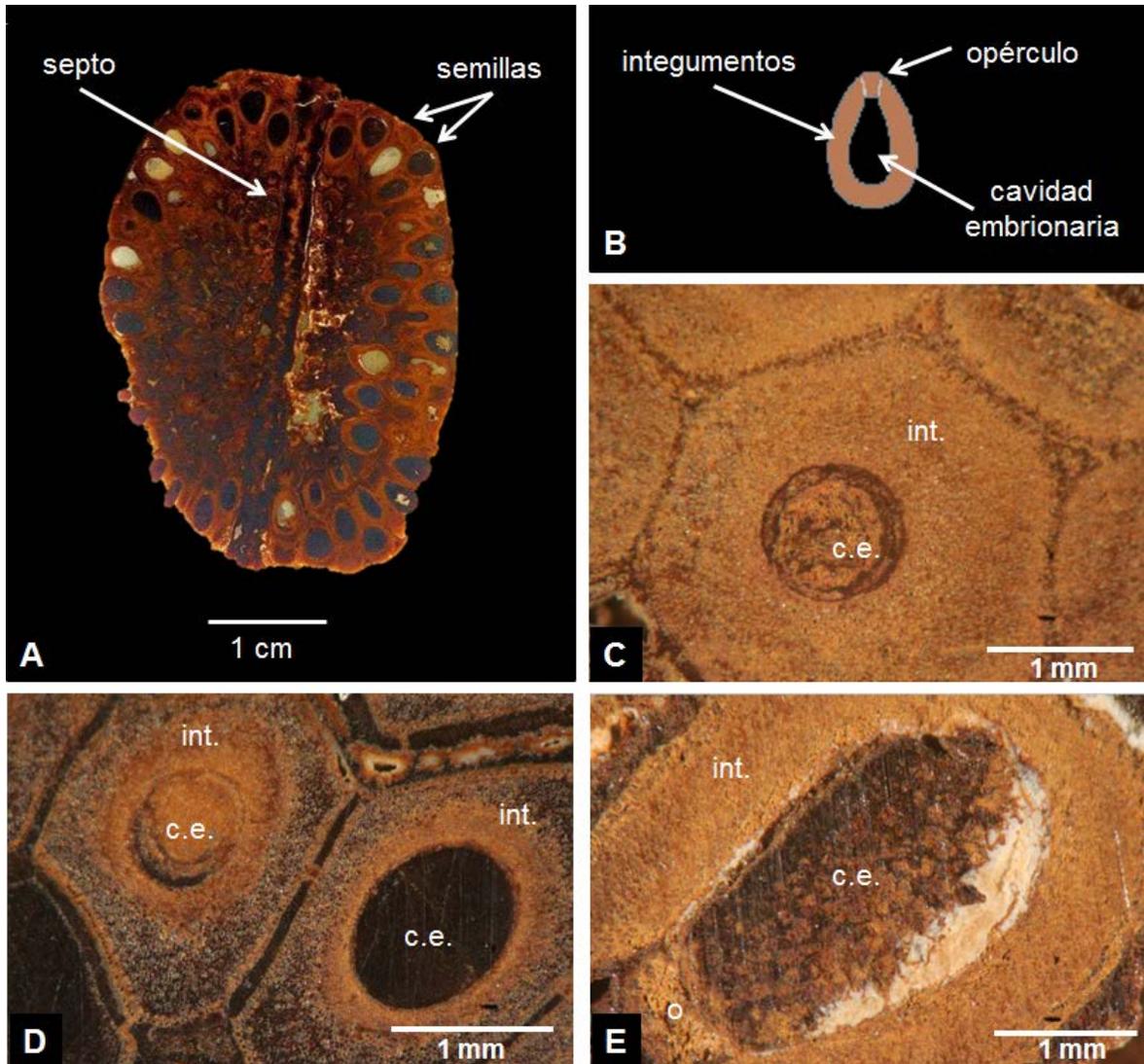
Las semillas son piriformes, anátropas y operculadas, organizadas en cuatro a ocho filas horizontales dentro de cada lóculo (Figura 9.A). En vista longitudinal las semillas presentan un contorno piriforme con la porción proximal estrecha, y la distal más amplia (Figura 9.B). En sección transversal muestran un contorno poliédrico de tipo hexagonal (Figura 9.C y D).

Estructuralmente, se pueden observar tres zonas bien definidas, la zona de los integumentos, la cavidad embrionaria y el opérculo que comunica al área micropilar (Figura 9.E).

En los integumentos se presentan dos zonas que en la mayoría de los casos se encuentran bien conservadas y diferenciadas. La zona integumentaria exterior consta de tres capas celulares distintas: la más externa está formada de una capa gruesa y sencilla de células cilíndricas, observándose sólo los moldes externos gracias a los minerales infiltrados entre las semillas. La capa media la constituyen las células de menor tamaño de la zona integumentaria exterior, sin embargo es la parte más gruesa, formada aproximadamente por 20 filas de células poliédricas e isodiamétricas. La capa interna se haya compuesta aproximadamente de cinco a diez capas de células cilíndricas (Figura 10.A). La zona integumentaria interior es muy delgada y el límite de capas celulares internas es difícil de observar (Figura 10.A).



**Figura 8.** A. Pericarpio preservado. B y C. Ornamentación a manera de red poliédrica donde se observa la parte superior de las semillas debido a la ausencia del pericarpio. D. Reemplazamiento de la placenta por cristales (la flecha blanca indica los cristales formados dentro del fruto).



**Figura 9.** A. Corte longitudinal del fruto mostrando la disposición de las semillas. B. Dibujo de la morfología de la semilla (modificada de Rodríguez de la Rosa y Cevallos-Ferriz, 1994). C y D. Corte transversal de la semilla donde se puede observar el contorno hexagonal. E. Corte longitudinal de una semilla observando sus partes: c.e.-cavidad embrionaria; int.-integumentos.

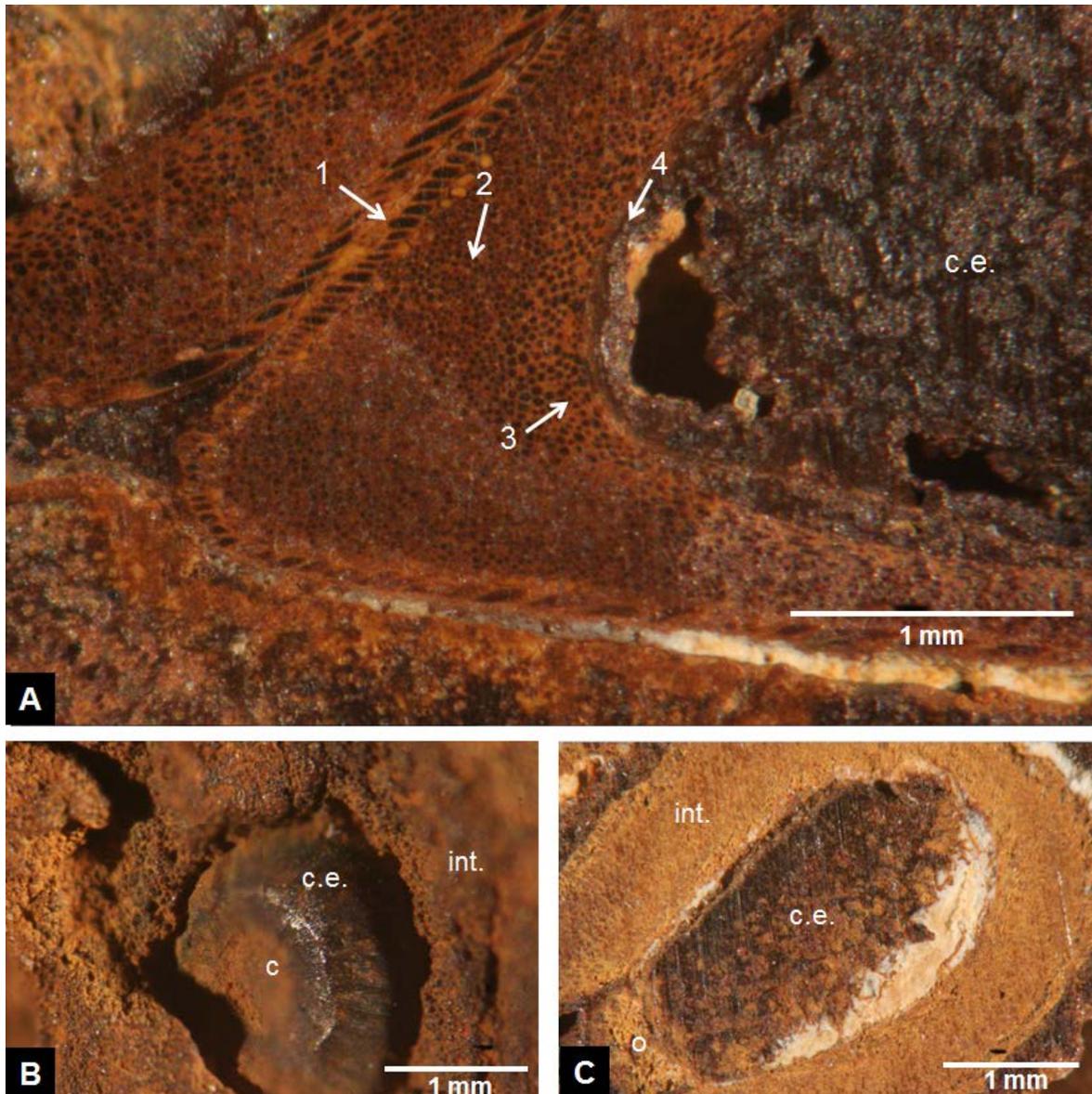
FACULTAD DE BIOLOGÍA  
BIBLIOTECA DE BIOLOGÍA

La cavidad embrionaria ocupa la porción central de la semilla y presenta un contorno piriforme, y en su parte distal se observa una cicatriz en forma de cavidad que corresponde a la cálaza (Figura 10.B). El opérculo, también de forma piriforme, se encuentra en la parte proximal de la semilla, con un canal opercular central que lo atraviesa (Figura 10.C).

Las semillas presentan diversos modos de preservación. La cavidad embrionaria se encuentra generalmente sustituida por distintos minerales que forman un molde interno (Figura 11), dado a que sus estructuras son volátiles y difíciles de fosilizar. En ciertos casos, cuando el molde interno es sustituido por un mineral compacto y oscuro, da la apariencia de ser la semilla (Figura 12.A).



FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS  
BIBLIOTECA "BIÓL. MARÍA ANA GARZA BARRANTES"



**Figura 10. A.** Corte transversal de una semilla observando sus capas composicionales. C.e.-cavidad embrionaria; 1-3-Zona integumentaria exterior: 1-capa exterior, 2-capa media, 3-capa interior; 4-Zona integumentaria interior. **B.** Cavidad embrionaria de la semilla expuesta. **C.** Corte longitudinal de una semilla observando sus partes: c.e.-cavidad embrionaria; int.-integumentos; o-opérculo.

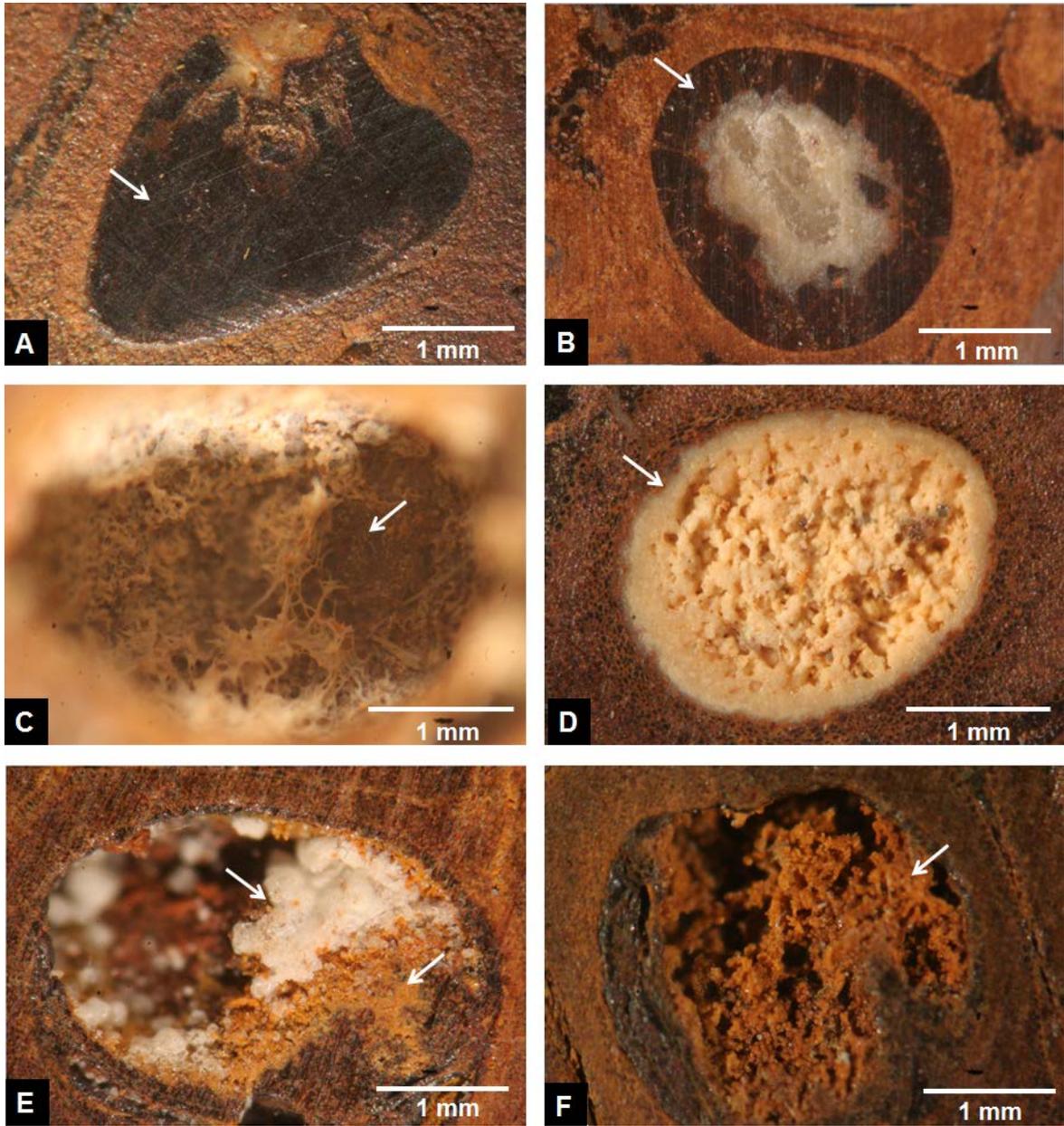
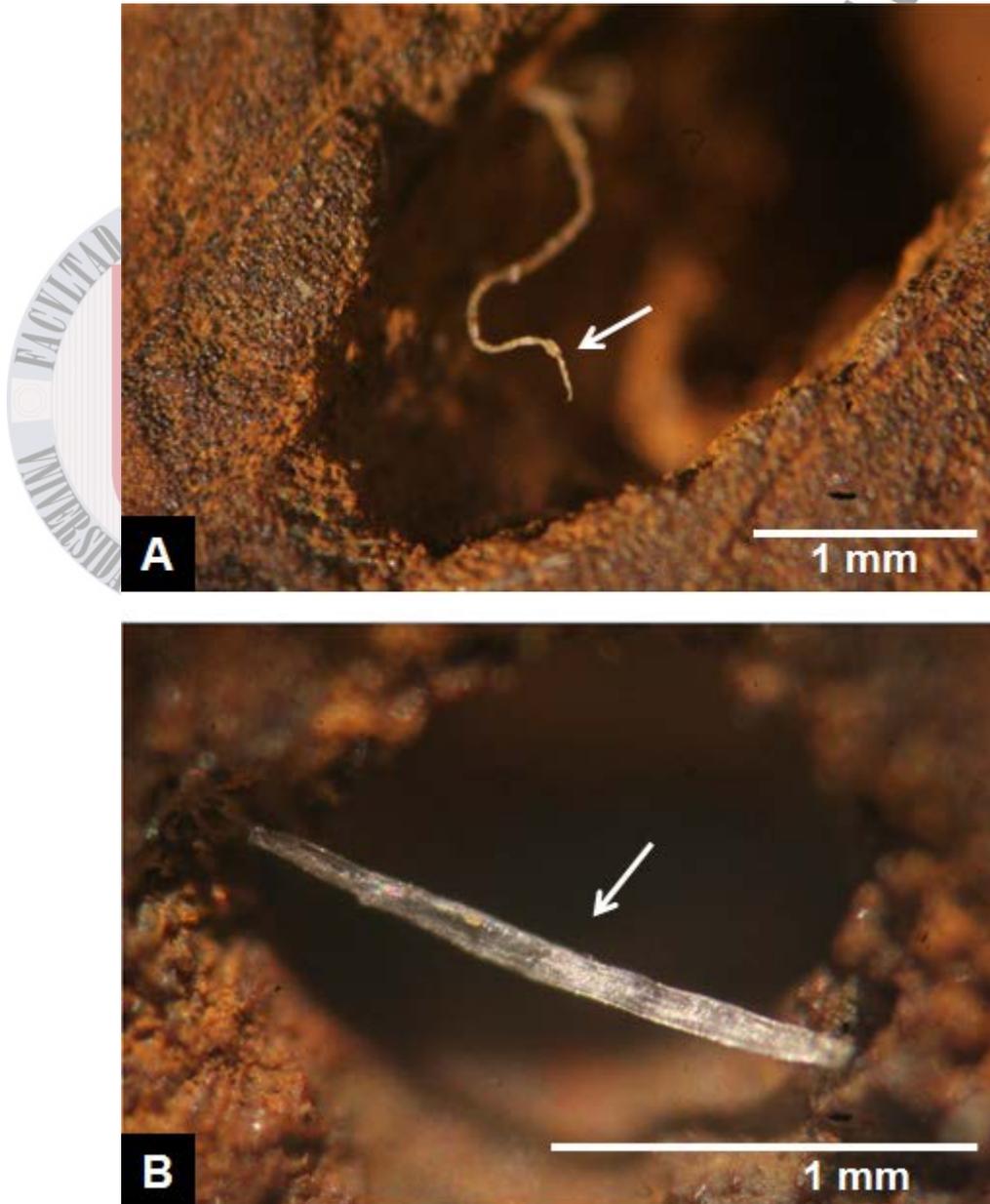


Figura 11. Distintos rellenos de la cavidad embrionaria.

