



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

# **POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS**

INSTITUTO DE GEOLOGÍA

“PALEOBIOLOGÍA DE LOCALIDADES LAGERSTÄTTEN EN  
MÉXICO: USO DE INDICADORES DIAGNÓSTICOS EN LA  
FOSILIZACIÓN SELECTIVA Y EL PALEOAMBIENTE”

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACEDÉMICO DE  
**MAESTRO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS**  
**BIOLOGÍA AMBIENTAL**

PRESENTA

**BIOL. FRANCISCO RIQUELME ALCÁNTAR**

TUTOR PRINCIPAL: DR. JESÚS ALVARADO ORTEGA

COMITÉ TUTOR: DR. JOSÉ LUIS RUVALCABA SIL

DR. JUAN PABLO BERNAL URUCHURTU

MÉXICO, D.F.

OCTUBRE, 2011



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

**Dr. Isidro Ávila Martínez**  
**Director General de Administración Escolar, UNAM**  
**Presente**

Me permito informar a usted que en la reunión ordinaria del Comité Académico del Posgrado en Ciencias Biológicas, celebrada el día 1 de agosto de 2011, se aprobó el siguiente jurado para el examen de grado de **MAESTRO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS (BIOLOGÍA AMBIENTAL)** del alumno **FRANCISCO RIQUELME ALCANTAR**, con número de cuenta **405024599**, con la tesis titulada **"PALEOBIOLOGÍA DE LOCALIDADES LAGERSTÄTTEN EN MÉXICO: USO DE INDICADORES DIAGNÓSTICOS EN LA FOSILIZACIÓN SELECTIVA Y EL PALEOAMBIENTE"**, realizada bajo la dirección del **DR. JESÚS ALVARADO ORTEGA**:

**Presidente:** DR. FRANCISO JAVIER VEGA VERA  
**Vocal:** DR. LAURO BUCIO GALINDO  
**Secretario:** DR. JOSÉ LUIS RUVALCABA SIL  
**Suplente:** DR. ABEL MORENO CARCAMO  
**Suplente:** DR. ENRIQUE MARTÍNEZ HERNÁNDEZ

Sin otro particular, me es grato enviarle un cordial saludo.

**ATENTAMENTE**  
**"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"**  
Cd. Universitaria, D.F., a 13 de octubre de 2011.

*M. del Coro Arizmendi*  
**DRA. MARÍA DEL CORO ARIZMENDI ARRIAGA**  
**COORDINADORA DEL PROGRAMA**

c.c.p. Expediente del interesado

## AGRADECIMIENTOS

El presente proyecto de investigación se desarrollo dentro del programa de Posgrado en Ciencias Biológicas de la UNAM, quiero agradecer particularmente al Dr. Juan Núñez Farfán, y Lilia Espinoza, además de Gabriela Diego del IGL-UNAM, por el apoyo recibido durante el desarrollo del presente trabajo.

La financiación de este estudio estuvo a cargo de la beca CONACYT-239885. Adicionalmente, esta investigación ha sido parcialmente financiada por la subvención del proyecto PAPIIT-UNAM IN403210, PAPIIT-UNAM IN225008, y por el subsidio del proyecto CONACYT 131944.

Un agradecimiento especial al Director de Tesis: Dr. Jesús Alvarado; al igual que al Comité Tutor: Dr. José Luis Ruvalcaba, y Dr. Juan Pablo Bernal, por su generosa participación en este trabajo. Además, gracias a los miembros del Jurado: Dr. Abel Moreno, Dr. Enrique Martínez, Dr. Francisco Vega, Dr. Lauro Bucio, por las críticas y correcciones para mejorar el contenido y la edición del manuscrito.

Igualmente, gracias a los cantereros y amateurs de las canteras fosilíferas en la región Norte de Múzquiz, Coahuila, por la ayuda en la colecta y preservación de los fósiles: a Héctor Porras, Director del Museo Histórico de Múzquiz; a Juan Manuel Santos, de la Cantera Palestina; y de la ciudad de Múzquiz, a Juan Quintana, Tania Aguirre, la Maestra Esperanza, “El Pilo”, y “El Diablo”.

Finalmente, se agradece a Karim López y Francisco Jaimes por el apoyo técnico durante el análisis PIXE en la Unidad Pelletron del IF-UNAM. Así como por las imágenes y análisis adquiridos mediante el uso de SEM-EDX, gracias a Yolanda Hornelas del ICMYL-UNAM, Silvia Espinosa del FC-UNAM, Carlos Linares del LUP-IGF-UNAM, Jaqueline Cañetas del IF-UNAM, Margarita Reyes del IGL-UNAM.

*Verba volant, scripta manent*



# ÍNDICE

**AGRADECIMIENTOS.1**

**ÍNDICE.2**

**LISTA DE FIGURAS Y TABLAS.4**

**RESUMEN.7**

**ABSTRACT.11**

**1. INTRODUCCIÓN.13**

1.1 Tres Localidades Lagerstätten en México.**16**

1.2 La fosilización selectiva es una clave del Paleoambiente.**20**

1.3 Fingerprints fósiles como indicadores diagnósticos.**22**

1.4 Localidades tipo Múzquiz Lagerstätte: El Pilote y Palestina.**24**

1.5 La Cantera Palestina.**29**

1.6 La Cantera El Pilote.**32**

1.5 Paleobiología de Lagerstätten.**33**

**2. OBJETIVOS.35**

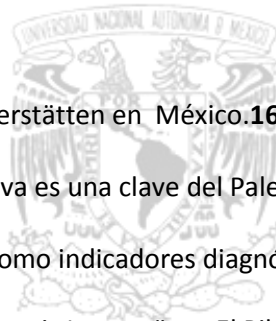
**3. MÉTODOS.37**

3.1 Ejemplares.**37**

3.2 Muestras de Tejidos.**39**

3.3 Muestras de Sedimentos.**39**

3.4 Experimental.**39**



#### **4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.43**

4.1 Microanálisis diagnóstico por Luz UV.**43**

4.2 Mineralogía y Análisis no destructivo por PIXE.**49**

4.3 Microanálisis de tejidos blandos y Biomineralización.**58**

4.4 Análisis ultraestructural de los sedimentos que contienen fósiles.**69**

**4.5** Contribución de nanofósiles en la génesis de los carbonatos de Múzquiz

Lagerstätte: algunos ejemplos.**79**

#### **5. CONCLUSIONES.86**

5.1 Fosilización selectiva y análisis no destructivo.**86**

5.2 Paleoambiente.**89**

#### **6. BIBLIOGRAFÍA.93**

#### **7. ANEXO.108**

7.1. Fossil fingerprints and microbial biomineralization on fish soft tissues from the Múzquiz Rythmites Late Cretaceous Lagerstätte, México.**108**

7.2 Microanálisis Ultraestructural y multielemental en la fosilización selectiva de Localidades Lagerstätten en el Cretácico tardío (Turoniano) en Coahuila, México.**110**

7.3 Molecular Taphonomy and Microbial Biomineralization from Múzquiz Late Cretaceous Lagerstätte, México.**113**

**7.4** Synchrotron Radiation applied on Molecular Taphonomy of Cretaceous Marine Lagerstätten of México.**115**

## LISTA DE FIGURAS Y TABLAS

**Fig. 1.** Localización de los sitios fosilíferos tipo Konservat-Lagerstätte en México

**Fig. 2.** Localización de los sitios tipo Múzquiz Lagerstätte, Norte de Coahuila.

**Fig. 3.** Representación esquemática de los depósitos fosilíferos de la Múzquiz Lagerstätte en las sucesiones carbonatadas del Mar Interior Occidental durante el Cretácico.

**Fig. 5.** Sucesiones de Margas a Calizas en los sitios tipo Múzquiz Lagerstätte.

**Fig. 6.** Análisis diagnóstico por Luz UV del material fósil.

**Fig. 7.** Microfotografías con Luz UV de muestras de tejidos blandos.

**Fig. 8.** Microfotografías con Luz UV de secciones transversales de los sedimentos.

**Fig. 9.** Indicadores biogeoquímicos diagnósticos (fingerprints) mediante análisis PIXE de tejidos blandos y sedimentos de las Canteras Palestina y El Pilote.

**Fig. 10.** Indicadores diagnósticos (Fingerprints) de tejidos blandos y sedimentos de las localidades fosilíferas Palestina y El Pilote.

**Fig. 11.** Análisis cuantitativo por XRD del estado cristalino de los tejidos blando.

**Fig. 12.** Análisis comparativo del radio Cuarzo/ Calcita en los sedimentos de Palestina y El Pilote.



**Fig. 13.** Microfotografías SEM de una masa muscular recuperada de la zona abdominal de un Pez *Pachyrhizodus sp.* (MUZ 73), Cantera El Pilote, Eagle Ford.

**Fig. 14.** Microfotografías SEM de la masa muscular recuperada del área abdominal del Pez Clupeido (MUZ 596 A), Cantera Palestina, Austin Chalk.

**Fig. 15.** Microfotografías SEM de un corte interior del tracto digestivo recuperado del Pez *Pachyrhizodus sp.* (MUZ 341), Cantera Palestina, Austin Chalk.

**Fig. 16.** Microfotografías SEM del contenido en el tracto digestivo recuperado del Pez *Pachyrhizodus sp.* (MUZ 341), Cantera Palestina, Fm. Austin Chalk.

**Fig. 17.** Microfotografías SEM de un biofilm microbiano preservado en la masa muscular y sedimento carbonatado contiguo recuperado del Pez *Pachyrhizodus sp.* (MUZ 73), Cantera El Pilote, Eagle Ford.

**Fig. 18.** Microfotografías SEM del análisis ultraestructural comparativo entre ambas localidades: Palestina (derecha) y El Pilote (izquierda).

**Fig.19.** Gráfica de dispersión para los valores EDX de Mg y Ca (wt%) en ambos sedimentos laminados de Palestina y El Pilote.

**Fig. 20.** Secciones transversales orientadas de los sedimentos laminares provenientes de la Cantera Palestina, Austin Chalk.

**Fig. 21.** Análisis de coeficiente de correlación de Pearson (**r**) usando los valores EDX de Mg y Ca para ambos sedimentos de Palestina y El Pilote.

**Fig. 22.** Microfotografías de secciones delgadas de los estratos fosilíferos de El Pilote (Eagle Ford). Así como de Palestina (Austin Chalk).



**Fig. 23.** Microfotografías de secciones delgadas de la Cantera Palestina (Austin Chalk).

**Tabla 1.** Análisis multielemental PIXE de los sedimentos y tejidos blandos provenientes de las localidades tipo Múzquiz-Lagerstätte: Palestina y El Pilote.

**Tabla 2.** Análisis XRD de tejidos blandos y sedimentos de las Canteras Palestina y El Pilote.



## RESUMEN

El presente proyecto de investigación documenta a nivel celular y basándose en el uso de indicadores biogeoquímicos diagnósticos, el estado de conservación de la biota fósil de localidades tipo Lagerstätte en la región de Múzquiz, Coahuila.