FACULTAD  
BIBLIOTECA

El micrópilo se localiza en la zona proximal del opérculo, que es atravesado por un canal central donde penetra el tubo polínico. Fue posible observar dentro de la cavidad embrionaria una estructura filamentosa que se interpreta como un tubo de polen (Figura 12).



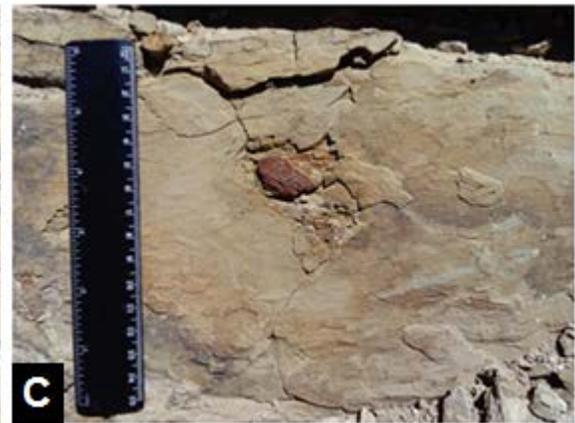
**Figura 12.** Filamentos del tubo polínico (señalados con flecha blanca) observado dentro de distintas cavidades embrionarias.

## 9. RESULTADOS

### 9.1 FORMACIÓN CERRO DEL PUEBLO EN EL ÁREA DE ESTUDIO

En el área de estudio, los afloramientos de la Formación Cerro del Pueblo se observan de manera puntual debido a que se encuentran casi totalmente cubiertos por aluvión. Por esta causa, los patrones estratigráficos y espesores de los estratos no son discernibles, por lo que son difíciles de describir. Además, el área se encuentra afectada por fallas y algunas capas como por ejemplo, los estratos de arenisca, exponen líneas de corrimiento en el techo de los mismos. De manera general, los afloramientos son relativamente homogéneos compuestos de marga, alternada con capas decimétricas de arenisca con diferente tamaño de grano e igualmente capas de lutitas de espesor decimétrico con presencia de algas caráceas, todos cubiertos parcialmente por aluvión y coluvión.

La litología más abundante aparentemente en el área de estudio consiste en marga deleznable, de color gris-verdoso, que tiene una reacción fuerte al ácido clorhídrico indicando la presencia de  $\text{CaCO}_3$ , y que revela contenido de arcilla con la prueba de humedad. Aunque en la mayor parte del afloramiento el espesor total de los estratos no puede ser medible, en algunos puntos se obtuvieron espesores centimétricos (Figura 13.A). La marga exhibe en varios horizontes estructuras tipo “ripples marks”. Entre la biota fósil se identificaron restos de madera así como tubos no determinados de 1 milímetro de espesor y pocos centímetros de longitud. Como rasgo distintivo, esta unidad expone hacia la base y el techo un sistema de fracturas secundarias formando un entrecruzado.

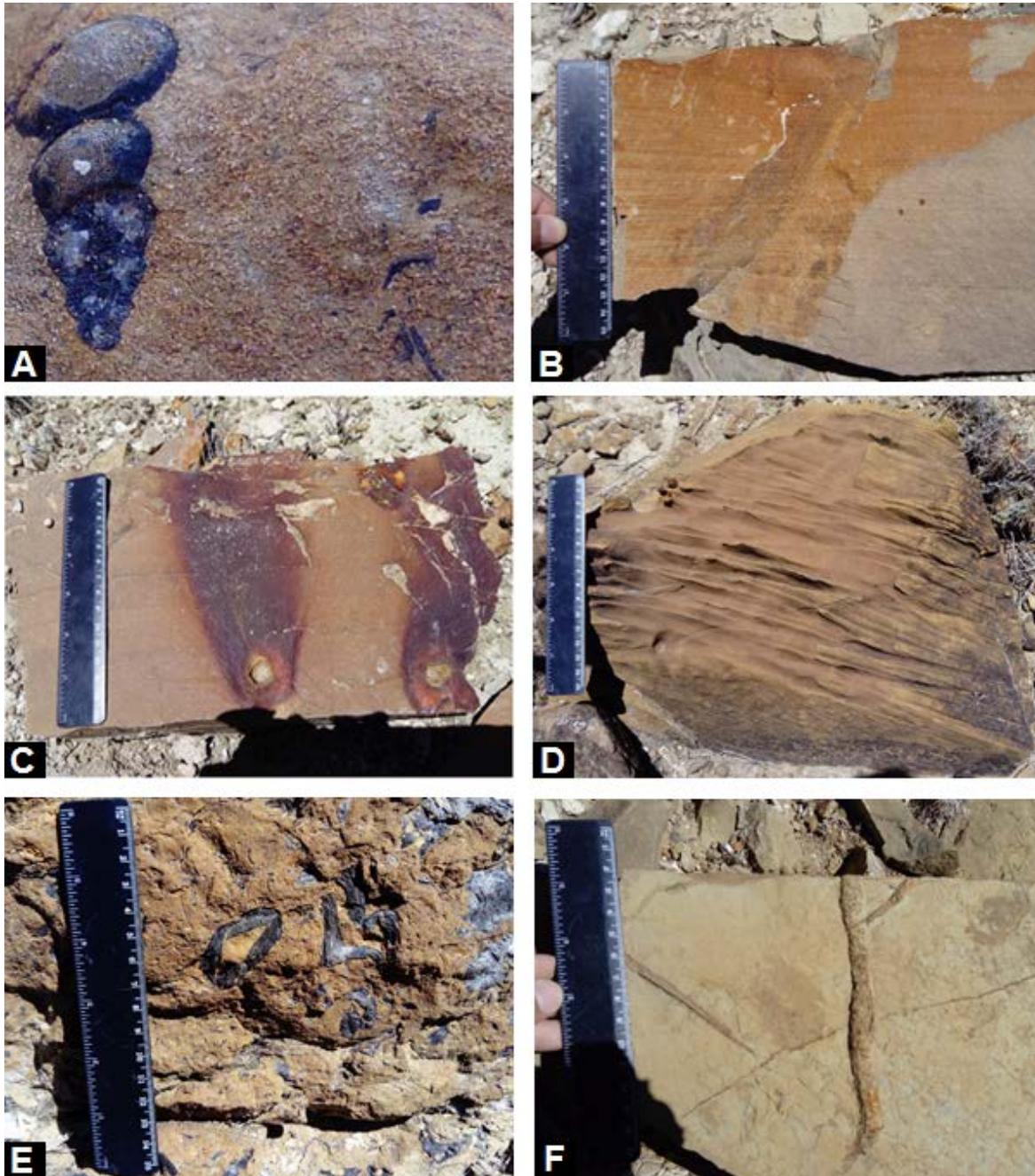


**Figura 13.** A. Capa de margas de la Formación Cerro del Pueblo en el área de estudio. B. Estructuras tipo Ripples. C. Fragmento fósil de madera.

La arenisca muestra una coloración que varía de café-anaranado a rojizo en muestra intemperizada y de tonalidades más grisáceas en muestra fresca, con un espesor decimétrico (15-20 cm) (Figura 14). Texturalmente, presenta un tamaño de grano que varía de medio a grueso (Figura 15). La arenisca presenta diferentes tipos de estructuras como estratificación paralela fina y cruzada de ángulo bajo, nódulos de diámetro centimétrico, así como distintas marcas de intemperismo eólico y acuoso. Como material fósil se observaron invertebrados marinos y galerías tipo *Thalassinoides* (Figura 15). En zonas circunvecinas al área de estudio, esta unidad exhibe huellas de dinosaurios de diferentes grupos (Figura 16.A).



**Figura 14.** Afloramiento de arenisca roja de la Formación Cerro del Pueblo en el área de estudio.



**Figura 15.** Estructuras sedimentarias encontradas en las capas de arenisca roja de la Formación Cerro del Pueblo en el área de estudio: **A.** Un gasterópodo incrustado en la arenisca. Se observa a detalle la textura de la roca. **B.** Laminación paralela. **C.** Nódulos. **D.** Intemperismo por viento. **E.** Presencia de moluscos ostreidos. **F.** Galerías tipo *Thalassinoides*.



**Figura 16.** A. Huellas de dinosaurio (señaladas con flecha negra) en la localidad de Las Águilas. B. Algas charophytas (señaladas con flecha negra) en muestra de roca.

En la localidad también aflora una tercera litología, una arenisca de grano fino que presenta una coloración gris claro a medio, aparentemente sin estructura interna. En el único punto en cual aflora esta litología, el estrato se encontraba fracturado, por lo que su espesor real no pudo ser medido con exactitud. No se encontraron estructuras sedimentarias ni fósiles asociados a esta capa (Figura 17).

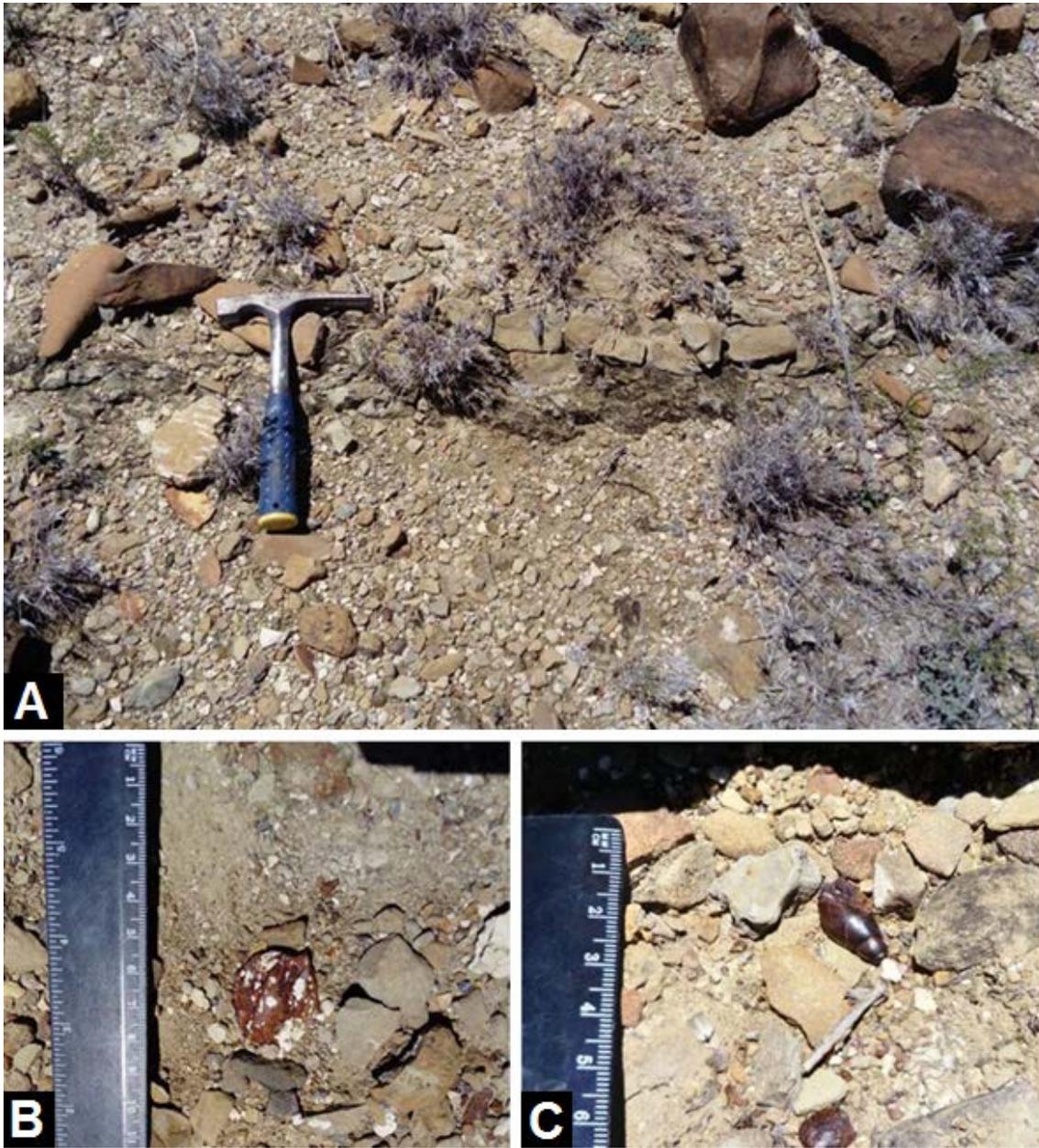


**Figura 17.** El afloramiento de la tercera litología consiste en arenisca de grano fino, aparentemente sin estructura interna.

Se registra también afloramientos de capas de lutitas de grano medio con presencia de algas charophytas. Esta litología expone una coloración grisácea en muestra fresca y de color café-anaranjado en muestra intemperizada (Figura 16.B).

Las litologías anteriormente descritas se encuentran cubiertas por material de desprendimiento por gravedad. Esta unidad referida como aluvión/coluvión presenta un espesor aproximado 30-40 cm y se encuentra formado por clastos cuyo tamaño varía de unos cuantos milímetros hasta más de 50 cm, embebidos en una matriz limosa-arcillosa. Se observan fósiles de frutos e invertebrados, fragmentos fósiles de tortugas, madera y dinosaurios que posiblemente provengan de las capas de la Formación Cerro del Pueblo (Figura 18).

De acuerdo con McBride (1971) el Grupo Difunta es producto de una larga sedimentación deltaica en la Cuenca de Parras. La Formación Cerro del Pueblo corresponde a un ambiente de llanura deltaica, lo cual es consistente con la mayoría de autores posteriores (McBride *et al.*, 1974, 1975; Kirkland *et al.*, 2000; Vogt *et al.*, 2016).



**Figura 18.** A. Capa de aluvión/coluvión de la Formación Cerro del Pueblo en el área de estudio. B. Frutos fósiles encontrados en la capa de aluvión/coluvión. C. Gasterópodo preservado en óxidos de hierro encontrado en la capa de aluvión/coluvión.

## 9.2. MECANISMOS DE ALTERACIÓN TAFONÓMICA

Se conoce como Tafonomía a la ciencia que estudia los procesos que les suceden a los organismos desde su muerte hasta su posible hallazgo como fósiles. Durante este tiempo, los restos orgánicos se encuentran vulnerables ante cualquier tipo de agentes que puedan modificar su estado original y les permitan ser preservados a través del tiempo. Los ejemplares fósiles que se colectaron de la Formación Cerro del Pueblo en la localidad Presa San Antonio presentan evidencias de distintos mecanismos de alteración, los cuales pudieron haber ocurrido tanto en la fase bioestratinómica (previo al enterramiento) como en la fosildiagenética (posterior al enterramiento) (Schopf, 1975; Brett, 1978; Fernández-López, 2000).

Siguiendo los criterios de Fernández-López (2000), a continuación se mencionan los distintos mecanismos de alteración que se distinguieron en los frutos fósiles analizados.