De esta manera, en este trabajo se ha realizado un análisis de alta sensibilidad mediante el uso combinado de técnicas analíticas diagnósticas, tales como una análisis microscópico ultraestructural aplicando SEM (Scanning Electron Microscopy), y luz ultravioleta acoplada a microscopia óptica; además de un estudio del estado químico del material fósil mediante XRD (X-Ray Diffraction) aplicando micromuestras, y PIXE (Particle Induced X-ray Emission) mediante el uso de una sonda externa en un acelerador de partículas.

Múzquiz es una Lagerstätte marina característica del Cretácico Tardío (Turoniano-Conaciano) para América del Norte. Este es un depósito de conservación excepcional que está representado por una serie de secuencias laminares restringidas, las cuales forman parte de las sucesiones carbonatadas depositadas a lo largo del Mar Interior Occidental durante el Cretácico.

Las localidades tipo Múzquiz Lagerstätte son una serie de pequeñas canteras en un área de aproximadamente 200 km<sup>2</sup> al norte de Coahuila, entre las cuales se incluye El Rosario, La Mula, Venustiano Carranza, Los Temporales, El Pilote, Jaboncillos, Piedritas y Palestina.

En éstas localidades los fósiles aparecen casi completos, articulados y aplanados en las interfases laminares de ritmitas de piedra caliza. El tejido blando en tres dimensiones y la conservación de órganos internos con características celulares en los peces fósiles de Múzquiz, es un notable registro de fosilización excepcional como un proceso biológico.

Los resultados muestran que la fosilización selectiva en los peces incluye paquetes musculares, piel, agallas, tracto reproductivo y digestivo, melanóforos, así como biopelículas y células microbianas asociadas con la descomposición orgánica.

Probablemente, las películas microbianas y los tejidos blandos se preservaron por un proceso de biomineralización a nivel celular, inducido por reacción espontánea en una solución sobresaturada de agua intersticial. Este proceso es aquí descrito como "El Efecto de semilla cristalina". Esto sugiere que la masa muscular se biomineralizó por acción de compuestos de fosfato y calcita microcristalina disueltos en una solución salina (agua de mar) como el factor precipitante, acompañada de un aumento de la temperatura causado por un enterramiento temprano.

Asimismo, los resultados muestran que la nucleación mineral puede tomar a la materia orgánica como una plantilla de crecimiento de cristales, por lo que, hongos, bacterias y películas microbianas -semejantes a tejidos de araña- se han conservado como moldes y costras cristalinas.

Por otra parte, el estado químico de los tejidos blandos muestra valores PIXE diagnósticos de estroncio (10784 µg/g), azufre (2657µg/ g), y un radio P/Ca de 0.34. Los resultados muestran un aumento de fósforo por un factor de más de cuatro en comparación con los sedimentos debido a un patrón mineral distinto entre la fase orgánica y los sedimentos. Estos resultados muestran señales biogeoquímicas contrastantes entre los sedimentos y tejidos blandos. Estas impurezas químicas pueden

ser herramientas útiles para interpretar la preservación de los tejidos blandos ancestrales, las cuales pueden funcionar como *'fingerprints'* de la fosilización selectiva. Además, se observa una variabilidad en la proporción Mg/ Ca en los sedimentos laminados, esto posiblemente está asociado al depósito episódico de los carbonatos por un aporte de nanoplancton calcáreo ocurriendo a profundidades limitadas en la paleocuenca.

De manera adicional, un compuesto mineral fosfatado, tal como Fluorapatita (FAP), y un compuesto de calcita microcristalina fueron detectados por análisis cuantitativos de difracción de rayos X en la fase cristalina de los tejidos blandos. Los resultados sugieren que los compuestos solubles de FAP y calcita microcristalina están asociados con el ambiente biogeoquímico de los organismos en descomposición, y los restos calcáreos disueltos, podrían ser movilizados por bioreducción de tapetes microbianos en los sedimentos superficiales de aguas muy cálidas y estratificadas en rangos que van desde niveles óxicos a subóxicos, ocurriendo así procesos de pelletización y floculación a pequeña escala de FAP y calcita, los cuales podrían causar la inmovilización de los cadáveres y esqueletos por cementación acelerada en un lodo blando y acuoso de carbonatos.

La interacción de los microbios y minerales puede generar un proceso de reacciones biogeoquímicas que facilita la biomineralización de la materia orgánica mediante un enterramiento en depósitos extremadamente planos. Este proceso está vinculado a la fuerte influencia de un cuerpo de agua estratificado en la que se distinguen capas de diferentes densidades (horizontes separados de temperatura y oxígeno disponible) que evitan la mezcla del agua superficial con el agua del fondo.

La preservación proporciona indicios del paleoambiente, por lo que los fósiles en Múzquiz Lagerstätte se han conservado posiblemente bajo un régimen de sedimentos de aguas pelágicas estratificadas, las cuales formaban parte de las sucesiones carbonatadas de cuencas subtropicales que se podían encontrar a lo largo de los depósitos del Mar Interior Occidental en el Cretácico.

**Palabras clave:** Lagerstätte, Cretácico, Mar Interior Occidental, Múzquiz-Coahuila, Tafonomía Molecular, Biomineralización, Fluorapatita, Calcita Microcristalina, PIXE, Nanoplancton Calcáreo.



## ABSTRACT

This research project documents the preservation of fossil biota at the cellular level from the Lagerstätte-type localities in the northern part of Múzquiz, Coahuila. This work was based on the use of biogeochemical indicators as diagnostic.

Thus, this thesis shows a high-resolution analysis using combined diagnostic analytical techniques such as ultrastructural microscopic analysis using SEM (Scanning Electron Microscopy) and UV-Light coupled to an optic microscopy. Additionally, a study of the chemical status of fossil material by XRD microsampling (X-ray diffraction) and PIXE (Particle Induced X-ray Emission) using an external beam of particle accelerator is included.

Múzquiz is a distinctive Late Cretaceous marine Lagerstätte (Turonian-Coniacian) for North America. This exceptional conservation deposit is represented by a number of restricted laminated sequences that are part of the carbonated successions deposited along the Western Interior Sea basins during the Cretaceous.

The Múzquiz Lagerstätte-type Localities are a series of small quarries in an area of approximately 200 km<sup>2</sup> in northern Coahuila, which includes El Rosario, La Mula, Venustiano Carranza, Los Temporales, El Pilote, Jaboncillos, Piedritas, and Palestina.

In these Lagerstätten sediments, recovered fossils are nearly complete, articulated, and flattened at the laminar interfaces in limestone rhythmites. The soft tissue in three

dimensions and the preservation of internal organs with cellular features in fish fossils from Múzquiz are remarkable records of exceptional fossilization as a biological process.

The results show that selective fossilization in fish includes muscle fibers, skin, gills, digestive and reproductive tracts, melanophores, biofilms, and microbial cells associated with the organic decay. Probably, the microbial biofilms and soft tissues were preserved by a process of biomineralization at the cellular level induced by a spontaneous reaction in a supersaturated solution of interstitial water. This process is described here as "The Crystal seed effect." This suggests that muscle mass was *biomineralized* by phosphate and amorphous calcite dissolved in a saline solution (sea water) as the precipitating factor, accompanied by an increase in temperature caused by an early burial. This biomineralization process almost immediately precedes the longer process of fossilization and can occur within hours or days, disrupting organic degradation.

The results also show that minerals nucleate using organic matter as a template for crystal growth. Therefore, fungi, bacteria, and microbial biofilms (spider-web-like appearance) are preserved as molds and crystalline crust.

Moreover, the chemical signatures of soft tissue detected by PIXE measurements show 10784  $\mu\text{g/g}$  of strontium and 2657  $\mu\text{g/g}$  of sulfur and a P /Ca ratio of 0.34. The results also show an increase of phosphorus by a factor of more than 4 compared with the sediments.

Here two different biogeochemical signatures for both sediment and soft tissue were noted. These chemical impurities can be useful tools to interpret the preservation of ancient soft tissues, which may serve as 'fingerprints' of selective fossilization.



Furthermore, the data show an Mg/Ca correlation in the laminated sediments, which is associated with the episodic deposition of carbonates by a contribution of calcareous nanoplankton that occurs at limited depths.

Additionally, a mineral composite of Fluorapatite (FAP) and a microcrystalline composite of Calcite were detected by quantitative analysis of X-ray diffraction in the crystalline phase of soft tissues. The results suggest that the soluble composites of FAP and amorphous Calcite are associated with the biogeochemical environment of decaying organisms and dissolved calcareous debris. Both composites could be mobilized by bioreduction of microbial mats in the surface sediments of the hot, stratified water mass ranging from oxic to suboxic levels. The pelletization/flocculation of FAP and Calcite occurring on a small-scale may have caused the early immobilization of carcasses and skeletons by cement fringe in a soft, watery carbonate mud.

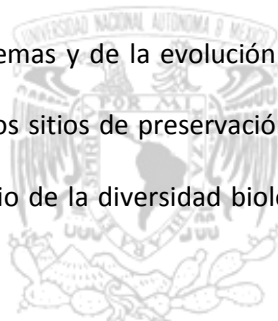
The interaction of microbes and minerals can generate a process of biogeochemical reactions that facilitate biomineralization of organic matter through an extremely flat burial deposit. This process is linked to the strong influence of the stratified water mass.

Exceptional preservation is an indicator for the paleoenvironment, so fossils from Múzquiz Lagerstätte might have been preserved under a sedimentary regime of pelagic, stratified water sediments as part of the carbonate successions of subtropical basins that are found throughout the Western Interior Sea deposits of the Cretaceous.

**Key words:** Lagerstätte, Cretaceous, Western Interior Sea, Múzquiz-Coahuila, Molecular Taphonomy, Biomineralization, Fluorapatite, Microcrystalline Calcite, PIXE, Calcareous Nanoplankton.

## 1. INTRODUCCIÓN

A los depósitos restringidos de material fósil bien preservado y que pueden caracterizar hasta biotas completas excepcionalmente conservadas, se les llama genéricamente Lagerstätten fósiles (*sensu* Seilacher, 1970). Estos afloramientos ricos en fósiles pueden representar periodos sedimentarios cortos en el tiempo geológico, están distribuidos y regulados por eventos mayores dentro de la dinámica geológica de los continentes, del reemplazamiento de los ecosistemas y de la evolución de los organismos. De acuerdo con Selden & Nudds (2004), éstos sitios de preservación excepcional tienen entonces el papel de documentar un episodio de la diversidad biológica en la historia geológica del planeta.



Para Seilacher *et al.* (1985), Brett *et al.* (1991), las Lagerstätten fósiles son consecuencia de condiciones fisicoquímicas excepcionales ocurridas durante el régimen de depósito. Por su fosilización selectiva, muestran una “imagen congelada” de la historia de la vida y por ello son conocidas como “ventanas abiertas que miran hacia el pasado” (Allison & Briggs, 1991). Su atributo principal es ser bancos de fósiles con preservación de tejidos blandos usualmente no encontrados en otros depósitos (Dornbos, 2010). De esta manera destaca la importancia de estas localidades: como indicadores de la evolución de los ecosistemas (Selden & Nudds 2004).

Recientemente, las Lagerstätten son un tema central en los estudios del registro ambiental en nuestro planeta (Goldring, 1985; Bottjer *et al.*, 2002,). Esto en mayor

medida porque se conservan organismos de partes blandas con características celulares y subcelulares, órganos internos, tejidos lábiles intactos, células microbianas asociadas a la degradación orgánica y al metabolismo ambiental, además de la mineralogía original del ambiente de depósito. Es decir, señales primarias poco alteradas por la historia diagenética y la formación litológica (Briggs, 2003, Martill *et al.*, 2011).

A partir de los estudios iniciales de Seilacher *et al.* (1985), Allison (1988), Martill (1990), Barthel *et al.* (1990), Briggs *et al.* (1993), entre otros, se han propuesto múltiples causas posibles que permitieron la formación de este tipo de localidades. Sin embargo, debido al descubrimiento e incremento tanto en número como en una variedad de tipos de Lagerstätten en el mundo y a lo largo de diferentes periodos de tiempo geológico, se hace necesario abordar el estudio de éstas localidades con mayor detalle, de manera integral y considerando tanto las afinidades y las diferencias encontradas entre estas localidades.

Actualmente, la Lagerstätte más estudiada es la localidad Jurásica de Solnhofen, ubicada en la región de Bavaria al norte de Alemania (Barthel *et al.*, 1990). Esta Lagerstätte está compuesta por una serie de afloramientos restringidos de calizas laminares (llamadas *Plattenkalk* o 'calizas tableadas', por su traducción del alemán) ha sido caracterizada como un paleoambiente de tipo estuarino-lagunar.

Del estudio sistemático de las *solnhofener plattenkalk* se ha recuperado un sinnúmero de fósiles con extraordinaria conservación, y a su vez ha generado una información importante sobre la génesis de estas fases laminares (Westphal, 2006). De una manera inicial, Solnhofen se ha convertido en el modelo y en el punto de comparación para explicar el origen y la evolución de otras Lagerstätten distribuidas en diferentes pisos y edades geológicas.

Sin embargo, paradójicamente, el mayor número de estudios llevados a cabo en Solnhofen, tanto sedimentológicos como tafonómicos, ha contribuido en el planteamiento de modelos paleoambientales contradictorios y polarizados (ver Barthel *et al.*, 1990; Keupp, 1994; Viohl, 1994; entre otros), y las más de las veces ha vuelto incierto el estudio del resto de las Lagerstätten que han querido seguir (a veces de manera forzada) el modelo Solnhofen-*Like*. Dada su singularidad y sus características particulares (Barthel *et al.*, 1990), Solnhofen claramente parece no funcionar como un modelo general para entender otros depósitos de conservación excepcional con diferentes litologías, edades, y condiciones de depósito.

### 1.1 Tres Localidades Lagerstätten en México

En México existen al menos tres sitios fosilíferos considerados como localidades Lagerstätten (Riquelme, 2009; Riquelme *et al.*, 2010, Alvarado-Ortega *et al.*, 2010). Los tres son depósitos de conservación (Konservat- Lagerstätten) (Seilacher *et al.*, 1985), los tres son de edad cretácica, y los tres igualmente están asociados a enterramientos tempranos en sedimentos laminares de ambientes marinos (**Figura 1**).

La Cantera Tlayúa es una de las Lagerstätten más notables para Norteamérica, localizada en el municipio de Tepexi de Rodríguez, en el Estado de Puebla. Tlayúa es un banco rico en fósiles de edad del Albiano y que ha sido descrita formalmente como el Miembro Medio de la Formación Tlayúa por Pantoja-Alor (1992). Este depósito de ritmitas de micrita calcárea reúne una importante biota marina con una preservación excepcional que incluye rasgos a nivel celular (Applegate *et al.*, 2006; Alvarado-Ortega *et al.*, 2007, Riquelme *et al.*, 2009).

Aunque el modelo paleoambiental inicialmente interpretado para este sitio fue del tipo Solnhofen-*Like*, esto ha generado controversias, dado que se han propuesto hipótesis paleoambientales contrapuestas para un mismo tipo de conservación (ver Pantoja-Alor, 1992; Espinosa-Arrubarrena & Applegate, 1996; Applegate *et al.*, 2006; Kashiyama *et al.*, 2004; Suarez *et al.*, 2009); además de que no existe un estudio tafonómico detallado disponible hasta la fecha, Tlayúa es, sin embargo, por los atributos de su preservación, la mayor conocida y la más importante de las Lagerstätten en nuestro país.

Múzquiz es otra localidad Lagerstätte en México. Esta representa una vasta región con sistema de afloramientos restringidos de edad Turoniano-Conaciano ubicada en la región norte del Estado de Coahuila, dentro de los municipios de Múzquiz, Ocampo y Acuña. Las rocas en Múzquiz Lagerstätte forman secuencias rítmicas de margas y calizas de espesores variables que han sido interpretadas como secciones de las formaciones Eagle Ford y Austin Chalk (Alvarado-Ortega *et al.*, 2006, Stinnesbeck *et al.*, 2005; Aguilar *et al.*, 2009; Riquelme *et al.*, 2010; entre otros).

En Múzquiz Lagerstätte se observa una rara preservación de invertebrados y vertebrados marinos sobre sedimentos laminares de calizas margosas, así como calizas tisozas (calizas *chalky*). Estos son estratos de calizas fosilíferas débilmente bioturbadas, mayormente compuestos por nanoplancton calcáreo (cocolitos), foraminíferos, calciesferas, peloides, carbonatos amorfos y menor proporción de material siliciclástico, que se intercalan con sedimentos más delgados de margas laminares. Los vertebrados mejor representados son los peces, con preservación de tejidos blandos, además de cocolitos y carpetas microbianas asociadas a la degradación orgánica.

Finalmente, una tercera localidad Lagerstätte es Vallecillo, al norte del Estado de Nuevo León, en el municipio de Vallecillo. Este es un depósito Turoniano de calizas margosas

laminares asociadas con la morfología de los afloramientos, los cuales son restringidos, lenticulares, y que muestran una alternancia rítmica de calizas margosas tabulares. Estos afloramientos han sido descritos como secuencias de la Formación Agua Nueva por Blanco *et al.* (2001). Los mismos autores han interpretado tentativamente que el depósito de estas rocas ocurrió en un paleoambiente pelágico en donde se desarrollaron condiciones de anoxia en la interfase agua-sedimento. Al igual que la anteriores Lagerstätte mencionadas, Vallecillo presenta preservación excepcional de tejidos blandos, la mineralogía original del ambiente de depósito, y el grupo taxonómico mejor representado son los peces (Alvarado-Ortega *et al.*, 2010; Blanco-Piñón, 2003; Ifrim *et al.*, 2008).

## Konservat-Lagerstätten en México



**Fig. 1.** Localización de los sitios fosilíferos tipo Konservat-Lagerstätten en México: 1. **Tlayúa**, Puebla (Formación Tlayúa, Cretácico Temprano), 2. **Vallecillo**, Nuevo León (Formación Agua Nueva, Cretácico Tardío), 3. **Múzquiz**, Coahuila (Grupo Eagle Ford/Austin Chalk, Cretácico Tardío).

Aunque cada una de estas localidades muestra singularidades en cuanto al modo de conservación, y a la abundancia y diversidad de organismos representados; estas localidades comparten rasgos comunes que permiten clasificarlas como verdaderas Lagerstätten (Allison, 1988; Goldring, 1985). Estos rasgos son:

1) los ejemplares fósiles son abundantes y se encuentran articulados (Blanco *et al.*, 2001; Alvarado-Ortega, 2006; Applegate *et al.*, 2007).

2) La diversidad representada es muy amplia e incluye una variedad de taxa entre invertebrados, vertebrados, microfósiles, algas y microbios. Siendo los peces el grupo taxonómico mejor representado, y en un sentido evolutivo, el que muestra un mayor potencial de preservación (Blanco *et al.*, 2003; Alvarado-Ortega, 2007; Riquelme, 2009).

3) En los vertebrados (usualmente peces) y algunos invertebrados los tejidos y restos orgánicos blandos se conservan casi intactos, incluyendo músculos, restos de los tractos digestivo y reproductor, pellet fecales, piel, y fragmentos del sistema circulatorio (Alvarado-Ortega *et al.*, 2007; Riquelme *et al.*, 2009).

4) Los organismos se preservaron en las interfaces laminares de sedimentos carbonatados. La conservación de tejidos blandos y la ritmicidad o condición episódica del régimen sedimentario, caracterizado por una laminación alternada de diferentes generaciones de carbonatos, son precisamente las características compartidas más notables de estas localidades Mexicanas (Riquelme *et al.*, 2010).

Incluso, las dos últimas características arriba mencionadas también son los rasgos comunes más notables en las localidades Konservat-Lagerstätten a nivel global (Allison, 1988; Bottjer *et al.*, 2002, Martill, 2011).



## 1.2 La fosilización selectiva es una clave del Paleoambiente

Los estudios tafonómicos surge a la par que la Paleontología, a la pregunta de qué tipo de organismos se preservan, va emparejada otra pregunta inmediata: ¿por qué se fosilizan? (por ejemplo, ver la *Biostratinomie* propuesta por Weigelt (1927), en Weigelt (1989).

La tafonomía sirve para entender la problemática de los procesos que rigen la preservación orgánica, la cual cubre un amplio rango de organismos y ambientes sedimentarios diversos (Behrensmeyer *et al.*, 2000; Briggs, 2003; Bottjer *et al.*, 2002).

Efremov (1940) propone una de las definiciones generales más aceptadas de la Tafonomía, la plantea como el estudio de los procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren en el ambiente durante la muerte, enterramiento y preservación de los organismos. Recientemente, sin embargo, la Tafonomía puede ser definida como el estudio de la relación entre la materia orgánica y las fases minerales a través del tiempo (Riquelme, 2009).

Lo anterior implica nuevas aproximaciones tanto conceptuales como metodológicas; por ejemplo, introduciendo conceptos como la Biomineralización (Mann, 2001) en los procesos de fosilización acelerada (Martill, 1989; Briggs, 1997); y la idea que la fosilización selectiva es un fenómeno biológico (no únicamente sedimentario) que afecta al material orgánico a pequeña escala, preservando células y moléculas (Logan *et al.*, 1991; Peterson, 2007). Esto además obliga a implementar metodologías con nuevas técnicas analíticas de mayor precisión (Donoghue *et al.*, 2006; Goodwin *et al.*, 2007; Schweitzer *et al.*, 2008; Orr *et al.*, 2009; Riquelme *et al.*, 2009). Con esta clase de

trabajos se amplían los horizontes de la Tafonomía convirtiéndola en una de las ramas de la Paleobiología con mayor crecimiento.

El desarrollo de las técnicas analíticas ha sido particularmente útil en el estudio de las Lagerstätten, ya que normalmente se requiere un enfoque multidisciplinario para su estudio. De hecho, las nuevas metodologías implementadas en la investigación de tejidos blandos fósiles (también conocida como Tafonomía molecular), comprende análisis microscópicos y químicos con técnicas analíticas de alta sensibilidad (Briggs *et al.*, 2005; Raff *et al.*, 2008; Schweitzer *et al.*, 2008). En la actualidad (por citar algunas metodologías novedosas), se desarrollan análisis del material fósil mediante espectrometrías con haces de iones, espectrometría de masas, además de análisis multielementales y espectrometrías basadas en radiación Sincrotrón, entre otras, que se aplican para explorar los aspectos básicos del material biológico preservado en depósitos fósiles (Gupta *et al.*, 2007; Schweitzer *et al.*, 2008; Raff *et al.*, 2008; Riquelme *et al.*, 2009).