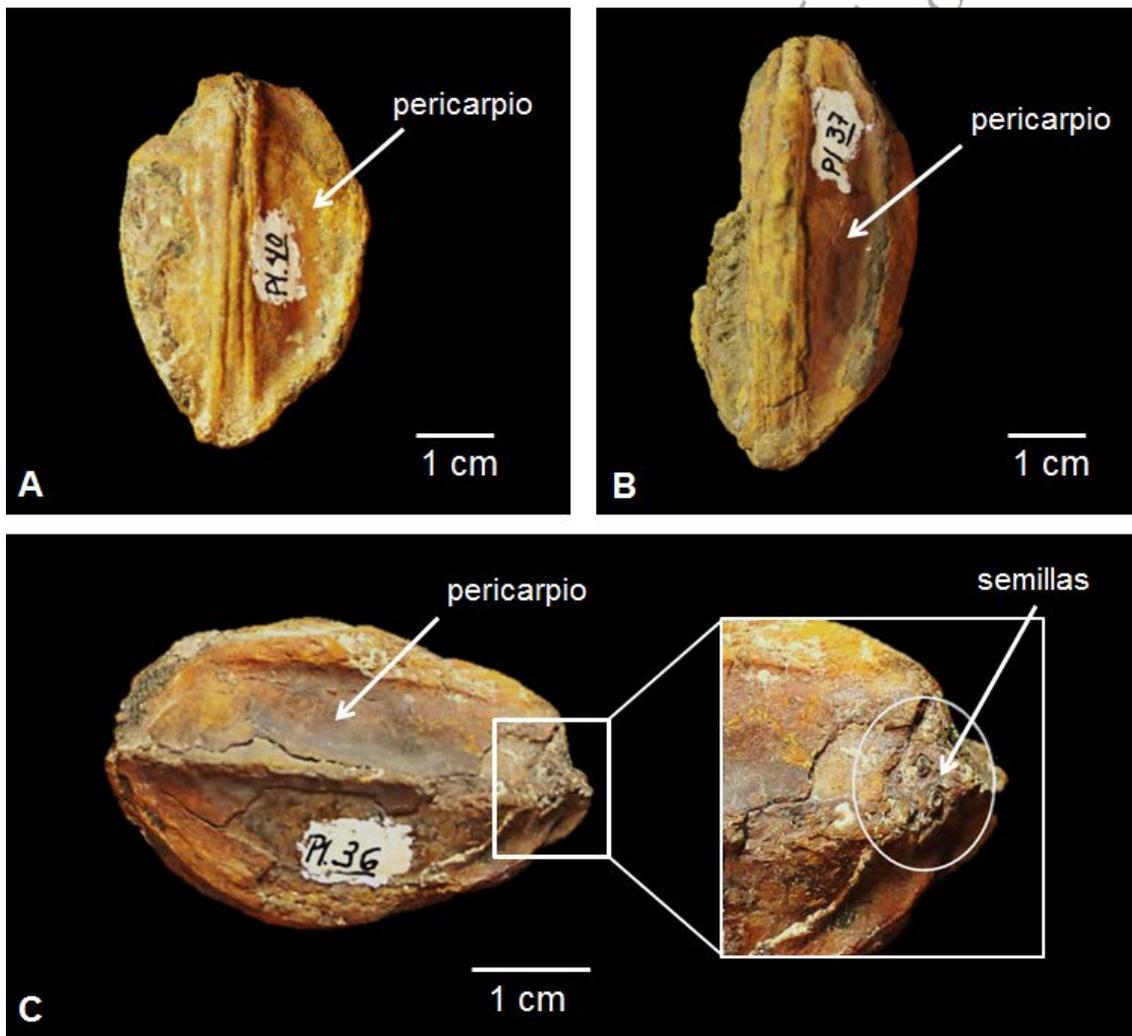
### 9.2.1 BIODEGRADACIÓN

Según Fernández-López (2000) la biodegradación es el primer proceso que sufre un organismo después de su muerte y/o producción, e incluye todos los procesos de descomposición por acción de organismos vivientes.

Aunque la biodegradación siempre ocurre en mayor o menor grado, en los frutos colectados no se observan características físicas o químicas que evidencien este proceso. No obstante, muchos de estos ejemplares pudieron haber sufrido procesos de descomposición aerobia en la fase previa al enterramiento, y posiblemente anaerobia después del enterramiento. Una posible evidencia física de este proceso en el material analizado es el estado incompleto del pericarpio, el cual pudo haber sufrido una biodegradación parcial, aunque otros procesos

tafonomicos no se descartan (por ejemplo, desplazamiento lateral, desgaste por alimentación de algún organismo, etc.) (Figura 19).

Debido a que los frutos fósiles pertenecen a un grupo extinto, no es posible realizar una comparación con material actual para determinar el tamaño o la forma original del pericarpio o de cada una de las partes que lo conforman, y conocer si su condición actual es consecuencia de un solo mecanismo de alteración.



**Figura 19.** Fotografías que muestran ejemplares de frutos fósiles con presencia y ausencia de pericarpio.

### 9.2.2 DESPLAZAMIENTO LATERAL (Transporte post-Mortem)

Uno de los procesos comunes en el registro fósil es el desplazamiento de material biológico desde su origen hasta sitio de enterramiento mediante agentes eólicos hidrodinámicos (Spicer, 1990). En el Capítulo 7 se mencionó que el posible ambiente de depósito de la Formación Cerro del Pueblo en el área de estudio corresponde a un delta (planicie deltaica), el cual representa un escenario distinto a donde ocurrió la producción tafonómica original. Esta información sugiere que el fruto fue desplazado por acción de agentes externos después de que se desprendió de su planta de origen, posiblemente corrientes de agua (se desconoce la distancia precisa en metros o kilómetros) que transportaron el fruto mediante flotación y/o rodamiento. Una posible evidencia puede observarse sólo en ciertos ejemplares donde la anatomía interna de algunos frutos se encuentra desorganizada, indicando una mezcla del material interno debido a un probable transporte agitado (Figura 20).



**Figura 20.** Corte transversal de un fruto mostrando un interior sin arreglo determinado.

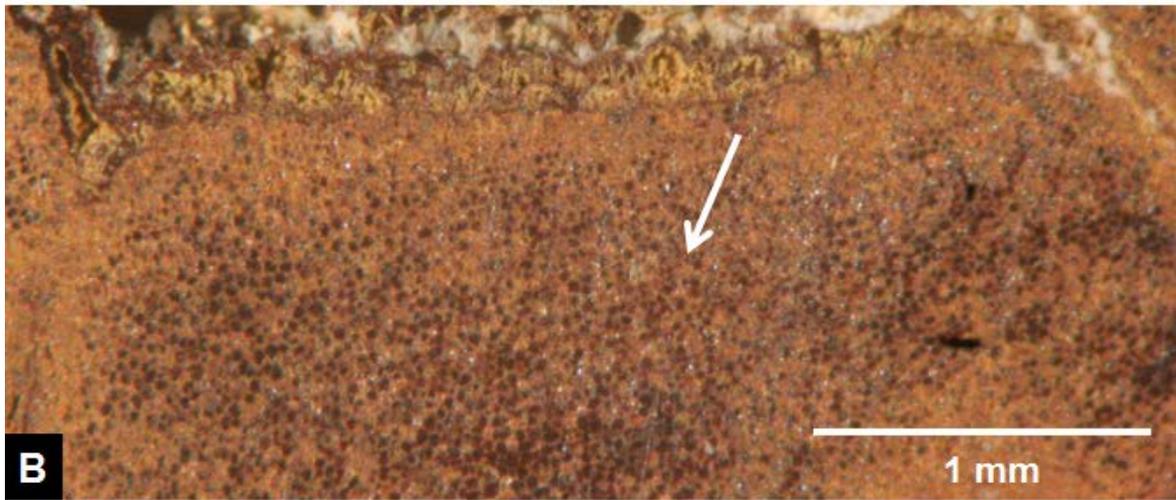
### 9.2.3 MINERALIZACIÓN

Durante el transporte y el enterramiento, los organismos sufren cambios en su estructura morfológica y composición mineralógica debido a la migración de fluidos y la difusión de sustancias, quedando impregnados de nuevos componentes minerales. Este proceso aumenta la resistencia física de un elemento conservado, pero otras pueden resultar modificadas como las microestructuras, la forma, el tamaño y el espesor de algunos elementos (Schopf, 1975; Briggs, 1995; Fernández-López, 2000).

#### 9.2.3.1 Permineralización

La permineralización de los restos orgánicos se lleva a cabo por el relleno de las cavidades intercelulares que se desocuparon durante la descomposición de la materia orgánica. La biodegradación permite que el proceso sea más efectivo, ya que aumenta la permeabilidad de los tejidos celulares y permite la formación de cavidades que son ocupadas por nuevas sustancias minerales cristalinas o amorfas, y puede llevarse a cabo tanto en la fase bioestratinómica como en la fosildiagenética (Schopf, 1975; Scott, 1990; Fernández-López, 2000).

Mediante la realización de análisis de Difractometría de Rayos X, los frutos obtuvieron valores que mostraron un contenido mayoritario en goethita ( $\text{FeO}(\text{OH})$ ) así como un contenido importante de kilchoanita ( $\text{Ca}_6 (\text{SiO}_4)(\text{Si}_3\text{O}_{10})$ ), un mineral asociado a ambientes hidrotermales (Tabla 1). Un segundo análisis a otro grupo de muestras revela resultados consistentes a los anteriores en cuanto al contenido de goethita, y además revela la presencia de minerales como barita, un mineral que igualmente es asociado con alteraciones hidrotermales (Tabla 2).



**Figura 21. A.** Frutos con la coloración rojiza característica de los óxidos de hierro. **B.** Corte transversal del fruto que muestra la permineralización de los integumentos (flecha blanca).

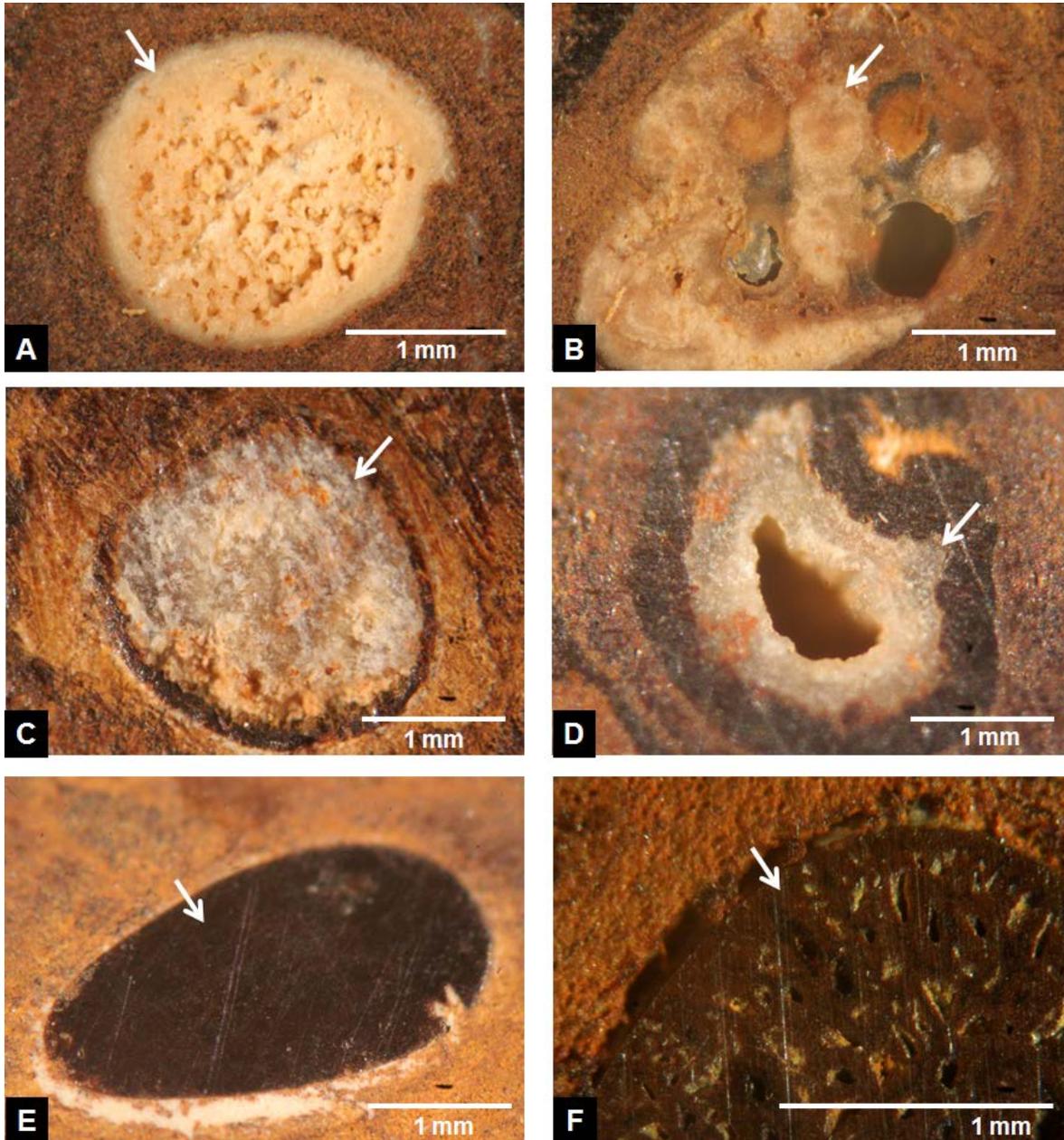
FACULTAD DE  
BIBLIOTECA "BÓL."

### 9.2.3.2 Cementación de cavidades

La pérdida de partes blandas durante la biodegradación de los restos orgánicos genera igualmente cavidades macroscópicas que pueden llegar a ser ocupadas por sustancias coloidales o minerales formadas mediante precipitación química (Fernández-López, 2000).

En los frutos, se observan distintos rellenos amorfos en lo que era la cavidad embrionaria de la semilla, y en los huecos entre las semillas.

- 1) **Calcedonia ( $\text{SiO}_2$ ):** uno de los minerales más abundantes que se encuentra rellenando de manera amorfa ciertas cavidades de los ejemplares fósiles. Este mineral fue detectado sólo a través de la observación en lámina delgada.
- 2) **Calcita ( $\text{CaCO}_3$ ):** se observó de manera macro, meso y microscópica rellenando los huecos de las cavidades embrionarias y los espacios libres entre las semillas. Este mineral también fue detectado a través de métodos empíricos, como exponer la muestra a ácido clorhídrico (10%) donde se obtuvo una reacción moderada (Tabla 3), y a través de análisis de DRX.
- 3) Ciertas cavidades embrionarias también se encuentran ocupadas por un tipo de material que se sugiere es de composición ferruginosa, y debido a la estructura que presenta se sugiere que pudo haber reemplazado a un relleno primario por pirita. Scott (1990) y Fernández-López (2000) mencionan que el sulfuro de hierro es una de las sustancias mineralizantes que reviste internamente las cavidades de los elementos conservados.
- 4) El relleno de las otras cavidades embrionarias no fue determinado.



**Figura 22.** Cavidades embrionarias rellenas por distintos minerales que son indicados por una flecha blanca: **A y B.** Calcedonia ; **C y D.** Calcita. **E y F.** Relleno ferruginoso.

FACULTAD  
BIBLIOTECA

Fase	Fórmula	Contenido (% en peso)
Goethita	FeO(OH)	66.0
Kilchoanita	Ca <sub>6</sub> (SiO <sub>4</sub> )(Si <sub>3</sub> O <sub>10</sub> )	34.0
Total		100

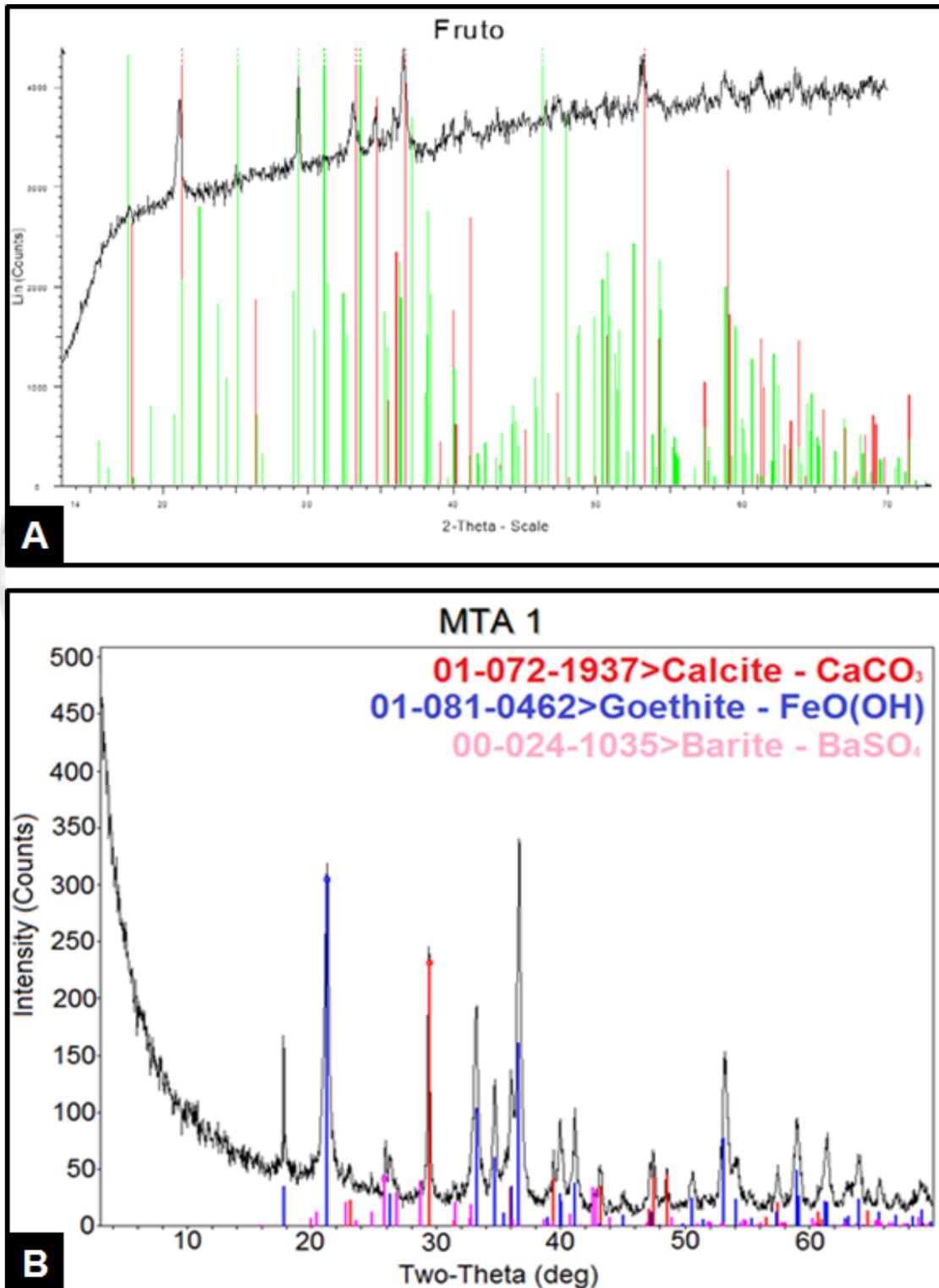
**Tabla 1.** Valores de porcentaje de goethita y kilchoanita en frutos fósiles de la Formación Cerro del Pueblo en el área de estudio.

Mineral	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Goethita - FeO(OH)	78.0%	80.0%	87.0%
Calcita - CaCO <sub>3</sub>	21.0%	20.0%	13.0%
Barita - BaSO <sub>4</sub>	1.0%		

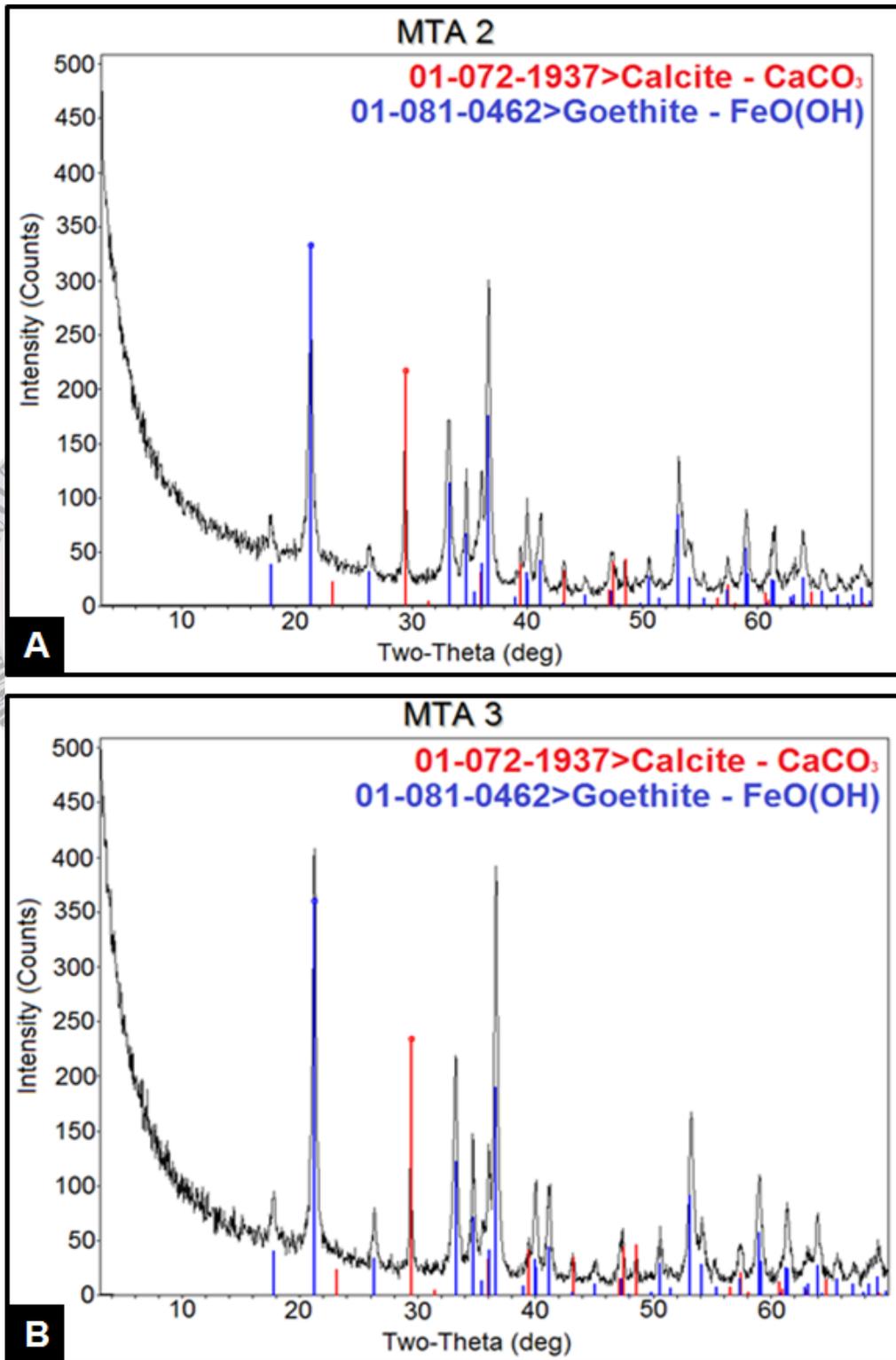
**Tabla 2.** Valores de porcentaje de goethita y kilchoanita en frutos fósiles de la Formación Cerro del Pueblo en el área de estudio.

Muestra	Tipo de reacción	Característica
1) Muestra fresca de roca con algas caráceas	Fuerte	Presencia de carbonatos
2) Fruto:		
-Muestra fresca	Moderada-débil	Relleno de carbonatos
-Encostramiento	Fuerte	Presencia de carbonatos. Proceso secundario.

**Tabla 3.** Análisis HCl (10%) en muestra de roca, muestra interna de fruto y encostramiento.



**Figura 23.** Valores de difracción de Rayos X en frutos fósiles de la Formación Cerro del Pueblo. A. Muestra identificada con la clave "FRUTO". B. Difractograma de la muestra No.1.



**Figura 24.** Valores de difracción de Rayos X en frutos fósiles de la Formación Cerro del Pueblo. **A.** Muestra No. 2. **B.** Muestra No.3.

#### 9.2.4 DISTORSIÓN

La distorsión tafonómica implica la actuación de algún esfuerzo mecánico que pueda producir cualquier cambio en la estructura, forma, tamaño y/o textura de los elementos que se conservan (Fernández-López, 2000).

Se observó que la mayoría de los ejemplares colectados presentan un notorio aplastamiento dorsoventral. Fernández-López (2000) sugiere que las deformaciones pueden ocurrir en los primeros estadios fosildiagenéticos, ya que los organismos experimentan presiones cada vez mayores al aumentar la profundidad del enterramiento y la carga litostática. Un elemento esférico puede llegar a transformarse en un elipsoide debido a la compresión; no obstante, la presencia de estructuras internas pueden actuar como soporte e incrementar la resistencia a la deformación mecánica. Sin embargo, también menciona que dentro de continente, el pisoteo por tetrápodos es uno de los principales agentes de fracturación durante el estado bioestratinómico.

Como se mencionó anteriormente, sólo en algunos frutos se registra una alteración en la organización de la anatomía interna. La distorsión se puede ver a nivel macroscópico con el fruto a simple vista y mesoscópico con las fotografías tomadas en lámina delgada (Figura 25).

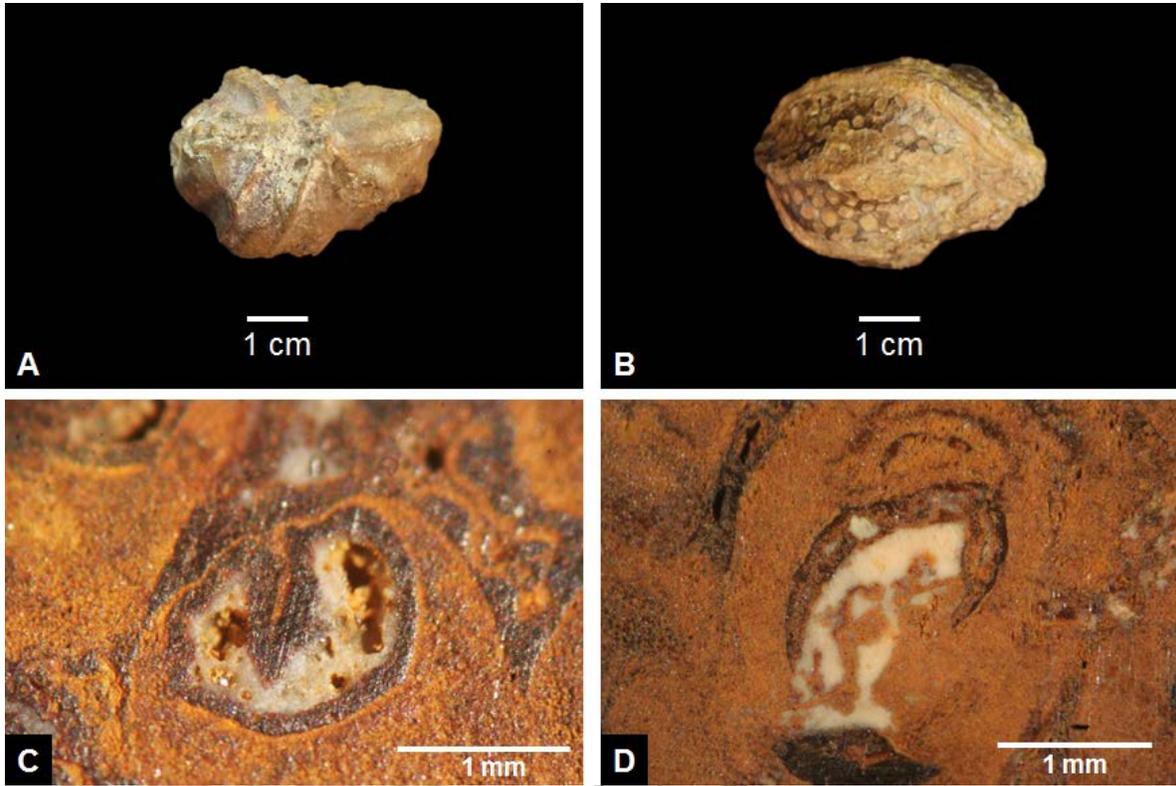


Figura 25. A y B. Aplanamiento y deformación de los ejemplares fósiles. C. Deformación de la cavidad embrionaria. D. Deformación del interior de la semilla.

### 9.2.5 REELABORACIÓN

El proceso de la reelaboración tafonómica consiste en el desenterramiento, desplazamiento y deterioro de los restos fósiles, y ocurre en la fase fosildiagenética (Fernández-López, 2000). Los ejemplares fósiles fueron colectados de una capa de aluvión en la Localidad de Presa San Antonio.



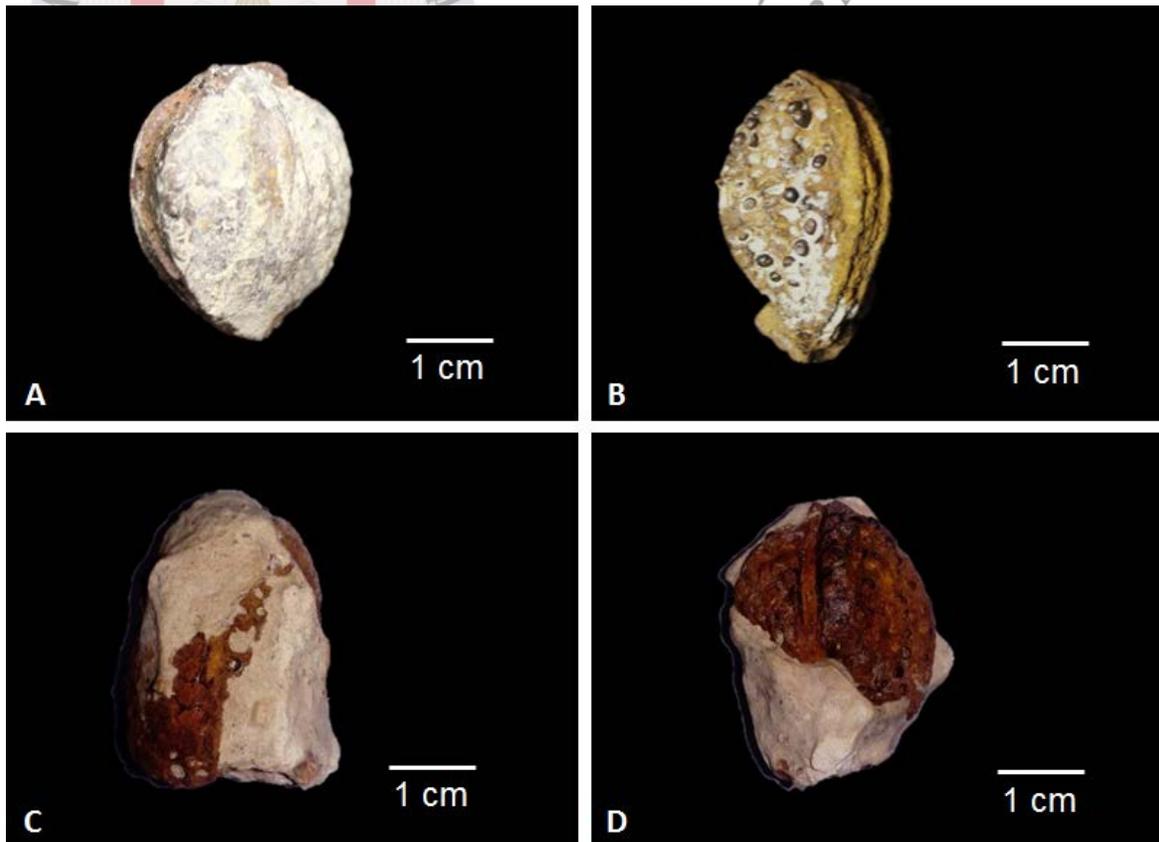
**Figura 26.** Fruto fósil encontrado en aluvión (indicado por flecha blanca).

FACULTAD DE  
BIBLIOTECA "BIOLOGÍA"

### 9.2.6 ENCOSTRAMIENTO

El encostramiento se refiere al recubrimiento que sufren los organismos conservados antes de ser enterrados por medio de materiales que pueden ser o no de origen biogénico, y forman costras superficiales o inclusiones (Fernández-López, 2000). Este proceso también puede ocurrir en material retrabajado.

En los organismos colectados en el área de estudio se observa la presencia de un encostramiento en la superficie externa de los frutos, de color blanco y grisáceo. A dicha costra se le realizó la prueba con HCl al 10% teniendo en todos los casos efervescencia, lo que sugiere un origen calcáreo para el encostramiento.



**Figura 27.** Frutos fósiles con distinta cantidad de encostramiento.

## 10. DISCUSIÓN

### 10.1 DETERMINACIÓN TAXONÓMICA

En el presente trabajo, se analizaron un total de 10 frutos fósiles colectados en capas de la Formación Cerro del Pueblo (Campaniano: Cretácico Superior) cercanas a la Presa de San Antonio, sur de Coahuila. Éstos presentan una serie de características anatómicas distintivas tales como la morfología exterior elíptica (cuando no hay deformación); la presencia de tres carpelos y tres lóculos, cada uno separados por tres costillas longitudinales formadas por la proyección del septo hacia fuera; presencia de abundantes semillas piriformes, anátropas y operculadas en cada lóculo. Esta combinación de características son consistentes con las reportadas por Rodríguez-de la Rosa y Cevallos Ferríz (1994) en frutos del género *Tricostatocarpon* (orden Zingiberales) de la localidad Presa San Antonio y regiones cercanas, sur de Coahuila. Con base a lo anterior, es posible asignar a este género los frutos analizados en este trabajo.

De la misma manera, ciertas características observadas en la anatomía interna, como la distinción de las capas integumentarias de las semillas, concuerdan con la descripción de la especie *Tricostatocarpon silvapinedae* reportadas por los mismos autores (Rodríguez-de la Rosa y Cevallos Ferríz, 1994). Sin embargo, se requiere de análisis más detallados para realizar una identificación correcta.

Las Zingiberales tienen un rango estratigráfico que va desde el Cretácico hasta el Reciente, y han sido reportados en ambientes de agua dulce y marinos costeros (Rodríguez de la Rosa y Cevallos-Ferríz, 1994). Algunos ejemplos están representados por restos de *Spirematospermum chandlerae* en sedimentos marinos costeros de la Formación Black Creek (Cretácico Tardío – Eoceno) en Carolina del norte (Sohl y Christopher, 1985); semillas fosilizadas de *Ensete oregonense* en sedimentos volcanoclásticos aluviales de la Formación Clarno

(Eoceno) en Oregon (Bestland *et al.*, 1999); frutos con semillas preservadas del género *Spirematospermum* en sedimentos Terciarios de Dinamarca (Koch & Friedrich, 1970); así como restos de *Musa cardiosperma* de sedimentos aluviales y lacustres de la Serie Deccan Intertrappean (Cretácico Tardío) en India (Prakash, 1960). Hasta la fecha, los hallazgos han estado relacionados con ambientes continentales o marinos cercanos al continente.

En la actualidad, el orden Zingiberales incluye ocho familias, 96 géneros reconocidos y cerca de 2,000 especies restringidas a los trópicos de Asia, África y América. Son plantas herbáceas de tamaño medio con hojas pecioladas que presentan flores grandes y complejas con ovarios inferiores. En zonas húmedas y en bosques de mediana elevación se encuentran como flora de sotobosque y pueden distribuirse en zonas más iluminadas como al margen de los bosques. Según Kress y Spetch (2005), existen especies consideradas como acuáticas por ser encontradas creciendo a lo largo de los márgenes de los ríos y otros cuerpos de agua por un periodo significativo del año.

En el área de estudio, la Formación Cerro del Pueblo en Coahuila ha sido relacionada con ambientes costeros asociados a deltas (McBride, 1971; McBride *et al.*, 1974; Vega-Vera *et al.*, 1989; Kirkland *et al.*, 2000; Vogt *et al.*, 2016) comprendidos dentro de las zonas tropicales durante finales del Cretácico Tardío, por lo que la presencia de frutos fósiles de Zingiberales en esta unidad es consistente con lo reportado para grupos actuales y fósiles.