A partir de la información generada mediante estas nuevas metodologías se reconocen usualmente dos niveles de estudio fundamentales: uno estructural y otro composicional. En el primer nivel se emplea una combinación de técnicas de microscopía (e.g. óptica, electrónica, de transmisión, entre otras), y que identifican microestructuras de origen biológico (tejidos, células, filamentos, biopolímeros) (Allison y Briggs, 1991; Raff *et al.*, 2008; Schweitzer *et al.*, 2008; Riquelme, 2009); así como ultraestructuras cristalinas propias del sedimento portador de fósiles (Munnecke *et al.*, 2008; Westphal, 2006). En el segundo nivel, mediante análisis del estado químico del material fósil (análisis composicionales), es posible encontrar *Fingerprints* y *Biomarcadores*, los cuales son indicadores diagnósticos muy útiles al trazar escenarios paleoambientales y tafonómicos

(Peterson *et al.*, 2007; Gupta *et al.*, 2007; Riquelme *et al.*, 2009). De esta manera se genera información importante que no se obtiene por otros medios.

Una subsecuente interpretación de esta información estructural y composicional requiere necesariamente entender los procesos de descomposición orgánica, la biología de los organismos, las rutas de la preservación, el ambiente de depósito y la historia diagenética (Allison y Briggs, 1991).

De acuerdo a lo anterior, se puede entender a la fosilización selectiva como una clave del paleoambiente donde ocurre. De este modo, los estudios de Tafonomía molecular en el material fósil tienen un papel crítico al generar hipótesis sobre los escenarios paleoambientales y los procesos de fosilización (Botjer *et al.*, 2002; Riquelme., 2009).

No obstante, una identificación ordenada de los indicadores tafonómicos y paleoambientales en las localidades de conservación excepcional en México aún no ha sido explorada íntegramente. Por lo que los mecanismos de preservación fósil y el paleoambiente de las Lagerstätten arriba mencionadas permanece sin resolver.

Trabajos iniciales en el estudio de la fosilización selectiva en tejidos blandos y tafonomía molecular aplicando métodos de microscopía y análisis químicos han servido de antecedente para el presente trabajo de investigación (Alvarado-Ortega *et al.*, 2007; Riquelme, 2009; Riquelme *et al.*, 2009).

### **1.3 Fingerprints fósiles como indicadores diagnósticos**

En el presente trabajo de investigación se llevó a cabo un análisis no destructivo del material fósil utilizando espectrometría PIXE (Particle Induced X-ray Emission), mediante un haz de protones en la línea de haz externo del 3MV Tándem Pelletron (Ruvalcaba-Sil,

2002), además de otros análisis mediante microscopía óptica con Luz-UV acoplada (Riquelme *et al.*, 2009). De manera complementaria, se realizó un análisis del estado químico de los tejidos blandos fósiles mediante EDX (Energy Dispersive X-ray) usando una microsonda de electrones, y un análisis cuantitativo de las fases minerales mediante XRD (X-Ray Diffraction) aplicando micro-muestras de tejido blando y sustrato. Asimismo, la identificación y el análisis de tejidos blandos y estructuras celulares está basada en el uso de Microscopía electrónica de barrido (SEM), mediante ésta técnica, igualmente, se realizaron análisis ultraestructurales del sustrato laminar.

La rareza y el alto valor científico de los fósiles preservados de manera excepcional usualmente prohíbe el uso de técnicas invasivas o destructivas. Los análisis PIXE pueden detectar elementos específicos asociados al material fósil y su huella paleoquímica particular. La técnica PIXE muestra algunas ventajas particulares, las muestras no requieren de ningún tratamiento previo, se pueden realizar análisis multielementales de alta precisión: con un conteo rápido y gran sensibilidad para detectar elementos traza (Tsuji *et al.*, 2004); se puede llevar a cabo un análisis de ejemplares fósiles completos sin realizar cortes, mapeando puntos específicos o *hot spots* (Riquelme *et al.*, 2009); además PIXE tiene una amplia cobertura elemental en áreas milimétricas y un buen intervalo de detección en  $\mu\text{g/g}$  (Fraser, 1995); y de acuerdo a Johansson *et al.* (1995), puede ser considerada básicamente como una espectroscopía no destructiva.

Adicionalmente, el análisis PIXE puede registrar la concentración de ciertos elementos traza vinculados a una huella química fósil, es decir, a elementos diagnósticos con una importancia biogeoquímica en el proceso de conservación y el paleoambiente, llamados aquí por su utilidad como *fingerprints fósiles*. Estos elementos traza se presentan en concentraciones muy bajas en cualquier material heterogéneo, y porque tienen una

naturaleza de impurezas son marcadores muy útiles para identificar el origen biológico, fluctuaciones ambientales y alteraciones diagenéticas en el material fósil.

Por otra parte, recientemente se han llevado a cabo una serie de estudios orientados en la obtención de imágenes usando luz UV aplicada al material fósil, principalmente en vertebrados colectados en sedimentos de localidades Lagerstätten (Tischlinger y Frey, 2002; Kellner *et al.*, 2010). Tales trabajos se han centrado en el examen morfológico detallado de los ejemplares con un interés taxonómico. En la presente investigación, sin embargo, se utiliza la luz ultravioleta acoplada a un microscopio estereoscópico como una herramienta de diagnóstico para llevar a cabo un examen preliminar del estado de conservación de los ejemplares y tejidos, o permite ampliar el estudio detallado de los ejemplares en combinación con análisis químicos y morfológicos (Riquelme *et al.*, 2009).

La fluorescencia visible inducida por la luz UV por lo general se da más en la materia orgánica y menos en las fases minerales. Esto se observa en los fósiles en función de las estructuras orgánicas preservadas, los restos de tejidos blandos y las diferentes impurezas minerales presentes (por ejemplo: carbonatos y fosfatos biogénicos). Además, la variación del color e intensidad de la fluorescencia inducida por la luz ultravioleta puede estar relacionado con un patrón en la composición química de los fósiles (Riquelme *et al.*, 2009).

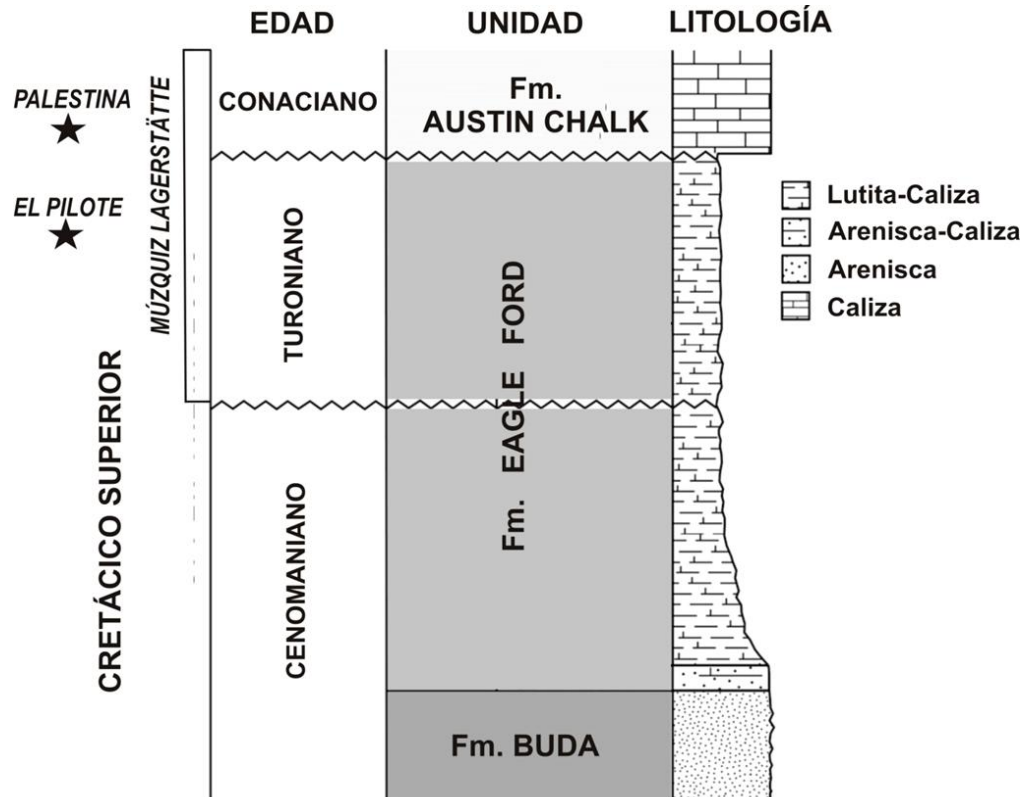
#### **1.4 Localidades tipo Múzquiz Lagerstätte: El Pilote y Palestina.**

Múzquiz Lagerstätte está compuesta por afloramientos restringidos que forman secuencias sedimentarias repetitivas, con un patrón de depósito episódico y aleatorio. Aunque estas localidades comparten una litología similar con alternancia de capas

laminares de margas a calizas que aparentemente provienen de un régimen sedimentario análogo; sin embargo, han sido asignados como secuencias distintas provenientes de las Formaciones Eagle Ford y Austin Chalk (ver Alvarado-Ortega *et al*, 2006; entre otros) (**Figura 2**).

De acuerdo a Eguiluz de Antuñano (2001), en el Cretácico Tardío (Cenomaniano-Turoniano) se depositó una secuencia marina alternada de lutitas, calizas arenosas y areniscas calcáreas con un espesor aproximado de 300 m pertenecientes a la Formación Eagle Ford. Para el Coniaciano-Santoniano Medio un descenso en el nivel del mar incrementó notablemente la formación de carbonatos, disminuyendo a su vez el depósito de lutitas, estas sucesiones carbonatadas con un espesor que varía entre 200 y 300 m, y que presenta intercalaciones de capas delgadas de bentonita, pertenecen a la Formación Austin Chalk.