## 10.2 TAFONOMÍA

De acuerdo a Fernández-López (2000), los procesos de alteración tafonómica ocurren en dos etapas principales: la bioestratinómica y la fosildiagenética. La primera abarca desde la producción biológica, es decir la muerte del organismo y/o la pérdida de alguna de sus partes por desarticulación

(en el caso de algunos artrópodos) u otros procesos, hasta justo antes de su enterramiento.

La segunda se conoce como etapa fosildiagenética, y comprende los procesos que suceden desde el enterramiento del organismo hasta su hallazgo como fósil. No todos los organismos pueden llegar a fosilizar. El camino más rápido para que un órgano de una planta se convierta en fósil es el ser enterrado inmediatamente después de ser desprendido (Blanco comm. pers. noviembre 2017) y llevar a cabo solamente cierto grado de descomposición que le permita a los tejidos ser permineralizados ya estando en el sedimento (Locatelli, 2014). Sin embargo, si el enterramiento tras el desprendimiento de la planta de origen no ocurre y el fruto es transportado por algún medio fluido, como el agua, muchos mecanismos de alteración pueden afectar el fruto antes de su sepultamiento final.

#### 10.2.1 ETAPA BIOESTRATINÓMICA

Los procesos tafonómicos que afectaron a los frutos comenzaron en el momento en el que se desprendieron de su planta de origen. Como se explicó en el apartado anterior, las Zingiberales actuales presentan una distribución en hábitats húmedos tropicales, y por esto se sugiere que la planta a la que pertenecieron los frutos analizados (*Tricostatocarpon*) pudo haber crecido en un ambiente similar cerca de un cuerpo de agua.

Al desprenderse, los frutos pudieron haber caído al suelo y haber permanecido ahí durante algún tiempo hasta su dispersión, o bien, pudieron haberse separado de la planta y ser desplazados de inmediato por algún agente externo como corrientes generadas por lluvia o incluso por influencia de vertebrados (Spicer, 1991). Rodríguez-de la Rosa *et al.*, (1998) documentan la presencia de restos de semillas como contenidos de coprolitos en la Formación Cerro del Pueblo, lo que sugiere la posible participación de vertebrados en la dispersión de frutos.

Los frutos llegaron a corrientes de agua (un arroyo o un río), y a partir de ahí se desplazaron mediante flotación. La mayoría de las plantas presentan en su superficie epidérmica una cubierta compuesta de lípidos y ceras cuya función principal es la de actuar como una barrera impermeable para evitar la pérdida de agua, así como la protección de agentes externos (Jeffree, 2006; Jetter *et al.*, 2006). Es probable que los frutos hayan podido flotar debido a la presencia de esta cutícula en la pared epidérmica. Una misma hipótesis es sugerida por Rodríguez-de la Rosa *et al.* (1998) para explicar la presencia de coprolitos de distintos vertebrados en la Formación Cerro del Pueblo. Locatelli (2014) sugiere que los fósiles de plantas que son encontrados en sedimentos de cuerpos de agua o marinos estuvieron asociados al transporte por flotación a través de largas distancias.

Mientras los organismos continuaban su desplazamiento cerca de la superficie de la corriente de agua, la biodegradación fue desgastando la cutícula que protegía la pared epidérmica y comenzaron a crearse fisuras que permitieron la infiltración de sustancias al interior. Estos componentes le hicieron ganar peso y causaron su hundimiento quedando sobre el fondo del ambiente sedimentario.

Por otro lado, Locatelli (2014) también sugiere que el transporte de plantas puede llevarse a cabo por un acarreo rápido por flujos de corriente que contenían escombros, y que llevan las plantas a los sedimentos del fondo. Esto último podría explicar la presencia de tres frutos con partes anatómicas interiores dispuestas caóticamente. Esto abre la posibilidad de que estos frutos fueran fragmentados o rotos previo a su incorporación al medio de transporte, por lo que el fluido (agua) pudo haberse infiltrado a través de fisuras y evitar la flotación. Como consecuencia, el fruto fue transportado como parte de la carga de fondo. Sin embargo, más análisis son requeridos para confirmar esta hipótesis.

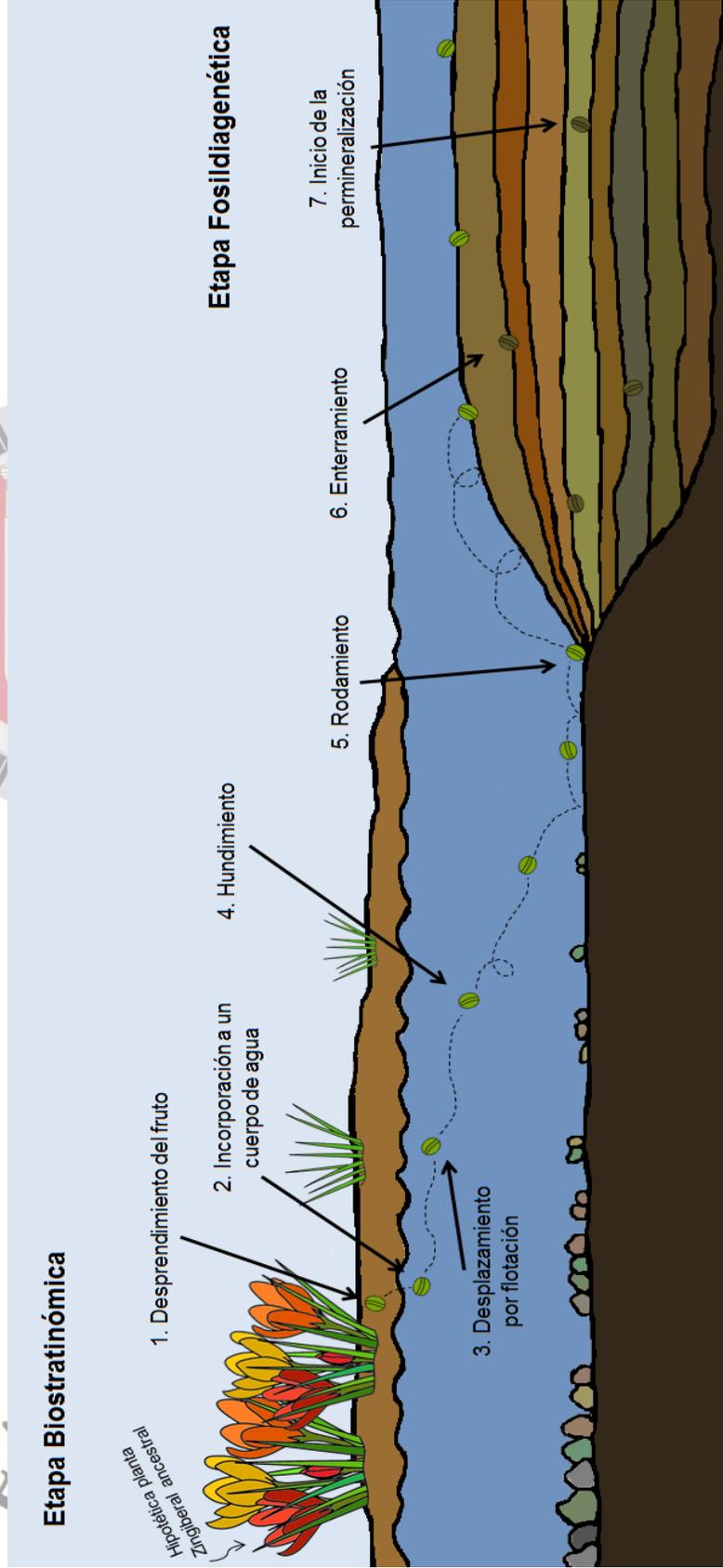


Figura 28. Reconstrucción tafonómica del fruto.

### 10.2.2. ETAPA FOSILDIAGENÉTICA

Cuando el fruto alcanzó el fondo del río, su desplazamiento continuó hasta llegar a un ambiente de menor energía como las planicies deltaicas. El primer proceso que ocurre durante la etapa fosildiagenética es el enterramiento del material orgánico causado por el continuo aporte de sedimentos arcilloso-calcáreo de grano fino que se acumularon en el ambiente de depósito. Spicer (1991) menciona que, dentro de los ambientes fluviolacustres, estas zonas de baja energía de los ambientes deltaicos son las únicas que tienen el potencial de preservación de la materia orgánica.

Después de su enterramiento, comenzó el proceso de mineralización de los frutos tras la interrupción de su descomposición. Los análisis de XRD muestran una composición mineral principalmente por goethita. La formación de este óxido de hierro puede darse de manera primaria o secundaria, siendo este último el resultado de la oxidación de un precursor, como por ejemplo, sulfuros de hierro. Un ejemplo de un origen primario lo representa la presencia de goethita que encapsula y preserva restos fósiles de bacterias en los sedimentos del Río Tinto, noroeste de España (Fernández-Remolar y Knoll, 2008). En este ambiente los restos orgánicos pueden ser colonizados rápidamente por bacterias que forman biopelículas adherentes que permiten atraer iones metálicos disueltos favoreciendo su propia mineralización, en este caso, goethita. Por otro lado, se documentan hojas de planta preservadas por goethita primaria en sedimentos fluviales-lacustres de Nueva Caledonia. En este caso el óxido de hierro es producto de la mineralización de los tejidos celulares (Locatelli, 2013).

Sin embargo, a nivel petrográfico, los frutos de la Formación Cerro del Pueblo estudiados en este trabajo, exhiben la presencia de hábitos cúbicos y triangulares en las cavidades embrionarias de las semillas (Figura 28). Este tipo de arreglos o hábitos no son típicos en óxidos de hierro primarios como la goethita o hematita, y sí presentan similitud a los hábitos presentes en sulfuros de hierro como la piritita sedimentaria. Murciego-Murciego *et al.* (2012) reporta hábitos

cúbicos y triangulares similares en goethita presente en rocas mineralizadas del noreste de España, identificando a este mineral como un pseudomorfo de la pirita. Este tipo de minerales pseudomórficos se forman por el reemplazamiento de un mineral primario por procesos geológicos posteriores (por ejemplo, hidrotermalismo); frecuentemente, el pseudomorfo mantiene el hábito del mineral reemplazado. Con base en la presencia de estos hábitos en las cavidades embrionarias de los frutos aquí analizados, la presencia de una mineralización primaria por pirita sedimentaria (y no por goethita) es sugerida.

Estos hallazgos son consistentes con otros reportes de reemplazamiento de pirita por óxidos de hierro en otras localidades del noreste de México, situadas a aproximadamente 260 km al norte del área de estudio. Blanco *et al.* (2013) y Ángeles-Trigueros (2015) reportan framboides, estructuras biomórficas y hábitos cristalinos de pirita sedimentaria en nódulos de goethita en margas fosilíferas del Cretácico (Turoniano) de la Formación Eagle Ford en las cercanías de Múzquiz, Coahuila.

Dado que la permineralización inicial de los frutos fósiles analizados fue llevada a cabo por pirita, se sugiere la existencia de condiciones deficientes de oxígeno en el sedimento y por debajo de la zona de interfase con la columna de agua. Su génesis es inducida por bacterias (Frankel y Bazylinski, 2003) y se forma a poca profundidad, específicamente en ambientes anóxicos acuáticos a partir de materia orgánica, sulfatos disueltos y minerales detríticos de hierro presentes en el medio (Berner, 1984).

El proceso de formación de pirita (y por ende el de piritización) comienza cuando las bacterias sulfato-reductoras utilizan los sulfatos disueltos en la columna de agua para degradar la materia orgánica, produciendo sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ). Esta molécula es reducida por un segundo grupo de bacterias, las sulfo-reductoras, y separa el hidrógeno del azufre. El hidrógeno se pierde en el medio acuoso mientras que el azufre liberado reacciona con minerales de hierro (Fe) detrítico y forma monosulfuro de hierro ( $FeS$ ). La cantidad de azufre que se

continúa liberado a través de las reacciones bacterianas permite una mayor disposición de este mineral, y reacciona con las moléculas de monosulfuro de hierro (FeS), produciendo disulfuro de hierro (FeS<sub>2</sub>), más comúnmente conocido como pirita (Berner, 1984; Frankel y Bazylinski, 2003; Ángeles-Trigueros, 2012). Ésta precipita con hábitos característicos propios que son fácilmente identificables como los cubos, piritohedros, octaedros y diploides (Canfield y Raiswell 1991).

Los elementos necesarios para la formación de pirita se introdujeron en los frutos a través de las fisuras que se forman en la pared epidérmica causa de la descomposición bacteriana, permitiendo la mineralización las estructuras internas (Grimes *et al.*, 2002; Locatelli, 2014; Blanco *et al.*, 2016). La presencia de los hábitos de pirita en las cavidades embrionarias de las semillas se debe a que usualmente la piritización se lleva a cabo en lugares que actúan como microambientes confinados y reductores (Locatelli, 2014), los cuales se dan debido a la presencia y escasa permeabilidad de la materia orgánica, que aumenta según prosiga la descomposición (Fernández-López, 1999).

La buena preservación que presentan los frutos aquí estudiados es consistente con los sugerido con Schopf *et al.* (1965), Schieber (2002); Blanco *et al.*, (2016) sobre un origen temprano de la pirita, es decir, que su formación lleva cuestión de días e incluso horas, lo que evita considerablemente del deterioro de los restos orgánicos. Además de los elementos que forman la pirita, también se infiltraron otros elementos que fueron precipitados en las cavidades embrionarias de las semillas, como calcita, calcedonia y cuarzo, que cementaron cavidades en microambientes dentro de los frutos.

Posteriormente, se llevaron a cabo procesos de diagénesis que compactaron y litificaron el sedimento, dando lugar a la deformación de los fósiles y a la formación de los estratos arenosos y calcáreo-arcillosos que afloran en área de estudio.

Durante el Terciario, la región estuvo sujeta a una actividad tectónica importante relacionada con la orogenia Laramide (Padilla y Sánchez, 1982) y el desarrollo del Orógeno Mexicano (Fitz-Díaz *et al.*, 2017). Además, a nivel regional se establecieron salmueras que fueron responsables de la formación de yacimientos tipo Mississippi Valley ligados a un hidrotermalismo de bajo grado (González-Partida *et al.* 2008). Esto cobra importancia ya que es posible que dicho hidrotermalismo haya jugado un rol en el reemplazamiento de sulfuros de hierro por óxidos en los frutos aquí analizados, e incluso en las localidades del norte estado de Coahuila con nódulos de goethita. De acuerdo con Scott (1990) y Fernández-López (2000), el sulfuro de hierro que reviste internamente las cavidades de elementos fósiles conservados puede ser alterado para formar óxidos de hierro.

Se sugiere que estos fluidos fueron los responsables de la alteración en la composición original de los frutos fósiles, oxidando la pirita y dando como resultado la goethita. Evidencias de este proceso hidrotermal se encuentran en los análisis de XDR realizados a los frutos fósiles, los cuales reportan la presencia de minerales asociados a estos eventos como la kilchoanita y la barita, lo que refuerza la idea de la pseudomorfosis. Blanco-Piñón *et al.* (2009) reportan yacimientos de fluorita en el noreste de México, los cuales están asociados a estos eventos hidrotermales.

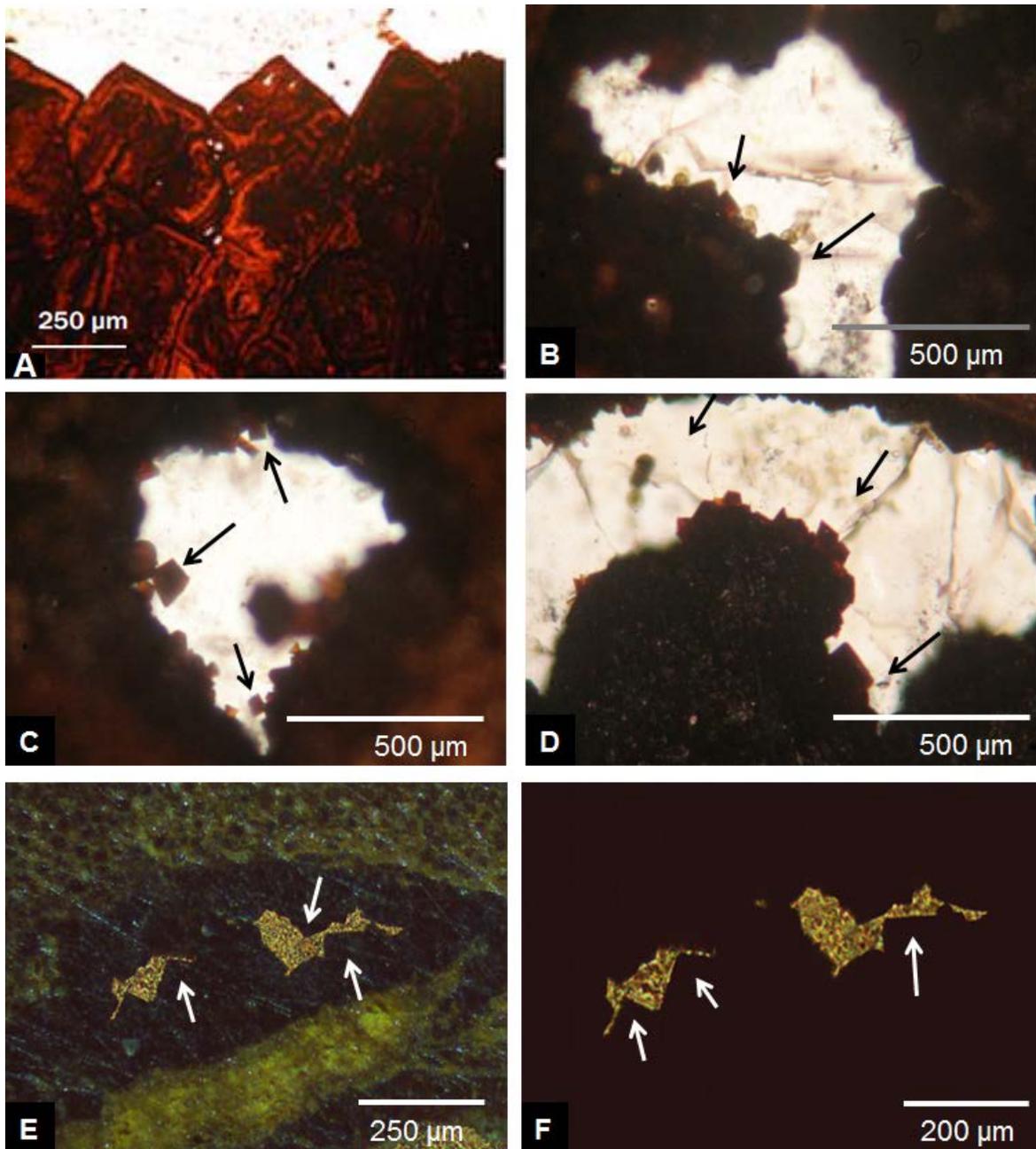
Recientemente, eventos de erosión provocaron que las capas sedimentarias que contenían los restos fósiles quedaran expuestas, causando el desprendimiento y desplazamiento de los fósiles hasta ser depositados como elementos rodados en capas de aluvión y coluvión.