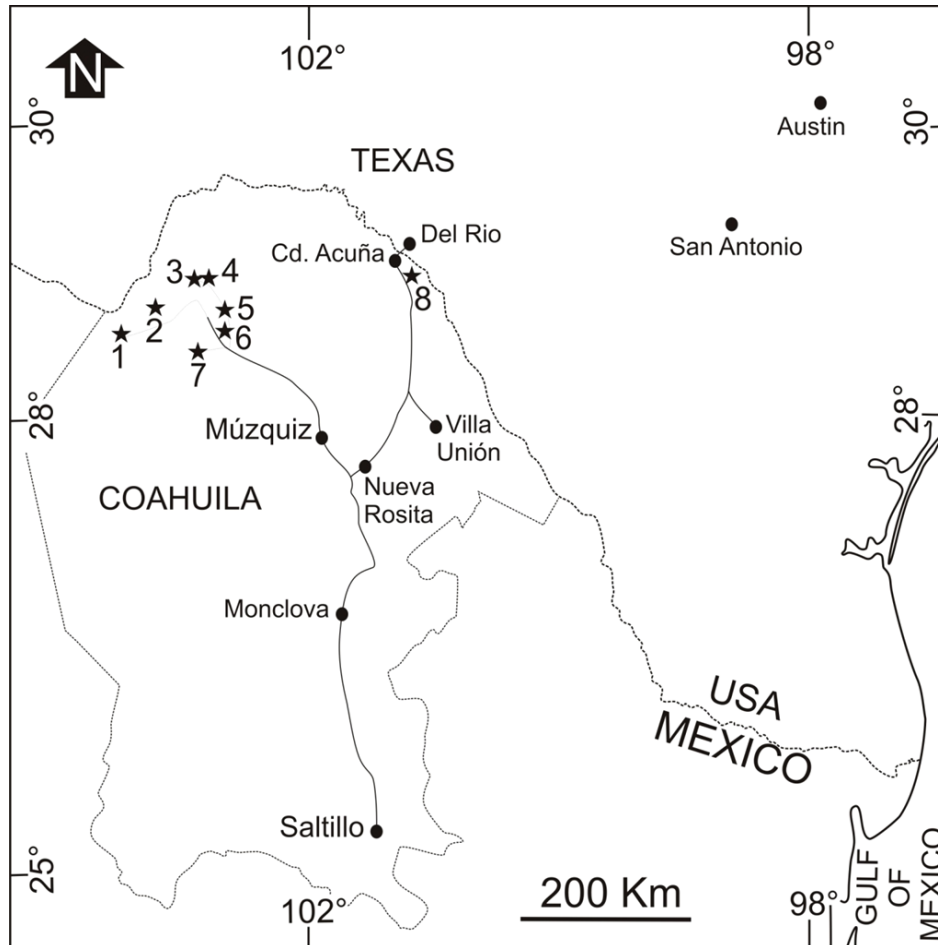
Estas dos unidades geológicas presentes en la región de Múzquiz Lagerstätte se extienden hasta el norte de Texas (Sohl *et al.*, 1991). Estudios en el área de Texas han descrito estas unidades geológicas como el Grupo Eagle Ford y el Grupo Austin Chalk, subdividiéndolas en formaciones reconocibles (ver Paulson, 1968; Smith, 1981; Young, 1985; Larson *et al.*, 1991; Myers, 2010), entre otros. Sin embargo, no existe un trabajo reciente que correlacione estas secciones con las correspondientes unidades encontradas en el norte de Coahuila. En este contexto, los nombres clásicos de Eagle Ford Shale y Austin Chalk son utilizados en la presente investigación para referirse a los distintos estratos fosilíferos presentes en Múzquiz Lagerstätte.



**Fig. 2.** Columna estratigráfica que muestra la probable posición de las localidades tipo Múzquiz Lagerstätte: La Cantera Palestina (Austin Chalk) y La Cantera El Pilote (Eagle Ford Shale). Modificado de Myers (2010), y basado en Sohl *et al.*, (1991), Eguiluz de Antuñano (2001), y Goldhammer *et al.* (1999).

En la región de Múzquiz Lagerstätte los afloramientos consisten en estratos fosilíferos uniformemente laminados de piedra caliza alternando con estratos delgados de margas fisibles y tabulares. Aquí la mayor parte del material siliciclástico forma estratos laminados milimétricos de arcillas tipo bentonita. Esporádicamente, aparecen hidróxidos de hierro expuestos en lentes irregulares y nódulos escamosos, también ocurre limolita no fisible en capas delgadas estratificadas y menos consolidadas.

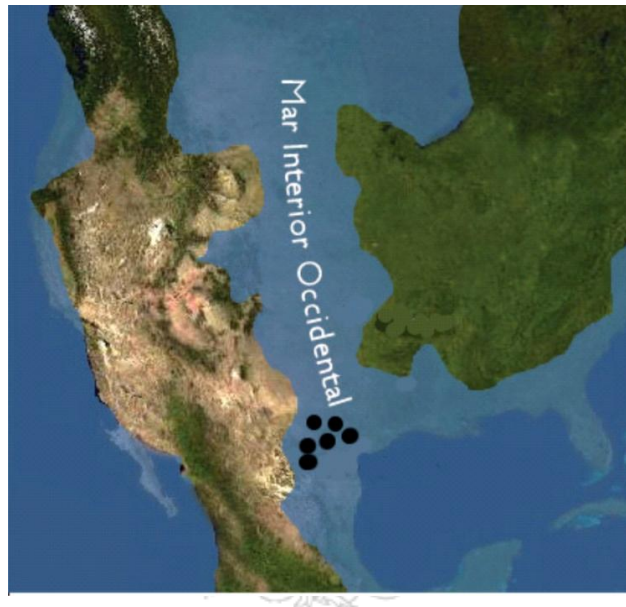




**Fig. 3.** Localización de los sitios tipo Múzquiz Lagerstätte, Norte de Coahuila: 1. Cantera Piedritas; 2. Cantera Jaboncillos; 3. Cantera La Mula; 4. Cantera Venustiano Carranza; 5. Cantera Los Temporales; 6. Cantera El Rosario; 7. Cantera El Pilote; 8. Cantera Palestina.

Una primera aproximación que describe el ambiente sedimentario en estas localidades de conservación se ha obtenido a partir de trabajos bioestratigráficos recientes y de prospección paleontológica, en una serie de pequeñas canteras incluidas en un área de

aproximadamente 200 km<sup>2</sup> al norte de Coahuila, tales como El Rosario (Stinnesbeck *et al.*, 2005); La Mula (Blanco-Piñón & Alvarado-Ortega, 2005); Venustiano Carranza, Los Temporales, El Pilote (Alvarado-Ortega *et al.*, 2006, 2009; Vega *et al.*, 2007), Jaboncillos y Piedritas (González-Barba y Espinosa-Chávez, 2005; Alvarado-Ortega, 2010, *com. pers.*) (Figuras 3 y 4).



**Fig. 4.** Representación esquemática de los depósitos fosilíferos de Múzquiz Lagerstätte en las sucesiones carbonatadas del Mar Interior Occidental durante el Cretácico Tardío.

El paleoambiente asociado a los afloramientos de Múzquiz Lagerstätte ha sido tentativamente interpretado como una cuenca oceánica abierta con una deficiencia de oxígeno y un ambiente hostil en el fondo (ver esto, y comentarios adicionales en Blanco-Piñón y Alvarado-Ortega, 2005; Nyborg *et al.*, 2005; Stinnesbeck *et al.*, 2005; Alvarado-Ortega *et al.*, 2006; Vega *et al.*, 2007). De entre estas localidades de conservación hay dos que destacan por los abundantes rasgos de preservación de tejidos blandos en peces,

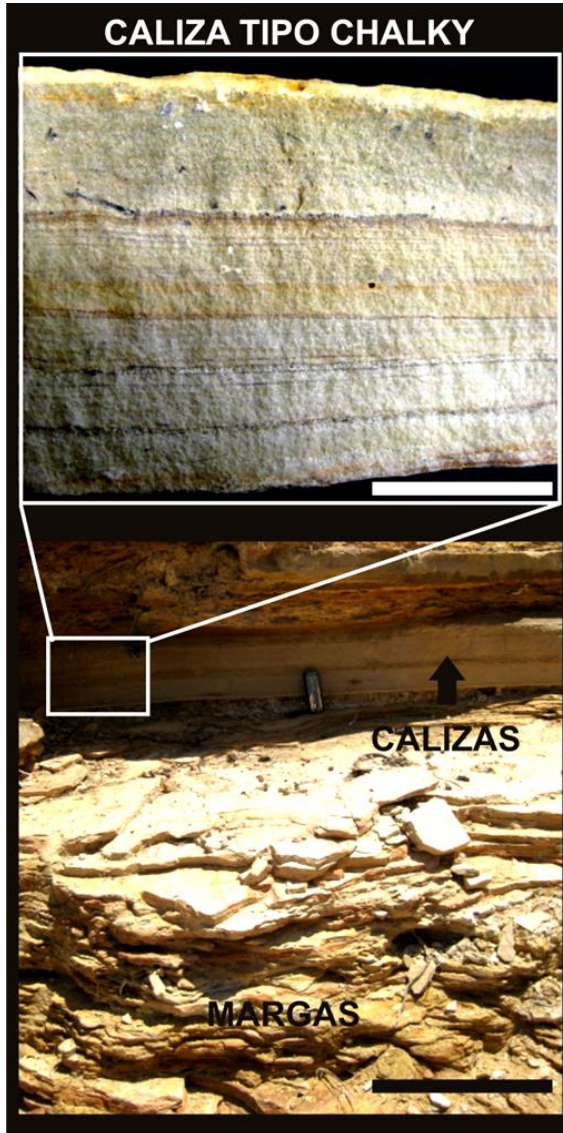
las cuales son la Cantera El Pilote y la Cantera Palestina (Alvarado-Ortega *et al.*, 2006; Riquelme *et al.*, 2010) (**Figuras 2 y 3**).

A pesar de que ambos afloramientos presentan diferencias notorias en sus rasgos tafonómicos, además de variaciones particulares en su litología, muestran un potencial de conservación semejante en los distintos taxones de peces, incluyendo una conservación articulada y en tres dimensiones, esqueletos que presentan remanentes de tejido blando, y evidencias de una degradación orgánica interrumpida.

### **1.5 La Cantera Palestina**

La Cantera Palestina está ubicada a 290 kilómetros al noreste de Múzquiz, en las cercanías de Ciudad Acuña, en la Latitud 29 ° 11 '57"N, Longitud 100 ° 53'20 "W, con una altitud promedio de 300 metros sobre el nivel del mar, y dentro de un área descrita como un afloramiento Coniaciano-Santoniano de la Formación Austin Chalk por Barbosa-Luna *et al.*, 2008a (**Figuras 2 y 3**).

La Cantera Palestina es un afloramiento restringido de calizas laminares, chalky, fosilíferas, intercaladas con margas y lutitas calcáreas grisáceas enriquecidas con carbón orgánico (**Figura 5**), no se conocen los contactos de esta sección porque no afloran en el área. Estos estratos de Palestina están compuestos por una caliza con un chalk abundante de impurezas y capas laminares intercaladas de margas con textura arenosa.



**Fig. 5.** Sucesiones de margas y calizas en los sitios tipo Múzquiz Lagerstätte (barra de escala 40cm). La imagen superior muestra una vista detallada de las calizas laminares tipo 'chalky' de la Cantera Palestina (barra de escala 2cm).

Además, limolita no foliada y sedimentos de óxidos de hierro no consolidados se encuentran intercalados en capas milimétricas entre la caliza chalky. Así como depósitos estratificados de arcilla tipo bentonita expuestos periódicamente en capas de 3 a 5 centímetros en las facies superiores.

Las capas fosilíferas calcáreas en la parte superior de la sección están finamente recristalizadas, con frecuencia contienen invertebrados de concha calcárea bien conservados, tales como bivalvos inocerámidos y gasterópodos. El estudio microscópico de estos estratos muestra además foraminíferos, algas calcáreas y filamentosas, y abundantes cocolitos y nanolitos. En estas capas los restos de vertebrados como los peces están ausentes. En contraste, las calizas laminadas chalky depositadas en la base de la sección muestran abundantes restos de peces articulados con una conservación excepcional de tejidos blandos. Además, el contenido calcáreo de nanoplancton en los sedimentos aumenta de manera notable en estas capas. El conjunto de los peces fósiles provenientes de la Cantera Palestina incluye *Pachyrhizodus* sp. Ichthyodectoidea y Clupeoidea (Alvarado-Ortega, 2010, *com. pers.*).