Finalmente, los ejemplares fósiles exhiben algunos procesos tafonómicos que no quedan muy claros cómo se llevaron a cabo. Tal es el caso de la distorsión de su estructura morfológica y anatómica. El aplanamiento dorsoventral puede observarse a nivel macromolecular y el aplastamiento de algunas cavidades en el interior del fruto. Fernández-López (2000) sugiere que este tipo de deformaciones

pudo haber ocurrido por el pisoteo de tetrápodos previo o durante el transporte del fruto durante la fase bioestratinómica. Sin embargo, no se descarta la distorsión por procesos de plegamiento post-diagenético ya que al ser sedimentos plásticos, las rocas no ofrecen resistencia a la deformación, y el contenido fósil que se encuentren en ellos tienden a deformarse por igual. También se observa una desorganización en la anatomía interna de algunos ejemplares, en los cuales la pérdida de materia orgánica y el aporte de minerales externos durante el desplazamiento permitieron que las estructuras internas se revolvieran y se mineralizaran dispuestos de esa manera.



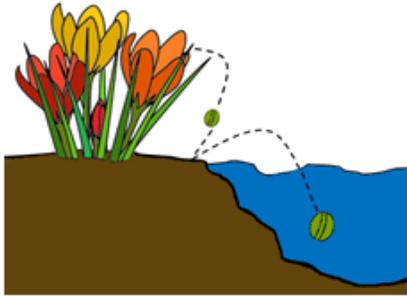
FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS®  
BIBLIOTECA "BIÓL. MARÍA ANA GARZA BARRIENTOS"



**Figura 29.** Goethita pseudomórfica de pirita. **A.** Goethita pseudomórfica reportada por Murciego-Murciego *et al.* (2012). **B-F.** Micrografías de los hábitos de pirita sustituidos por goethita (con su coloración rojiza característica) presentes en las cavidades embrionarias de las semillas. (**B-D**, microscopio óptico, FCB-UANL; **E-F**, microscopio petrográfico, FI-UASLP). Las flechas señalan los hábitos cúbicos que se encontraron en los ejemplares fósiles.

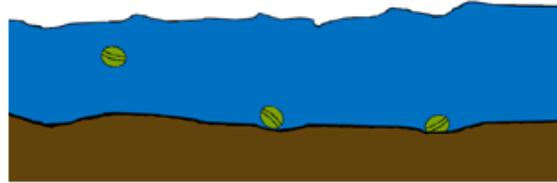
# 1 Desprendimiento

El fruto se desprende de la planta original, cae al suelo y de alguna manera llega a un cuerpo de agua.



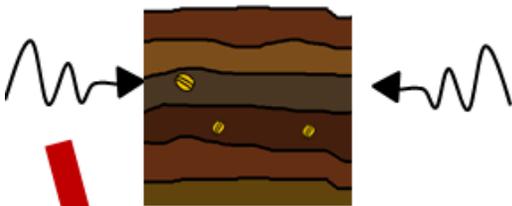
# 2 Transporte

Es transportado por un cuerpo de agua, donde comienza la biodegradación y posteriormente se hunde quedando enterrado



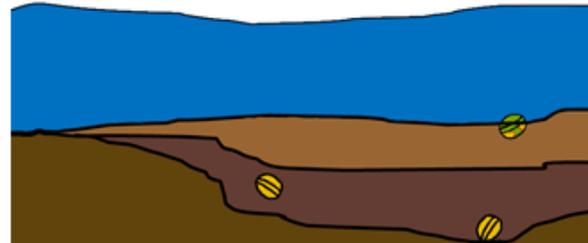
# 4 Plegamientos

Las capas sedimentarias son alteradas por procesos tectónicos que les causan plegamientos y deformaciones.



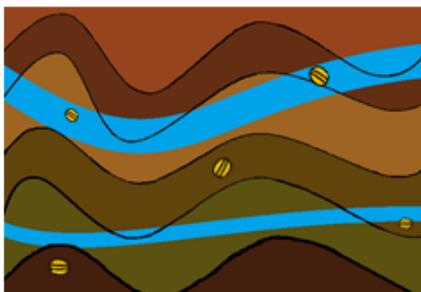
# 3 Mineralización

El fruto queda enterrado y comienza el proceso de permineralización.



# 5 Hidrotermalismo

Influencia de hidrotermalismo en las capas sedimentarias de la región.



# 6 Procesos de oxidación

Los frutos preservados en pirita sedimentaria sufrieron un reemplazamiento por óxidos de hierro debido a la alteración hidrotermal.

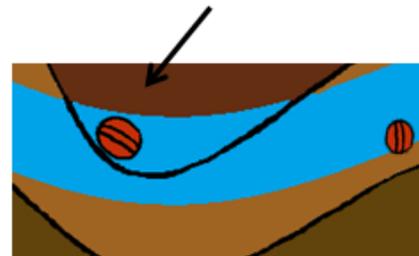


Figura 30. Etapas del proceso tafonómico de los frutos fósiles encontrados en la localidad de la Formación Cerro del Pueblo.

### 10.3 IMPLICACIONES ASTROBIOLÓGICAS

La astrobiología es una ciencia interdisciplinaria que estudia el origen, evolución, distribución y destino de la vida en el universo. Al ser la vida de la Tierra el único ejemplo que se conoce, la mayor parte de los estudios que se realizan en esta disciplina científica se basan en comparaciones con la biología terrestre, y en predicciones y simulaciones de las leyes que rigen la química, física, geología, y entre otras más.

En los últimos años, se ha observado un incremento en la cantidad de instituciones públicas y privadas a nivel global que se dedican al estudio de las distintas ramas de la astrobiología. Actualmente, un ejemplo muy importante de investigación astrobiológica es la búsqueda de vida en Marte. En 2008, la NASA confirmó la presencia de agua mediante las pruebas de laboratorio *in situ* que realizó el vehículo explorador Phoenix. Recientemente, otros estudios sugieren que el planeta alguna vez contó con una gran cantidad de agua líquida en su superficie, lo cual es importante debido a que se considera un precursor esencial para el desarrollo de vida.

La superficie de Marte presenta características topográficas y fisiográficas que indican procesos geológicos que le han ocurrido a través del tiempo. Uno de los aspectos geológicos más importantes es la diferencia entre los hemisferios norte y sur. En el hemisferio norte, la corteza presenta una depresión topográfica importante e indica una extensa repavimentación de la superficie y contrasta con el hemisferio sur, el cual se encuentra lleno de cráteres de impacto (Carr, 2006; Carr y Head, 2010). Algunos autores sugieren la presencia de un gran océano primitivo en el hemisferio norte (Baker *et al.*, 1991; Villanueva *et al.*, 2015) o la existencia de grandes cuerpos de agua como lagos (Carr y Head, 2003) que cubrían un tercio del planeta. Por el contrario, en el hemisferio sur se propone la existencia de antiguos lagos que se desarrollaron dentro de cráteres presentes en la región. Esto debido a la presencia de sedimentos dispuestos en estratos (Cabrol

y Grin, 1999, 2001; Haberle *et al.*, 2001), tal como se observan en los lagos terrestres.

Existen también ciertas estructuras sedimentarias importantes en distintos lugares sobre la superficie de Marte, como los valles de canal (“valley networks”), deltas, depósitos de paleolagos y largos canales de descarga (“outflow channels”) (DiBiase *et al.*, 2013; Black y Hynek, 2017). Estos depósitos han sido asociados a deltas y son las principales evidencias de la presencia de cuerpos de agua por periodos relativamente largos (Ori *et al.*, 2009). Su existencia podría ser muy importante ya que en la Tierra, ambientes deltaicos tienen una alta tasa de sedimentación, lo que potencia el rápido enterramiento de la materia orgánica y los convierte en un ambiente ideal para su preservación (Cabrol *et al.*, 2001; Ehlmann *et al.*, 2008; Ori *et al.*, 2000). Di Achille y Hynek (2010) mencionan que una de las mayores distribuciones de deltas se encuentra en el contorno de lo que alguna vez pudo haber sido un gran océano en el hemisferio norte del planeta, distribuyendo agua corriente desde el hemisferio sur al hemisferio norte.

El hallazgo de óxidos de hierro refuerza la antigua existencia de agua en estos lugares, ya que requieren de este medio para su formación (Hurlbut y Klein, 1985), y más si es el caso de minerales pseudomórficos. Klingelhöfer *et al.* (2005) mencionan el encuentro del óxido goethita por el Rover Spirit de la NASA en rocas altamente alteradas de Columbia Hills, ubicadas dentro del Cráter Gusev. Esta detección es importante ya que se conoce que este mineral usualmente ocurre por el reemplazamiento de otros minerales como sulfuros de hierro (pirita). Este proceso de reemplazamiento es reportado por Ángeles-Trigueros (2015) en sedimentos de óxidos de hierro de la Formación Eagle Ford en Múzquiz, Coahuila. La goethita reportada se identificó como pseudomorfo de pirita sedimentaria debido a ciertas características estructurales que se observaron.

Diversos autores sugieren la alteración de sulfuros como un proceso importante en la formación de óxidos en Marte. Bajo condiciones acuosas, los

óxidos presentes pueden ser el resultado de un proceso de foto-oxidación de sulfuros de hierro, como la pirita (Eggelstone *et al.*, 2010).

También se reportan depósitos de jarosita en el sitio de aterrizaje del rover Opportunity, en Meridiani Planum (Klingerhófer *et al.*, 2004). La presencia de estos depósitos puede indicar la alteración de la pirita, formados a consecuencia de su oxidación en medios acuosos (Zolotov y Shock, 2005). Sin embargo, la presencia de sulfatos en los sedimentos de Marte podría ser consecuencia de un proceso conocido como radiólisis, que pudiera haber afectado la pirita igualmente en presencia de agua (Leticariu *et al.*, 2006).

A pesar de que existen evidencias de que los óxidos presentes en Marte pudieron haber sido pirita, no ha sido posible su confirmación. Si se llega a corroborar que estos minerales se formaron a partir de pirita sedimentaria, sería un descubrimiento muy importante ya que ésta se forma solamente con intervención de vida, como lo sugiere Blanco *et al.* (2010). A demás, la pirita tiene un alto e importante potencial fosilífero que permite preservar organismos que están presentes dentro y fuera de la columna de agua, como el reporte por Blanco *et al.* (2013, 2016) de polen preservado en pirita. En caso de que en algún momento haya habido vida en Marte, existe una alta posibilidad de que estos minerales pudieran contener fósiles los cuales permitirían conocer una vida ancestral en el planeta.

Dado que las estructuras de organismos piritizados pueden sobrevivir a la oxidación, es muy importante el retorno de rocas marcianas a la Tierra. Estas muestras deberán ser especialmente de lugares en donde los óxidos de hierro puedan estar presentes en sedimentos lacustres o marinos, así como en zonas de planicie que se encuentren relacionadas con los ríos o lagos antiguos que puedan haber sido habitables en el pasado, esto con el fin de identificar algunos elementos bióticos comúnmente presentados en la pirita sedimentaria.

La búsqueda de evidencia de habitabilidad, tafonomía (relacionada con fósiles) y moléculas orgánicas en el planeta Marte es ahora un objetivo primario de la NASA y la Agencia Espacial Europea.



FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS  
BIBLIOTECA "BIÓL. MARÍA ANA GARZA BARRIENTOS"

## 11. CONCLUSIONES

- La litología de la Formación Cerro del Pueblo consiste principalmente en afloramientos relativamente homogéneos compuestos de margas alternadas con capas decimétricas de arenisca con diferente tamaño de grano e igualmente capas de espesor decimétrico con presencia de algas caráceas. Todos estos afloramientos se encuentran cubiertos parcialmente por aluvión y coluvión. Los frutos fósiles colectados se encontraron en esta última capa.
- A nivel macroscópico, los ejemplares de frutos fósiles muestran una forma morfológica elíptica, de estructura trilocular y tricarpelar que permite asignarlos al género *Tricostatocarpon*. A nivel mesoscópico y microscópico se observan las semillas, las cuales se encuentran en su mayoría bien preservadas y es posible observar y registrar estructuras anatómicas características con distintos tipos de preservación.
- La preservación de los frutos fósiles de óxidos de hierro encontrados en el área de estudio de la Formación Cerro del Pueblo está dada principalmente por un proceso de permineralización por pirita que ocurrió muy probablemente en un ambiente deltaico, más precisamente en una planicie deltaica. La reconstrucción tafonómica de los ejemplares incluye los procesos de biodegradación, desplazamiento lateral, mineralización, la distorsión, la reelaboración y el encostramiento.
- Los análisis de composición realizados mediante análisis de difracción de rayos X (XRD) a los frutos fósiles arrojaron unos valores mayoritarios de goethita (66% en el primero y de 78%-87% en el segundo), de kilchoanita (34% sólo en el primero), calcita (13%-21% sólo en el segundo) y barita (1%, sólo en el segundo), lo que sugiere un reemplazamiento posterior de la pirita a óxidos de hierro.

## 12. LITERATURA CITADA

Aguilar, F. J., Hernández Rivera, R., López Espinoza, J., Lara Rodríguez, M., Ramírez Velasco, A. A. y Gudiño Maussán, J. L. (2014). Informe: Rescate paleontológico de un esqueleto semiarticulado de Hadrosáurido (Ornithischia: Hadrosauridae) en el ejido Guadalupe, municipio General Cepeda, Coahuila. [Informe inédito]. Consejo de Arqueología, INAH. México.

Aguillón Martínez, M. C. (2010). *Fossil vertebrates from the Cerro del Pueblo Formation, Coahuila, Mexico, and the distribution of Late Campanian (Cretaceous) terrestrial vertebrate faunas*. (Master's thesis). Dedman College, Southern Methodist University, 135 pp.

Aguillón Martínez, M.C., Zelenitsky, D.K., Brinkman, D.B. and Eberth, D. (2004). Eggshell fragments from the uppermost Cerro Del Pueblo Formation (Upper Cretaceous, Mexico). *Journal of Vertebrate Paleontology*, 24(3):33A.

Ángeles-Trigueros, S. A. (2012). *Bioformas microscópicas en piritita sedimentaria y sus implicaciones astrobiológicas*. (Tesis de licenciatura). Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 75 pp.

Ángeles-Trigueros, S. A. (2015). *Evidencias petrográficas del reemplazamiento de sulfuros de hierro por óxidos de hierro en margas de la Formación Eagle Ford (Cretácico Superior) en las cercanías de Múzquiz, norte de Coahuila, México*. (Tesis de Maestría). Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, 125 pp.

Baker, V. R., Strom, R. G., Gulick, V. C., Kargel, J. S., Komatsu, G., Kale, V. S., (1991). Ancient oceans, ice sheets and the hydrological cycle on Mars. *Nature*, 352(6336): 589-594.

Berner, R. A. (1984). Sedimentary pyrite formation: an update. *Acta Geochimica et Cosmochimica*. 48(4): 605-615.

Bestland, E. A., Hammond, P. E., Blackwell, L. D. S., Kays, M. A., and Retallack, J. G. (1999). Geological framework of the Clarno Unit, John Day Fossil Beds National Monument: Central Oregon. *Oregon Geology*, 61(1):3-19.

Black, S. R. and Hynek, B. M. (2017). Characterization of terrestrial hydrothermal alteration products with Mars analog instrumentation: implications for current and future rover investigations. *Icarus*, in press: 1-25.

Blanco, A., Ángeles-Trigueros, S. A., Castañeda-Posadas, C., Ambrocio-Cruz, S. P. (2013). Fossilized pollen grains in sedimentary pyrite and its significance for life prospectation in Mars. In: *44th Lunar and Planetary Science Conference*, 3060.pdf. Texas, USA.