En un área de 5 kilómetros cercana a la cantera están expuestas lajas parecidas en tamaño, color y textura a las calizas fosilíferas de Palestina en los cortes de caminos y arroyos donde el agua meteórica erosiona los sedimentos del suelo.

A pesar de carecer de un estudio estratigráfico detallado en el área, y basándose en el trabajo de campo reciente, además de las descripciones de la geología del Norte de Coahuila por Barbosa-Luna *et al.* (2008a), así como de los análisis estratigráficos de los afloramientos de la Austin Chalk expuestos en el Sur de Texas, realizado por Young y Marks (1952), Dravis (1980), Smith (1981), las calizas laminares fosilíferas de Palestina pueden ser asignadas a una sección de la Formación Austin Chalk (Coniaciano-Santoniano Temprano) (véase también Hancock y Walaszczyk, 2004; Myers, 2010). De manera semejante, las rocas de Palestina comparten con los estratos descritos en Austin Chalk una litología similar: una microtextura de micrita con cristales neomórficos de calcita, carbonato de calcio amorfo, fragmentos de conchas calcáreas de foraminíferos,

moluscos, ostrácodos, gasterópodos, diversos restos orgánicos marinos y un contenido abundante de cocolitos ( ver Paulson, 1968).

Durante el depósito de la Austin Chalk el nivel del mar subió coincidiendo con la medida máxima en el Mar Interior del Cretácico, cuando el mar formó las grandes plataformas de carbonato del Norte de México y Texas (ver Wright, 1987; Young, 1986; Goldhammer *et al.*, 2001) (**Figura 4**). De acuerdo con Young y Marks (1952), la profundidad del depósito de los estratos de la Austin Chalk pudo ocurrir a unos 250 metros.

### **1.6 La Cantera El Pilote.**

La Cantera El Pilote se encuentra a 140 km al Noroeste de la ciudad de Múzquiz, en la Latitud 102° 29'51"W, Longitud 28° 41'50"N , dentro del área designada por Barbosa-Luna *et al.* (2008b) como un afloramiento de la Formación Eagle Ford (**Figuras 2 y 3**). Las rocas de Palestina son calizas margosas laminares, fosilíferas, recristalizadas, que están intercaladas con margas grises y ocres, además de lutitas calcáreas con alto contenido de carbón orgánico. Igualmente, se encuentran capas milimétricas de limolita no foliable y óxidos de hierro intercaladas en las calizas.

La capas fosilíferas contienen principalmente bivalvos, amonites y peces que muestran características tafonómicas de preservación diferencial. Aunque esta localidad comparte con la Cantera Palestina un estado similar de preservación en los ejemplares de peces. El conjunto de peces fósiles de la cantera de El Pilote incluye teleósteos (Clupeoidea, Pachyrhizodontidae, Ichthyodectiidea, Tselfatiiformes, Enchodontidae, además de abundantes escamas aisladas) y dientes de *Ptychodus* (Alvarado-Ortega *et al.*, 2006).

El afloramiento fosilífero de El Pilote ha sido asignado estratigráficamente a una sección de la Eagle Ford Shale por Alvarado-Ortega *et al.* (2006, 2009), Vega *et al.* (2007). La litología y el ensamble fósil parecen estar correlacionados con los estratos que se observan en las Canteras La Mula y Los Temporales (Turoniano). Por otra parte, Nyborg *et al.* (2005), Stinnesbeck *et al.* (2005) sugieren que El Pilote forma parte de los estratos inferiores de La Cantera El Rosario (Turoniano Tardío). Sin embargo, se requiere un amplio trabajo de campo con análisis estratigráficos formales en el área de Múzquiz.

Los estratos de la Eagle Ford Shale está bien expuestos en el área de la cuenca de Sabinas, estas alternancias de calizas fracturadas y margas de unos 300 m de espesor están esparcidas en varios municipios del Sureste de Coahuila, al igual que en algunos condados del Sur, Centro y Noreste de Texas (Jiang, 1989; Eguiluz de Antuñano, 2001; McNulty, 1966). Eguiluz de Antuñano (2001) describe esta unidad confinada mayormente a la base cristalina de la cuenca de Sabinas; sin embargo, los afloramientos de la parte Norte de la zona de Múzquiz están bien expuestos (Barbosa-Luna *et al.*, 2008b). De acuerdo con Dawson (1997), la unidad rocosa de la Eagle Ford Shale se depositó en un ambiente marino abierto y de poca energía, que ocurrió en un período de transgresión marina. Adicionalmente, Eguiluz de Antuñano (2001) describe el ambiente sedimentario asociado a un medio ambiente nerítico en una profundidad promedio de 200 m.

### **1.7 Paleobiología de Lagerstätten**

El tejido blando preservado en tres dimensiones y la conservación de órganos internos con características celulares de los peces de Múzquiz es probablemente uno de los más

notables registros de fosilización excepcional que puede caracterizarse como un proceso biológico. Esto incluye la preservación de músculos, piel, melanóforos, agallas, tractos reproductivos y digestivos, así como nanoplancton calcáreo y biopelículas con células microbianas claramente asociadas con la descomposición orgánica y la formación del sedimento.

Adicionalmente, la tafonomía de estos tejidos blandos preservados en los peces de Múzquiz permite entender las relaciones que ocurrieron entre estos organismos y su entorno. De esta manera, la paleobiología de Lagerstätten debe incluir la información tafonómica, así como del análisis de facies de los sedimentos fosilíferos.

Inicialmente, el estudio de Lagerstätten se ha centrado claramente en análisis sedimentarios descriptivos (Brett, y Seilacher, 1991). Estudios actuales incluyen análisis de tafonomía, paleoecología y paleogeografía (Botjer *et al.*, 2002; Selden y Nudds, 2004). Además, el estudio de la paleobiología de las localidades Lagerstätten permite establecer relaciones biológicas, sedimentarias y biogeoquímicas que pueden ser utilizadas como elementos comparativos entre distintas localidades Lagerstätten distribuidas en el mundo a diferentes edades geológicas.



## 2. OBJETIVOS

1. Caracterizar mediante análisis microscópicos y biogeoquímicos de alta sensibilidad los rasgos tafonómicos y paleoambientales del material fósil para dos localidades cretácicas de conservación excepcional (Lagerstätten) en el Norte de Coahuila, México: La Cantera El Pilote y la Cantera Palestina. Analizando, interpretando y discutiendo las implicaciones biológicas y fisicoquímicas en los procesos de fosilización, en la caracterización de los ambientes de depósito y en la historia diagenética.

De este modo, aquí se producirá un conjunto de información con un potencial considerable para intentar resolver la problemática de modelos no resueltos de la preservación fósil.

2. Generar información para establecer modelos paleoambientales entre localidades Lagerstätten. Los datos estructurales y químicos sobre los patrones de conservación y depósito en las localidades estudiadas pueden ser empleados como elementos comparativos entre distintas Lagerstätten fósiles distribuidas en diversas regiones del planeta. Esto permitirá profundizar sobre las condiciones y los contextos del estado de preservación de las diferentes Lagerstätten, sus regímenes de depósito (la génesis de las fases laminares), y su significado paleobiológico específico.

3. Desarrollar un metodología no destructiva de análisis del material fósil (Riquelme *et al.*, 2009), enfocada en investigar la preservación selectiva en localidades Lagerstätten. Este trabajo de investigación implementa una variedad de técnicas analíticas

especializadas en el desarrollo de indicadores diagnósticos o *fingerprints fósiles*, se plantea aquí una metodología y una estrategia de investigación cuyo objetivo es continuar con los estudios de la Paleobiología Molecular en el ámbito de la Paleobiología en México.



### 3. MÉTODOS

Siguiendo un criterio de mayor número de caracteres de preservación encontrados: tejidos blandos, rasgos celulares y subcelulares, se han seleccionado ejemplares y muestras provenientes de las canteras fosilíferas de Palestina y El Pilote, a los cuales se les aplicó un análisis puntual mediante microscopía electrónica de barrido (SEM), análisis cuantitativos de las fases minerales a través de rayos-X (XRD), microanálisis de microscopía acoplada con luz ultravioleta y pruebas analíticas con EDX y PIXE. Mediante ésta combinación de técnicas analíticas se documenta el estado de conservación de la biota fósil a nivel celular, y se identifican las firmas biogeoquímicas diagnósticas asociadas a la fosilización y el paleoambiente.

#### 3.1 Ejemplares

Fueron analizados en este estudio los siguientes ejemplares provenientes de los estratos de la Cantera Palestina (Formación Austin Chalk), Municipio de Acuña, Coahuila. MUZ es la abreviación institucional del “Museo Histórico de Múzquiz, A.C.”, donde todo el material analizado se encuentra formalmente resguardado:

Pez *Pachyrhizodus* sp. –MUZ341. Pez *Clupeido* – MUZ602. Pez *Cupleido* – MUZ603. Pez *Cupleido*– MUZ607. Pez *Pachyrhizodus* sp. – MUZ609. Los anteriores son ejemplares casi

completos y articulados que muestran la columna vertebral contraída, paquetes musculares y tracto digestivo bien preservado.

Pez Clupeido – MUZ596 A and B (parte y contraparte), un ejemplar completo y articulado que muestra el tracto digestivo y paquetes musculares bien preservados

De manera semejante, fueron analizados los siguientes ejemplares provenientes de la Formación Eagle Ford, Cantera El Pilote, Municipio de Múzquiz, Coahuila:

Pez *Pachyrhizodus* sp. – MUZ73 (cabeza, y parte abdominal con tracto digestivo y paquetes musculares bien preservados). Pez Clupeido – MUZ602. Pez Clupeido – MUZ325 A and B (parte y contraparte), ejemplares casi completos y articulado que muestran el tracto digestivo fragmentado y paquetes musculares preservados.

En muestras de mano, algunos tejidos específicos y órganos pueden estar intactos, aunque el fósil se preserva aplanado o aparentemente esta preservado en dos dimensiones. Como ha sido notado por Orr *et al.* (2007), usar el término de dos dimensiones es más bien una definición inapropiada en fósiles depositados en sedimentos laminares. Los fósiles de Múzquiz Lagerstätte han sido preservados con un fino espesor vertical al cuerpo y usualmente están bien articulados, por lo cual se observa una preservación en tres dimensiones de las partes blandas, tales como el tracto digestivo. En algunos casos, por ejemplo, la fosilización de la masa muscular muestra delicados detalles y rasgos celulares.

El tracto digestivo y los tejidos musculares fosilizados pueden tener una dureza extrema, de tal forma que muestras de estas partes fueron cuidadosamente extraídas de los ejemplares usando agujas quirúrgicas y equipo microscópico. Posteriormente, estas muestras fueron expuestas a un proceso preliminar de limpieza y desmineralización mediante agua desionizada y fueron parcialmente disueltos por una

solución al 5% de EDTA para su análisis microscópico usando SEM (ver Riquelme *et al.*, 2010).

Todos los ejemplares y muestras usadas para análisis biogeoquímicos (PIXE, XRD, and EDX) no fueron expuestos a solventes o ácidos que digieren carbonatos, esto para evitar contaminación o el depósito de residuos químicos, únicamente fueron colectados y limpiados mediante procesos mecánicos.

### **3.2 Muestras de Tejidos Blandos**

Muestras M7 y M7a: colectadas del ejemplar MUZ596 A y B. Muestras M8, M8a y M8b: todas estas colectadas del ejemplar MUZ341. Muestras M11, M11a, y M11b: todas estas colectadas del ejemplar MUZ73. Muestras M12 y M12b: colectadas del ejemplar MUZ325A.



### **3.3 Muestras de Sedimentos**

Muestra M5: colectada del ejemplar MUZ 596 A. Muestra M6: colectada del ejemplar MUZ341. Muestra M9: colectada del ejemplar MUZ607. Muestra M10 y M13: colectada del ejemplar MUZ73. Muestra M14: colectada del ejemplar MUZ325A.

### **3.4 Experimental**

**Luz UV:** Se aplicó un análisis diagnóstico a los ejemplares basados en el uso de fluorescencia visible inducida por luz UV con rangos de longitud de onda de 365nm y 254

nm, con un tiempo de exposición de <3 minutos y un ángulo de incidencia de entre 70°-90° (Riquelme *et al.*, 2010). La exposición bajo luz UV se llevó a cabo en un cuarto oscuro con el siguiente equipo: Lámpara UVP B100, modelo AP de 365 nm LW (Onda Larga) a 60 Watts (marca UV Black-Ray) ; y otra lámpara 8 W UVP, modelo UVL-56 de 365 nm LW (Onda larga) y 254 nm SW (Onda Corta). Las imágenes se tomaron usando una cámara Digital CCD sin filtros. Adicionalmente, las imágenes de tejidos blandos aislados y muestras de sedimentos fueron adquiridas por un equipo microscópico Edmond E-Zoom 6V video system con cámara Digital CCD EO-3112 sin filtros. Para adquirir un contraste con relieve dinámico se aplicó un rango de 50X a 480X con luz UV oblicua/incidente; y se usó Corel® Photo-Paint®X4 software para procesar las imágenes. De esta manera, se examinaron patrones biogénicos, fases minerales y puntos específicos (hot spots) para subsecuentes análisis químicos en los ejemplares completos, huesos, tejidos blandos, e impresiones anatómicas, así como la roca con marcas de disolución y rasgos sedimentarios característicos (Riquelme *et al.*, 2009).

**PIXE (Particle Induced X-ray Emission Spectrometry):** Las áreas específicas con interés biológico y mineralógico detectadas por luz UV en ejemplares sin preparar se midieron usando PIXE (Johansson *et al.*, 1995) con el haz externo del Acelerador 3MV Tandem Pelletron con un haz de protones de 3MeV de 1 mm a 0.5 mm de diámetro (ver Ruvalcaba, 2008, Riquelme *et al.*, 2009). Los elementos ligeros se detectaron con un Si-PIN Amptek detector (150 eV de resolución para Mn-K $\alpha$ L) con un 1 mm de diámetro, un colimador Ta y un flujo de Helio para mejorar la detección de rayos X de baja energía. Los elementos pesados se detectaron usando un detector LEGe con un filtro de Al con 155 $\mu$ m de espesor. Los espectros PIXE fueron colectados por 5 minutos y el sistema de detección de rayos X fue calibrado con material de referencias estándar del NIST: SRM

2704, SRM 2711, SRM 1880a, SRM 1400, and CaCO<sub>3</sub> Sigma Aldrich de grado analítico. Se usaron los programas de cómputo AXIL code y PIXEINT en las mediciones de concentraciones elementales en porcentaje en peso (wt %) para los siguientes 8 elementos mayores: aluminio (Al), sílice (Si), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), manganeso (Mn), y hierro (Fe). Así como para los siguientes 9 elementos traza en concentraciones mayores a 100 µgr/gr: azufre (S), titanio (Ti), nickel (Ni), cobre (Cu), zinc (Zn), arsénico (As), estroncio (Sr), Itrio (Y), y uranio (U).

**SEM (Scanning Electron Microscopy):** Se examinaron cortes transversales y longitudinales de tejido blando y roca usando un equipo JEOL modelo JSM-6360 LV, y otro equipo adicional JEOL modelo JSM-5310 LV. Las imágenes se adquirieron usando alto vacío en muestras cubiertas con grafito y/o oro-paladio.

**EDX (Energy Dispersive X-Ray spectroscopy):** Se cortaron muestras de roca perpendicularmente al plano laminar de depósito y se montaron orientadas de la base al techo en láminas delgadas con superficies pulidas. Se aplicó un análisis petrográfico seguido de un examen elemental en alto vacío mediante EDX con un voltaje de aceleración de 20 KeV, tiempo de adquisición de 30 a 60 segundos, y se aplicó una corriente elemental de  $2.0 \times 10^{-8}$  Å usando un equipo detector JEOL JXA8900-R. Y la dimensión de cada punto de análisis fue de 500 µm<sup>2</sup> en cada muestra.

**XRD (X-Ray Diffraction):** Se midieron micromuestras de tejido blando y roca portadora de fósiles a temperatura ambiente usando un difractómetro Marca Bruker AXS™ modelo D8 Advance con geometría Bragg-Brentano en configuración  $\theta$ - $\theta$ , radiación Cu-K $\alpha$ , con un filtro de Ni 0.5% Cu-K $\beta$ , en el secundario y un detector de alta velocidad lineal de tiras de silicio (Linxeye) marca Bruker. Se midió la intensidad de difracción como una función del ángulo 2 $\theta$  entre 20° y 110° con un paso 2 $\theta$  de 0.01945° para 53 segundos por punto. Se

refinaron las estructuras cristalinas, la composición de fases y los parámetros de red de los sólidos usando el método Rietveld con el código BGMN win versión 1.8.7 (Taut *et al.*, 1998).





## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Microanálisis diagnóstico por luz UV

Los tejidos calcificados y fosfatizados (huesos y partes blandas) de los ejemplares estudiados tienden a ser más fluorescentes a la exposición de luz UV que los sedimentos minerales; las rocas provenientes de Múzquiz Lagerstätte muestran claramente una opacidad característica que contrasta con los fósiles (**Figura 6**). Esto se observa por un cambio de color asociado con la fluorescencia del fosfato de calcio y calcita (ambos de origen biológico) como fases minerales dominantes en los huesos, escamas, y tejidos blandos.

La **Figura 6.A** muestra el cambio de color bajo la exposición de luz UV en el ejemplar de un pez Clupeido (**MUZ 596 A y B**). Se observa un color blanco saturado asociado con el contenido de fosfato. De igual manera, bajo luz UV la morfología del animal es más notoria, presentando un mayor número de detalles y es más definida que bajo la exposición de luz regular, así como el patrón sedimentario. En contraste, la **Figura 6.B** muestra el ejemplar de un pez Clupeido (**MUZ 607**) expuesto a luz regular (blanca) con la columna vertebral contraída probablemente relacionado con un enterramiento rápido y deshidratación de los sedimentos durante la diagénesis.

La luz UV genera un color blanco saturado fuertemente asociado con el incremento de fosfato en los huesos, mientras que colores rosa, anaranjado y ocre están relacionados a los tejidos blandos con saturación de fosfato (**Figuras 6.A, C, y F**). De manera adicional,

los colores blanco-grisáceo y amarillo pálido están ligados al enriquecimiento de calcio en huesos y escamas, mientras que en los tejidos blandos calcificados se observan colores azules, grises y amarillos (**Figuras 6.A, D, y E**). Igualmente, huesos recristalizados enriquecidos con minerales siliciclásticos son opacos bajo la exposición de luz UV (**Figuras 6.A, y C**).

Generalmente, los ejemplares con una pobre preservación muestran una disolución química observada directamente por luz UV. Por lo tanto, el material fósil recristalizado y no consolidado tiende a ser menos fluorescente, o es notablemente más opaco que los fósiles bien preservados. Esto implica ciertas características tafonómicas relacionadas a los procesos de fosilización, como la intensidad de la recristalización y la disolución química causadas por la alteración diagenética. Es decir, los fósiles con menor alteración diagenética, y por lo tanto, una mejor y mayor de preservación son detectados bajo luz UV.

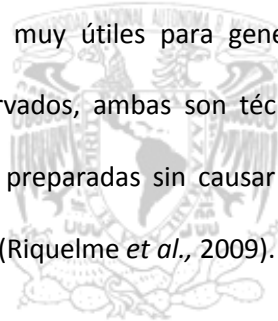
A pesar de ser pobremente visibles bajo luz ambiental o luz blanca, los esqueletos y micromorfologías blandas pueden observarse a detalle por luz UV acoplada con un microscopio. Mediante esta técnica, los tejidos musculares y el tracto digestivo delicadamente preservados muestran características minerales que contrastan con los tejidos duros, tales como escamas y huesos (**ver Figuras 6 y 7**). Además, el material orgánico en el tracto digestivo y los contenidos estomacales embebidos en la matriz rocosa son discernibles usando luz UV en técnicas microscópicas (**Figuras 7.A, B, y D**).

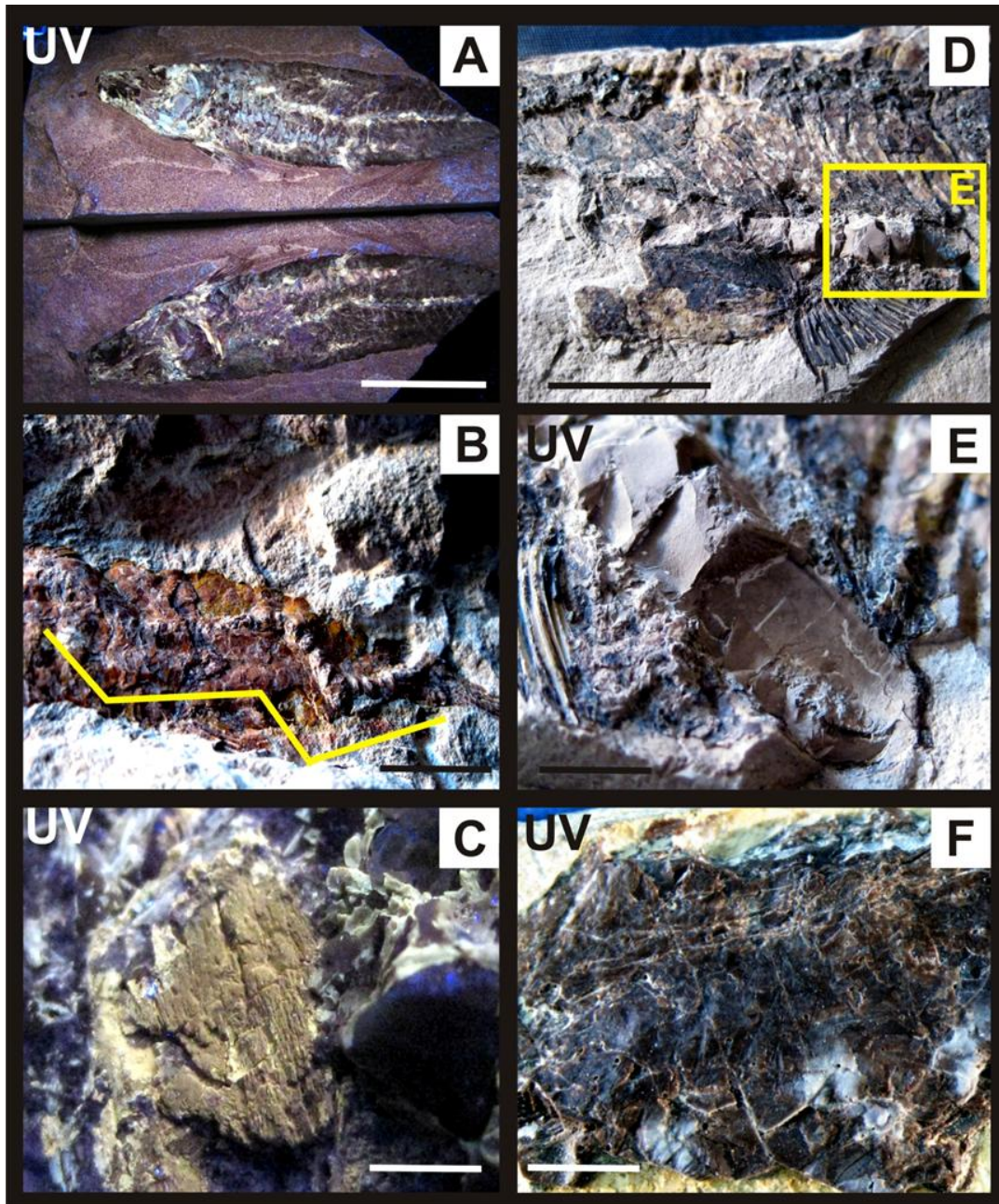
Por otra parte, los sedimentos carbonatados analizados con luz UV muestran el patrón distintivo de un régimen de depósito episódico; además de inclusiones calcáreas, conchas, y pellets fecales en los análisis orientados de secciones delgadas. Esto está