Blanco, A., Ángeles-Trigueros, S. A., Hernández-Ávila, J., Silva-Martínez, L. E., Zavala-Díaz de la Serna, F. J., Ambrocio-Cruz, S. P., Castañeda-Posadas, C. (2016). Microscopic biomorphic structures in Upper Cretaceous marine sedimentary pyrite. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 33(3): 378-386.

Blanco, A., Bolaños-Sánchez, U., Lizárraga-Mendiola, L., Hernández-Ávila, J., Ángeles-Trigueros, S., Ambrocio-Cruz, S. P., González-Sandoval, M. R. (2013). Microscopic evidences of replacement of iron sulfide by iron oxide in macro fossils: a useful tool for the search of life in Mars? In: *44th Lunar and Planetary Science Conference*, 2956.pdf. Texas, USA.

Blanco, A., Zavala, F. J., Hernández-Ávila, J., Maurrasse, F., Duque-Botero, F. & Ramírez- Cardona, M. (2010). Microbial preservation in sedimentary pyrite from Cretaceous organic matter-rich carbonate mudstone: a preliminary report. *41<sup>st</sup> Lunar and Planetary Science Conference*, 2487.pdf. Texas, USA.

Blanco-Piñón, A., Hernández-Ávila, J., Ramírez-Cardona, M., Silva-Martínez, L. E. (2009). Restos fósiles asociados a yacimientos de fluorita en el noroeste de Coahuila, México. En: *XIX Congreso Nacional de Geoquímica. Actas INAGEQ*, 15(1): 77-81.

Bravo-Cuevas, V. M. y Jiménez-Hidalgo, E. (1996). *Las dinosauricnitas de México, su significación Geológico- Paleontológica*. (Tesis de licenciatura). Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, 147 pp.

Brett C. E. (1978). Taphonomy: Sedimentological implications of fossil preservation. In: R.W. Fairbridge (Eds), *Sedimentology. Encyclopedia of Earth Sciences Series* (1191-1256). New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Briggs, D. E. G. (1995). Experimental taphonomy. *Palaos*, 10(6): 539-550.

Brinkman, D. (2014). Turtles of the Mesozoic of Mexico. In: H. E. Rivera-Sylva, K. Carpenter, and E. Frey (Eds.), *Dinosaurs and Other Reptiles from the Mesozoic of Mexico. Life of the Past* (30-43). Bloomington, Indiana: Indiana University Press.

Brinkman, D., Aquillon-Martinez, M.C., De Leon Dávilla, C.A., Jamniczky, V.H., Eberth, D.A. and Colbert, M. (2009). *Euclastes coahuilaensis* sp. nov., a basal cheloniid turtle from the late Campanian Cerro del Pueblo Formation of Coahuila State, Mexico. *PaleoBios*, 28(3): 76-88.

Brinkman, D., Aguillon-Martinez, M. C., Hutchison, J. H., Brown, C. M. (2016). *Yelmochelys rosarioae* gen. et sp. nov., a stem kinosternid (Testudines; Kinosternidae) from the Late Cretaceous of Coahuila, Mexico. *PaleoBios*, 33(0): 1-20.

Brinkman, D. B., Aguillon Martinez, M.C., de Leon Dávila, C. A., Jamniczky, H., Eberth, D. A., and Colbert, M. (2009). *Euclastes coahuilaensis* sp. nov., a basal cheloniid turtle from the late Campanian Cerro del Pueblo Formation of Coahuila State, Mexico. *PaleoBios*, 28(3):76-88.

Brinkman, D. B., Eberth, D. A., Sampson, S. D., Aguillón, M. C., Delgado-de Jesús, C. R. and Rodríguez-de la Rosa, R. A. (2002). Paleontology and stratigraphy of the dinosaur-bearing Cerro del Pueblo Formation, southern Coahuila, Mexico. *Journal of Vertebrate Paleontology*, 22(Suppl. No.3): 38A-39A.

Brinkman, D. B., and Rodriguez de la Rosa, R. (2006). Nonmarine turtles from the Cerro del Pueblo Formation (Campanian), Coahuila State, Mexico. *Late Cretaceous Vertebrates from the Western Interior*. New Mexico Museum of Natural History, 35:229-233.

Brock, F., Parkes, R. J., Briggs, D. E. G. (2006). Experimental pyrite formation associated with decay of plant material. *PALAIOS*, 21(5): 499-506.

Cabrol, N. A., and Grin, E. A. (1999). Distribution, classification, and ages of martian impact crater lakes. *Icarus*, 142(1): 160-172.

Cabrol, N. A., and Grin, E. A. (2001). The evolution of lacustrine environments on Mars: Is Mars only hydrologically dormant? *Icarus*, 149(2): 291-328.

- Cabrol, N. A., Wynn-Williams, D. D., Crawford, D. and Grin, E. A. (2001). Recent Aqueous Environments in Martian Impact Craters: An Astrobiological Perspective. *Icarus*, 154(1): 98-112.
- Calvillo-Canadell, L. (2000). *Determinación taxonómica de estructuras reproductivas y vegetativas de plantas fósiles de Tepexi de Rodríguez, Puebla*. (Tesis de maestría). Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de México, 64 pp.
- Calvillo-Canadell, L. and Cevallos-Ferriz, S.R.S. 2007. Reproductive structures of Rhamnaceae from the Cerro del Pueblo (Late Cretaceous, Coahuila) and Coatzingo (Oligocene, Puebla) Formations, Mexico. *American Journal of Botany*, 94(10): 1658-1669.
- Cambra-Moo, O., Barroso-Barcenilla, F., Coruña, F. and Postigo-Mijarra, J. M. (2013). Exceptionally well-preserved vegetal remains from the Upper Cretaceous of "Lo Hueco", Cuenca, Spain. *Lethaia*, 46(1): 127-140.
- Canfield, D. E. and Raiswell, R. (1991). Pyrite formation and fossil preservation. In: P. A. Allison and D. E. G. Briggs (Eds.), *Taphonomy* (337-387). Plenum Press. New York-London.
- Carr, M. H. (2006). Impact craters. In: M.H. Carr, (Ed) *The surface of Mars* (23-42). New York: Cambridge University Press.
- Carr, M. H. and Head III, J. W. (2003). Oceans of Mars: An assessment of the observational evidence and possible fate. *Journal of Geophysical Research*, 108(E5): 5042.
- Carr, M. H. and Head, J.W. (2010). Acquisition and history of water on Mars. In: N. A. Cabrol and E. A. Grin, (Eds) *Lakes on Mars* (31-67). Boston: Elsevier.

- Castañeda-Posadas C., Blanco-Piñón, A., Hernández-Ávila, J., Ambrocio-Cruz, S., Lizárraga-Mendiola, L., Ángeles-Trigueros, S. (2014). Fossil Stomatocyst in Upper Cretaceous Sedimentary Pyrite from Central Mexico. *International Journal of Geosciences*, 5(2): 214-221.
- Cevallos-Ferriz, S. R. S., Estrada-Ruiz, E., and Pérez-Hernández, B. R. (2008). Phytolaccaceae infructescence from Cerro del Pueblo Formation, Upper Cretaceous (late Campanian), Coahuila, Mexico. *American Journal of Botany*, 95(1): 77-83.
- Cevallos-Ferriz, S. and Vázquez-Rueda, M. (2016). Permineralized infructescence from the Cerro del Pueblo Formation, Upper Cretaceous, Coahuila, Mexico. *Botany*, 94(9): 773-785.
- Cifuentes-Ruiz, P., Vršanský, P., Vega, F.J., Cevallos-Ferriz, S.R.S., González-Soriano, E., and Delgado de Jesús, C.R. (2006). Campanian terrestrial arthropods from the Cerro del Pueblo Formation, Difunta Group in northeastern Mexico. *Geologica Carpathica*, 57(5): 347-354.
- Crawley, R.A. (1975). *Stratigraphy and sedimentology of the Cerro Grande Formation (Upper Cretaceous), Parras Basin, northeastern Mexico*: (PhD. Thesis). University of Texas at Austin, 272 pp.
- Di Achille and Hynek, B. (2010). Ancient ocean on Mars supported by global distribution of deltas and valleys. *Nature Geoscience*, 3(7): 459-463.
- DiBiase, R., Limaye, A., Scheingross, J.S., Fischer, W.W., Lamb, M. (2013). Deltaic deposits at Aeolis Dorsa: Sedimentary evidence for a standing body of water on the northern plains of Mars. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 118(6): 1285–1302.
- Dunn, K. A., McLean, R. J. C., Upchurch, G. R., Jr Folk, R. L. (1997). Enhancement of leaf fossilization potential by bacterial biofilms. *Geology*, 25(12): 1119–1122.

Eberth, D. A., Delgado-de Jesús, C. R., Lerbekmo, J. F., Brinkman, D. B., Rodríguez-De la Rosa, R. A., and Sampson, S. D. (2004). Cerro del Pueblo Fm. (Difunta Group, Upper Cretaceous), Parras Basin, Southern Coahuila, Mexico: reference sections, age, and correlation. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 21(3):335- 352.

Eberth, D., Sampson, S. D., Rodríguez-de la Rosa, R. A., Aguillón-Martínez, M.C., Brinkman, D.B. and Lopez-Espinoza, J. (2003). Las Águilas: an unusually rich Campanian-age vertebrate locale in southern Coahuila, Mexico. *Journal of Vertebrate Paleontology*, 23(3): 47A.

Efremov, I. A. (1940). Taphonomy: New Branch of Paleontology. *Pan-American Geologist*, 74(2): 81-93.

Egglestone, C. M., Parkinson, B. A., Bramlett, E. S. (2010). The hematite-pyrite tandem cell: Avenue to understanding Mars photochemical water oxidation? *Goldschmit Conference*, Abstract 261. Knoxville, USA.

Ehlmann, B. L., Mustard, J. F., Fassett, C. I., Schon, S. C., Head, J. W., Des Marais D. J., Grant J. A. and Murchie, S. L. (2008). Clay minerals in delta deposits and organic preservation potential on Mars. *Nature Geoscience*, 1(6): 355-358.

Espinosa-Arrubarrena L., Applegate, S.P., and Hernández-Rivera, R. (1989). Crónicas de una gran expedición paleontológica. *Ciencia y Desarrollo*, 15(88): 23-32.

Estrada-Ruíz, E. (2004). *Frutos permineralizados del Cretácico Superior del Estado de Coahuila, México*. (Tesis de maestría). Universidad Nacional Autónoma de México, 112 pp.

Estrada-Ruiz, E., Calvillo-Canadell, L. and Cevallos-Ferriz, S. (2009). Upper Cretaceous aquatic plants from Northern Mexico. *Aquatic Botany*, 90(4): 282-288.

- Estrada-Ruiz E., and Cevallos-Ferriz, S.R.S. (2007). Infructescences from the Cerro del Pueblo Formation (Late Campanian), Coahuila, and El Cien Formation (Oligocene-Miocene), Baja California Sur, Mexico. *International Journal of Plant Sciences*, 168(4): 507-519.
- Fernández López, S. R. (1991). Sistemas tafonómicos: función y evolución. *Revista española de paleontología*, N° extraordinario: 21-34.
- Fernandez-López, S. R. (1999). Tafonomía y fosilización. En: B. Meléndez (Ed.), *Tratado de Paleontología, tomo I* (51-107). Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
- Fernández-López, S. R. (2000). *Temas de Tafonomía*. Departamento de Paleontología. Facultad de Ciencias Geológicas. Universidad Complutense de Madrid. 167 pp.
- Fernández-Remolar, D. C. and Knoll, A. H. (2008). Fossilization potential of iron-bearing minerals in acidic environments of Rio Tinto, Spain: Implications for Mars exploration. *Icarus*, 194(1): 72-85.
- Fitz-Diaz, E., Lawton, T. F., Juárez, E., Chávez-Cabello, G. (2017). The Cretaceous-Paleogene Mexican orogen: Structure, basin development, magmatism and tectonics. *Earth-Science Reviews*. In Press. 146 pp.
- Frankel, R. B. and Bazylinsk, D. (2003). Biologically Controlled Mineralization in Prokaryotes. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 54(1): 217-247.
- Garcia, R., and Reynoso, V. H. (2002). The southernmost record of the turtle *Bothremys* (Testudine: Pleurodira) in the Cerro del Pueblo Formation, near Saltillo, Coahuila, Mexico. *Journal of Vertebrate Paleontology*, 22(3): 56A.

Gates T. A. (2007). *Taxonomy, biogeography, and paleoecology of North American hadrosaurid (Ornithopoda) dinosaurs*. (PhD Thesis). University of Utah, 290 pp.

Gates, T. A., Sampson, S. D., Delgado de Jesús, C. R., Zanno, L. E., Eberth, D., Hernandez-Rivera, R., Aguillón Martínez, M. C. and Kirkland, J. I. (2007). *Velafrons coahuilensis*, a new lambeosaurine hadrosaurid (Dinosauria: Ornithopoda) from the Late Campanian Cerro del Pueblo Formation, Coahuila, Mexico. *Journal of Vertebrate Paleontology*, 27(4): 917-930.

González-Partida, E., Camprubí, A., Canet, C. y González-Sánchez, F. (2008a). Fisicoquímica de salmueras e hidrocarburos en cuencas petroleras y en depósitos minerales tipo Mississippi Valley y asociados. Parte I: temperatura, presión y composición de inclusiones fluidas. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 60(1): 11-22.

González-Partida, E., Camprubí, A., Canet, C. y González-Sánchez, F. (2008b). Fisicoquímica de salmueras e hidrocarburos en cuencas petroleras y en depósitos minerales tipo Mississippi Valley y asociados. Parte II: ejemplos de la Cuenca de Sabinas y la Cuenca del Sureste, México: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 60(1): 23-42.

Grimes, S. T., Davies, K. L., Butler, I. B., Brock, F., Edwards, D., Rickard, D., Briggs, D. E. G., Parkes, R. J. (2002). Fossil plants from the Eocene London Clay: the use of pyrite textures to determine the mechanism of pyritization. *Journal of the Geological Society of London*, 159(5): 493-501.

Haberle, R. M., McKay, C. P., Schaeffer, J., Cabrol, N. A., Grin, E. A., Zent, A. P. and Quinn, R. (2001). On the possibility of liquid water on present-day Mars. *Journal of Geophysical Research*, 106(E10): 23317-23326.

Heimhofer, U., Ariztegui, D., Lenniger, M., Hesselbo, S. P., Martill, D. M., and Riosnetto, A. M. (2010). Deciphering the depositional environment of the laminated Crato fossil beds (Early Cretaceous, Araripe Basin, Northeastern Brazil). *Sedimentology*, 57(2): 677-694.

Hernández, R., Aguillón-Martínez, M., Delgado, C. and Gómez, N. (1995). The Mexican Dinosaur National Monument. *Journal of Vertebrate Paleontology*, 15(Suppl. No.3): 34A.

Hernández Rivera, R. (1997). Mexican dinosaurs. In P. J. Currie and K. Padian (Eds.), *Encyclopedia of Dinosaurs* (433-437). U.S.A.: Academic Press.

Hernández-Rivera, R. (2000). Los dinosaurios en México. *Revista Digital Universitaria*, UNAM, 1(1).

Recuperado de: [www.revista.unam.mx/vol.1/dino/index.html](http://www.revista.unam.mx/vol.1/dino/index.html)

Hernández, R., and Delgado de Jesús, C. R. (2000). Hadrosaur skin impression and associated skeletal remains from Cerro del Pueblo Fm. (Uppermost Campanian) southeastern Coahuila, Mexico. *Journal of Vertebrate Paleontology*, 20(Suppl. No.3): 48A.

Hurlbut, C. S. and Klein, C. (1985). *Manual of Mineralogy, 20th ed.* John Wiley & Sons., 681 p.

Ifrim, C., Stinnesbeck, W., Garza, R.R., Ventura, J.F. (2010). Hemipelagic cephalopods from the Maastrichtian (Late Cretaceous) Parras Basin at La Parra, Coahuila, Mexico, and their implications for the correlation of the lower Difunta Group. *Journal of South American Earth Sciences*, 29(3): 597-618.

INEGI. (2008). Síntesis geográfica de Coahuila. Publicación gubernamental nacional. Mexico, D.F.

Imlay, R. W. (1936). Part IV. Geology of the western part of the Sierra de Parras. *Geological Society of America Bulletin*, 47(7): 1091-1152.

Jeffree, C. E. (2006). The fine structure of the plant cuticle. In M. Riederer and C. Müller (Eds.), *Annual Plant Reviews Volume 23: Biology of the Plant Cuticle*, (11-125). Oxford: Blackwell Publishing Ltd.

Jetter, R., Kunst, L. and Samuels, L. (2006). Composition of plant cuticular waxes. . In M. Riederer and C. Müller (Eds.), *Annual Plant Reviews Volume 23: Biology of the Plant Cuticle*, (145-181). Oxford: Blackwell Publishing Ltd.

Kirkland, J., Hernández Rivera, R., Aguillón Martínez, M., Delgado de Jesús, C., Gómez-Núñez, R., Vallejo, I., (2000). The Late Cretaceous Difunta Group of the Parras Basin, Coahuila, Mexico, and its vertebrate fauna. In: Guide Book of the Field Trips (133-172). *Society of Vertebrate Paleontology*, (Special publication 3). Mexico.

Kirkland, J.I., Hernandez-Rivera, R., Gates, T.A., Paul, G.S., Nesbitt, S., Serrano-Brañas, C.I. and Garcia-De La Garza, J.P. (2006). Large hadrosaurine dinosaurs from the latest Campanian of Coahuila, Mexico. In: S.G. Lucas and R.M. Sullivan (Eds.), *Late Cretaceous Vertebrates From the Western Interior*, *Science Bulletin* 35 (299-316). New México: New Mexico Museum of Natural History.

Klingelhöfer, G., Morris, R.V., Bernhardt, B., Schröder, C., Rodionov, D.S., Souza, P.A., Yen, A.S.; Gellert, R., Evlanov, E.N., Zubkov, B., Foh, J., Bonnes, U., Kankeleit, E., Gütlich, P., Ming, D.W., Renz, F., Wdowiak, T., Squyres, S.W. and Arvidson, E.R. (2004). Jarosite and Hematite at Meridiani Planum from Opportunity's Mössbauer Spectrometer. *Science*, 306(5702): 1740-1745.

Klingelhöfer, G., Rodionov, D.S., Morris, R.V., Schröder, C., Souza, P.A., Ming, D.W., Yen, A.S., Bernhardt, B., Renz, F., Fleischer, I., Wdowiak, T., Squyres, S.W. and the Athena Science Team. (2005). MIMOS II On MER - One Year Of Mössbauer Spectroscopy On The Surface Of Mars: From Jarosite At Meridiani Planum To Goethite At Gusev Crater. *36th Lunar and Planetary Science*. 2349.pdf. Texas, U.S.A.

Koch, E. B. and Friedrich, W. L. (1970). Geologisch-Paläobotanische Untersuchung der Miozänen Braunkohlen bei FASTERHOLT in JUTLAND, DÄNEMARK. *Bulletin of the Geological Society of Denmark*, 20(2): 169-191.

Köppen, W. (1936). Das geographische System der Klimate. In: W. Köppen and R. Geiger (Eds.), *Handbuch der Klimatologie* (1-44). Verlag von Gebrüder Borntraeger, Berlin.

Kress, W. J. and Specht, C. (2005). Between Cancer and Capricorn: phylogeny, evolution, and ecology of the tropical Zingiberales. In: I. Friis and H. Balslev (Eds), *Proceedings of a symposium on plant diversity and complexity patterns - local, regional and global dimensions* (459-478), *Biologiske Skrifter*, The Royal Danish Academy of Sciences and Letters, Copenhagen.

Lefticariu, L., Pratt, L. M. and Laverne, J. A. (2006). Experimental study of radiolytic oxidation of pyrite: implication for Mars-relevant crystal processes. *38th Lunar and Planetary Science*. 1953.pdf. Texas, U.S.A.

Locatelli, E. R. (2013). The exceptional preservation of leaves in iron-rich sediments from Oceania. In: *Geological Society of America Annual Meeting*. Conference paper, 45. Denver, USA.

- Locatelli, E. (2014). The exceptional preservation of plant fossils: a review of taphonomic pathways and biases in the fossil record. *The Paleontological Society Papers*. 20(1):237-257.
- Loewen, M.A., Sampson, S.D., Lund, E.K., Farke, A. A., Aguillón-Martínez, M.C., de Leon, C. A., Rodríguez-de la Rosa, R. A., Getty, M. A. and Eberth, D. A. (2010). Horned Dinosaurs (Ornithischia: Ceratopsidae) from the Upper Cretaceous (Campanian) Cerro del Pueblo Formation, Coahuila, Mexico. En: M. J. Ryan, B. J. Chinnery-Allgeier, and D. A. Eberth (Eds), *New Perspectives on Horned Dinosaurs* (99-116). Bloomington, Indiana: Indiana University Press.
- Lund, E. K., Loewen, M. A., Sampson, S. D., Getty, M. A., Aguillon Martinez, A., Rodríguez de la Rosa, R. A. and Eberth, D. A. (2007). Ceratopsian remains from the Late Cretaceous Cerro del Pueblo Formation, Coahuila, Mexico. In D. R. Braman (Ed.), *Ceratopsian Symposium: Short Papers, Abstracts, and Programs* (108-113). Alberta, Canada: Drumheller: Royal Tyrrell Museum of Palaeontology.
- Martínez-Díaz, J. L. (2011). *El registro fósil de anquilosaurios (Thyreophora-Ankylosauria) de Cretácico Superior de México*. (Tesis de licenciatura). Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, 49 pp.
- McBride, E. F., Weidie, A. E. and Wolleben, J. A. (1971). Deltaic origin of Difunta Group (Late Cretaceous to Paleocene), Parras Basin, Coahuila and Nuevo Leon, Mexico. [Abstract]. *The American Association of Petroleum Geologists*, 55(2): 352.
- McBride, E., Weidie, A., Wolleben, J., Laudon, R. (1974). Stratigraphy and structure of the Parras and La Popa basins, northeastern Mexico. *Geological Society of America Bulletin*, 85(10): 1603-1622.

- McBride, E., Weidie, A., Wolleben, J. (1975). Deltaic and associated deposits of the Difunta Group (Late Cretaceous to Paleocene), Parras and La Popa basins, northeastern Mexico. In M. Broussard (Ed.), *Deltas, Models for Exploration* (485–522): Houston, Texas: Houston Geological Society.
- Murciego-Murciego, A., Álvarez-Ayuso, E., García-Sánchez, A., Pellitero-Pascual, E., Sanz-Arranz, A., Medina-García, J. and Rull-Pérez, F. (2012). Weathering Products of Pb, Sb, As and Fe-Bearing Sulfides in the Losacio Mining Area (Zamora, Spain). *Revista de la Sociedad Española de Mineralogía Macla*, 16(1): 230-231.
- Murray, G. E., Weidie Jr, A. E., Boyd, D. R., Forde, R. H. and Lewis Jr, P. D. (1962). Formational divisions of Difunta Group, Parras Basin, Coahuila and Nuevo León, Mexico. *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists*, 46(3): 374-383.
- Ori, G. G., Di Achille, G. and Pondrelli, M. (2009). Deltas on Mars. *40th Lunar and Planetary Science Conference*. Conference paper, 1579.pdf. The Woodlands, U.S.A:
- Ori, G. G., Marinangeli, L. and Komatsu, G. (2000). Martian paleolacustrine environments and their geological constraints on drilling operations for exobiological research. *Planetary and Space Science*, 48(11): 1027-1034.
- Padilla y Sánchez, Ricardo J. (1982). *Geologic Evolution of the Sierra Madre Oriental Between Linares, Concepción del Oro, Saltillo, and Monterrey, Mexico*. (PhD Thesis). The University of Texas at Austin. 217 pp.
- Padilla y Sánchez. Ricardo J. (1985). Las Estructuras de la Curvatura de Monterrey, Estados de Coahuila, Nuevo León, Zacatecas y San Luis Potosí. *Revista del Instituto de Geología, UNAM*, 6(1): 1-20.

Pérez-Hernández B. R. y Cevallos-Ferriz, S.R.S. (1998) Infrutescencia compleja del Cretácico (Campaniano) de México (264). En: *Resúmenes del séptimo Congreso Latinoamericano de Botánica*. Sociedad Latinoamericana de Botánica, México.

Prakash, U. (1960). Studies in the Deccan Intertrappean flora: two palm woods from Mohgaon Kalan. *Palaeobotanist*, 7(2): 136-141.

Prieto-Márquez, A. and Serrano Brañas, C. I. (2012). *Latirhinus uitstlani*, a 'broad-nosed' saurolophine hadrosaurid (Dinosauria, Ornithopoda) from the late Campanian (Cretaceous) of northern Mexico. *Historical Biology*, 24(6): 607-619.

Quintero-Legorreta, O. y Aranda-García, M. (1985). Relaciones estructurales entre el Anticlinorio de Parras y el Anticlinorio de Arteaga (Sierra Madre Oriental), en la región de Agua Nueva, Coahuila. *Revista del Instituto de Geología, UNAM*, 6(1): 21-36.

Ramírez-Velasco, A. A. y Hernández-Rivera, R. (2015). Diversity of late cretaceous dinosaurs from Mexico. *Boletín Geológico y Minero*, 126(21): 63-108.

Ramírez-Velasco, A. A., Hernández-Rivera, R. and Servín-Pichardo, R. (2014). The hadrosaurian record from Mexico. In: Eberth, D.A. and Evans, D.C. (Eds.), *Hadrosaurs* (340-360). Bloomington, Indiana: Indiana University Press.

Rivera-Sylva, H.E. and Carpenter, K. (2014). Mexican Saurischian Dinosaurs. In: H.E. Rivera-Sylva, K. Carpenter and E. Frey (Eds.), *Dinosaurs and Other Reptiles from the Mesozoic of Mexico* (143-155). Indiana: Indiana University Press.

Rivera-Sylva, H. E., Carpenter, K. y Aranda-Manteca, F.J. (2001). Late Cretaceous nodosaurids. (Ankylosauria: Ornithischia) from Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 28(3): 371-378.

Rivera-Sylva, H.E. y Espinosa-Chávez, B. (2006). Ankylosaurid (Dinosauria: Thyreophora) osteoderms from the Upper Cretaceous Cerro del Pueblo of Coahuila, Mexico: *Carnets de Géologie*, Brest, Letter 2006/02 (CG2006\_L02), 5.

Rivera-Sylva, H. E., Carpenter, K. and Frey, E. (2014). *Dinosaurs and other reptiles from the Mesozoic of Mexico*. Indiana: Indiana University Press.

Rivera-Sylva, H. E., Carpenter, K. and Aranda-Manteca, J. (2011). Late cretaceous nodosaurids (Ankylosauria: Ornithischia) from Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 28(3): 371-378.

Rodríguez-De la Rosa, R. A. (2003). Pterosaur tracks from the latest Campanian Cerro del Pueblo Formation of southeastern Coahuila, Mexico. *Geological Society, London, Special Publications*, 217(1): 275-282.

Rodríguez-de la Rosa, R. A. (2007). Hadrosaurian footprints from the late Cretaceous Cerro del Pueblo Formation of Coahuila, Mexico (339-343). In: E. Díaz-Martínez e I Rábano (Eds.), *Fourth European Meeting on the Palaeontology and Stratigraphy of Latin America*. Madrid, España: Cuadernos del Museo Geominero 8.

Rodríguez-De la Rosa, R. A. and Cevallos-Ferriz, S.R.S. (1994). Upper Cretaceous Zingiberalean fruits whit in situ seeds from Southeastern Coahuila, Mexico. *International Journal of Plant Sciences*. 155(6): 786-805.

Rodríguez-de la Rosa, R. A., Aguillón-Martínez, M.C., López-Espinoza, J., Eberth, D.A. (2004). The Fossil Record of Vertebrate Tracks in Mexico,

*Ichnos: An International Journal for Plant and Animal Traces*, 11(1-2): 27-37.

Rodríguez-de la Rosa, R. A. and Cevallos-Ferriz, S. R. (1998). Vertebrates of the El Peillal locality (Campanian, Cerro del Pueblo Formation), southeastern Coahuila, Mexico. *Journal of Vertebrate Paleontology* 18(4): 751-764.

Rodríguez-de la Rosa, R. A., Cevallos-Ferriz, S. R. and Silva-Pineda, A. (1998). Paleobiological implications of Campanian coprolites. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 142(3-4): 231-254.

Schieber, J. (2002). Sedimentary pyrite: A window into the microbial past. *Geology*, 30(6): 531-534.

Schopf, J. M. (1975). Modes of fossil preservation. *Review of Paleobotany and Palynology*. 20(1): 27-53.

Schopf, J. M., Ehlers, E. G., Stiles, D. V. and Birle, J. D. (1965). Fossil iron bacteria preserved in pyrite. *Proceedings of the American Philosophical Society*. 109(5): 288-308.

Scott, A. C. (1990). Anatomical preservation of plants. In D.E.G. Briggs and P.R. Crowther (Eds), *Palaeobiology: a synthesis* (2634). Oxford, London: Blackwell Scientific.

Serrano-Brañas, C.I. (1997). *Descripción de los dinosaurios pertenecientes a la familia Hadrosauridae del Cretácico Superior del estado de Coahuila, México*. (Tesis de licenciatura). Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, 61 pp.

Serrano-Brañas, C.I., (2006). *Descripción de los dinosaurios pertenecientes a la familia Hadrosauridae del Cretácico Superior de Coahuila, México*

(Tesis de maestría). Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, 200 pp.

Polaco-Rosas, A. C., Serrano-Brañas, C.I., Torres-Rodríguez, E. y Espinoza-Chávez, B. (2009). Primer hallazgo de hadrosaurios neonatos de la Tribu Kritosaurini (subfamilia Hadrosaurinae) en la Formación Cerro del Pueblo del Estado de Coahuila, México. En: *Compendio del XI Congreso Nacional de Paleontología*. Conference paper, 60 p. Juriquilla, México.

Serrano-Brañas, C.I. and Espinoza-Chávez, B. (2017). Taphonomic history of a 'duckbill' dinosaur (Dinosauria: Ornithopoda) from the Cerro del Pueblo Formation (Upper Cretaceous, Campanian) Coahuila, Mexico: Preservational and paleoecological implications. *Cretaceous Research*, 74(1): 165-174.

Serrano-Brañas, C.I., Hernández-Rivera, R. Torres-Rodríguez, E. and Espinoza-Chávez, B. (2006). A natural hadrosaurid endocast from the Cerro del Pueblo Formation (Upper Cretaceous) of Coahuila, Mexico. *New Mexico Museum of Natural History Science Bulletin*, 35(1): 317-321.

Silva-Pineda, A. (1984). Frutos del Cretácico Superior del estado de Coahuila, México. *Memoria del III Congreso Latinoamericano de Paleontología*, 432-437.

Soegaard, K., Ye, H., Halik, N., Daniels, A.T., Arney, J. and Garrick, S. (2003). Stratigraphic evolution of latest Cretaceous to early Tertiary Difunta foreland basin in northeast Mexico: influence of salt withdrawal on tectonically induced subsidence by the Sierra Madre Oriental fold and thrust belt. In: C. Bartolini, R. T. Buffler and J. Blickwede (Eds.), *The Circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon Habitats, Basin*

*Formation, and Plate Tectonics* 79: (364-394). Oklahoma: American Association of Petroleum Geologists.

Sohl, N. F. and Christopher, R. A. (1983). The Black Creek-Peedee Formational Contact (Upper Cretaceous) in the Cape Fear River Region of North Carolina. *United States Geological Survey* 5, professional papers, 1285.

Spicer, R. A. (1990). Fossils as environmental indicators: climate from plants. In: Briggs, D.E.G. and Crowther, P.R. (Eds), *Palaeobiology: a synthesis* (401-403). Oxford: Blackwell Scientific.

Spicer, R. A. (1991). Plant Taphonomic Processes. In: P. A. Allison and D. E. G. Briggs (Eds.), *Taphonomy: Releasing the Data Locked in the Fossil Record. Topics in Geobiology*. New York: Plenum Press.

Torres-Rodríguez, E. (2006). *Terópodos del Cretácico de Coahuila, México*. (Tesis de licenciatura). Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, 100 pp.

Vázquez-Rueda, M. A., Calvillo-Canadell, L., Nuñez-Mariel, N. Y., Cevallos-Ferriz, S. R. S. (2011). Fruto del Cretácico Superior de la Formación Cerro del Pueblo, Coahuila. En: *Libro de resúmenes del XII Congreso Nacional de Paleontología* (No. 139), Puebla de los Ángeles (México).

Villanueva, G. L., Mumma, M. J., Novak, R. E., Käufel, H. U., Hartogh, P., Encrenaz, T., Tokunaga, A., Khayat, A. and Smith, M. D. (2015). Strong water isotopic anomalies in the martian atmosphere: Probing current and ancient reservoirs. *Science*, 384(6231): 218-221.

Villanueva-Amadoz, U., Calvillo-Canadell, L. y Cevallos-Ferriz, S.R.S. (2014). Síntesis de los trabajos paleobotánicos del Cretácico en México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 66(1): 97-121.

- Vivas-González, R. (2013). *Paleoecología de dinosaurios hadrosauridos (Ornithischia: Ornithopoda) de la formación Cerro del Pueblo (Cretácico tardío: Campaniano), Coahuila, México. Linares, Nuevo León.* (Tesis de Maestría). Facultad de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Nuevo León. 102 pp.
- Vega-Vera, F.J.; Mitre-Salazar, L.M. y Martínez-Hernández, E. (1989). Contribución al conocimiento de la estratigrafía del Grupo Difunta (Cretácico Superior-Terciario) en el noreste de México. *Revista del Instituto de Geología. Universidad Autónoma de México*, 8(2): 179-187.
- Vogt, M., Stinnesbeck, W., Zell, P., Kober, B., Kontny, J., Herzer, N., Frey, E., Rivera-Sylva, H.E., Padilla Gutierrez, J.M., Amezcua, N. and Flores Huerta, D. (2016). Age and depositional environment of the “dinosaur graveyard” at Las Águilas, southern Coahuila, NE Mexico. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 441(4): 758-769.
- Weidie, A. and Murray, G.E. (1967). Geology of Parras Basin and adjacent areas of northeastern Mexico. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 51(5): 678-695.
- Wolleben, J. (1977). Paleontology of the Difunta Group (Upper Cretaceous–Tertiary) in northern Mexico. *Journal of Paleontology*, 51(2): 373-398.
- Zolotov, M.Y. and Shock, E.L. (2005). Formation of jarosite-bearing deposits through aqueous oxidation of pyrite at Meridiani Planum, Mars. *Geophysical Research Letters*, 32(21): L21203.