asociado con el aporte sedimentario estacional y la microestratigrafía del depósito **(Figura 8)**.

Los fósiles examinados bajo luz UV fueron estudiados recientemente en vertebrados provenientes de sedimentos de localidades tipo Lagerstätten por Tischlinger y Frey (2002), Hone *et al.* (2010), y Kellner *et al.* (2010), entre otros. Estos trabajos están enfocados en un examen morfológico a detalle de los ejemplares, tal como aparecen en el plano de estratificación de la roca.

La aplicación de técnicas analíticas destructivas suelen evitarse en fósiles excepcionalmente preservados, por su rareza y su alto valor científico. De manera notable, sin embargo, la fluorescencia visible inducida por luz UV complementada con análisis PIXE, son herramientas muy útiles para generar información tafonómica de fósiles excepcionalmente preservados, ambas son técnicas no destructivas, y pueden implementarse en muestras no preparadas sin causar ningún daño o alteración en el material fósil y su matriz rocosa (Riquelme *et al.*, 2009).

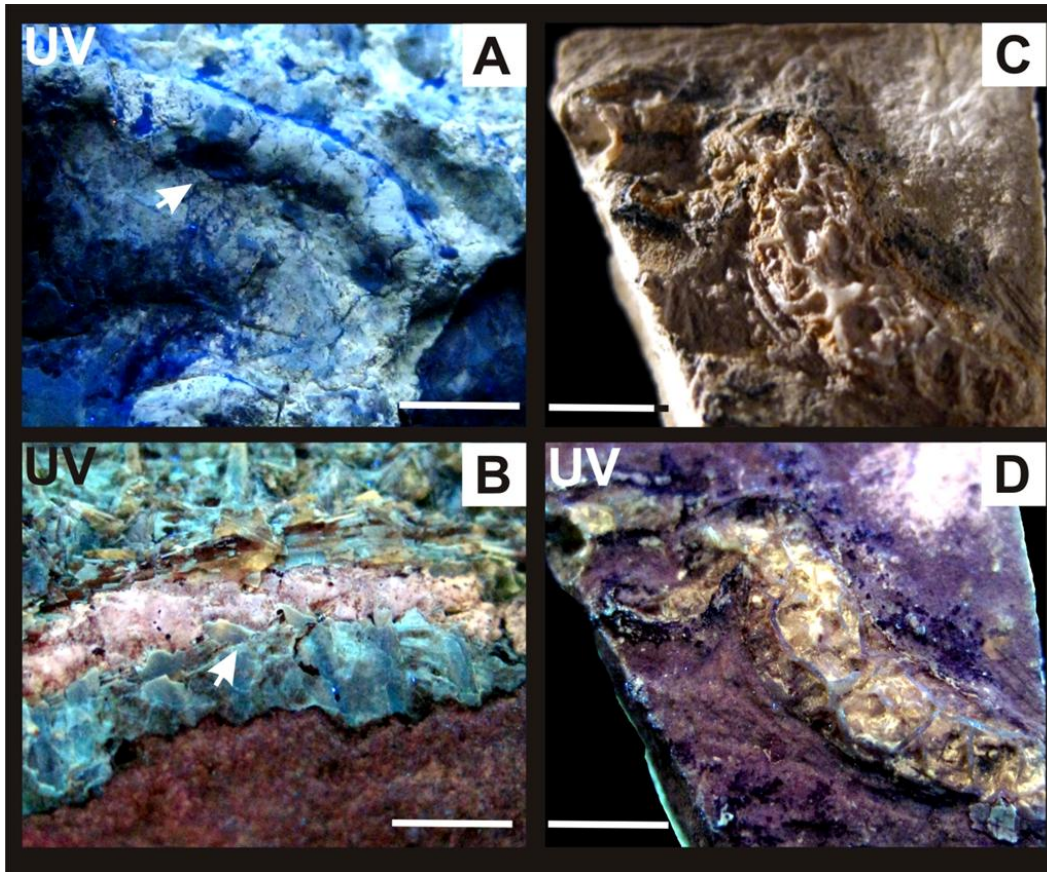




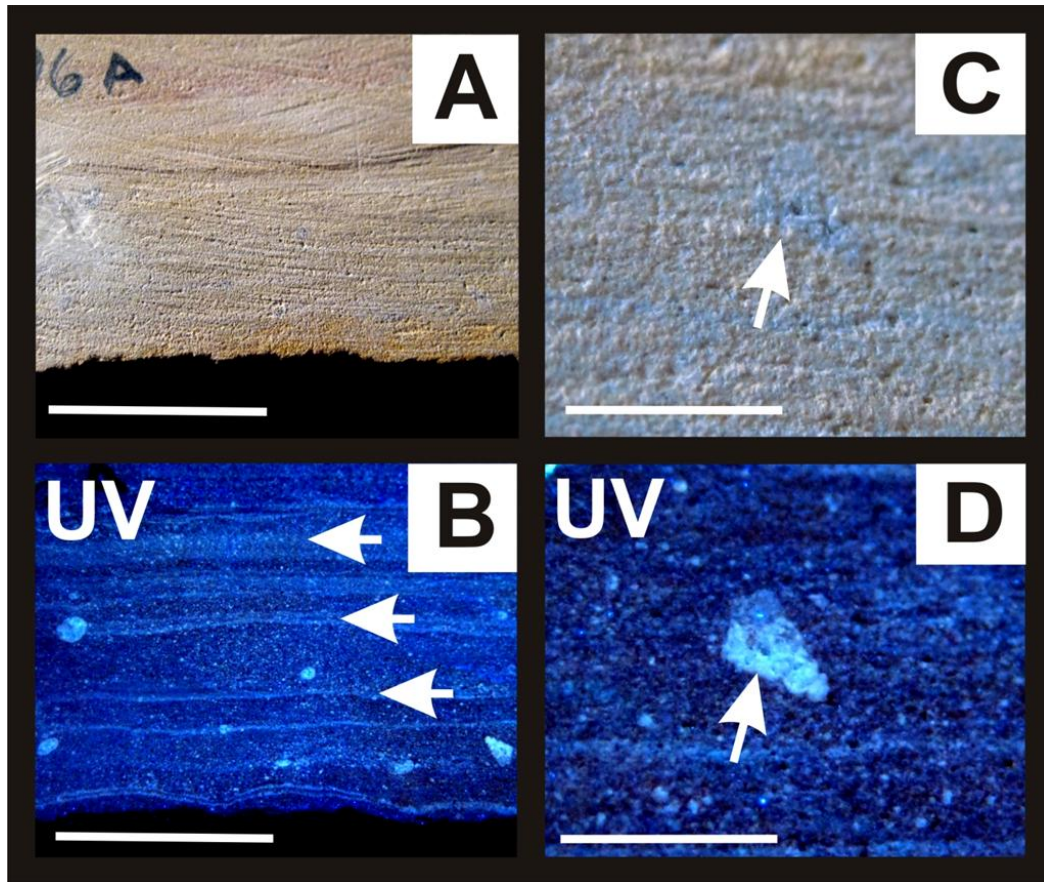
**Fig. 6.** Análisis diagnóstico por luz UV del material fósil. La **Figura A** muestra un Pez Clupeido (MUZ 596 A and B) de la Cantera Palestina, Austin Chalk, luz UV a 365nm (LW) (barra de escala 5 cm); **Figura B:** Pez Clupeido (MUZ 607) de la Cantera Palestina, las líneas amarillas muestran la vértebra colapsada en un patrón característico de zigzag, la imagen se adquirió con luz blanca (barra de escala 2 cm); **Figura C:** Pez Clupeido (MUZ 596 A) de la Cantera Palestina, masa muscular observada bajo luz UV a 365nm (LW) acoplada a un microscopio estereoscópico (barra de escala: 2mm); **Figura D:** Pez



Clupeido (MUZ 602) de la Cantera El Pilote, Eagle Ford (barra de escala: 2mm), la imagen siguiente (**Figura E**) muestra el tracto digestivo bajo la exposición de luz UV a 254nm (SW) acoplada al microscopio (barra de escala: 0.5 mm); **Figura F**: Pez *Pachyrhizodus* sp. (MUZ 73) de la Cantera Pilote, la masa muscular observada bajo la luz UV a 254nm (SW) acoplada al microscopio (barra de escala: 1mm).



**Fig. 7.** Microfotografías con luz UV de muestras de tejidos blandos, **Figura A:** Pez *Pachyrhizodus* sp. (MUZ 609) de la Cantera Palestina, Austin Chalk, imágenes microscópicas con luz UV muestran el tracto digestivo preservado (barra de escala 5mm). **Figura B:** Pez Clupeido (MUZ 603) de la Cantera Palestina, tracto digestivo observado bajo luz UV a exposición de 365nm (LW) (barra de escala 5mm). **Figuras C y D:** Pez *Pachyrhizodus* sp. (MUZ 73) de la Cantera El Pilote, Eagle Ford, análisis comparativo entre diferentes exposiciones: luz regular (blanca) vs. luz UV, donde el tracto digestivo muestra bajo luz UV un claro patrón de depósito de minerales ligado a los procesos de biomineralización (barra de escala 5mm).



**Fig. 8.** Microfotografías con luz UV de secciones transversales de los sedimentos: Muestra proveniente del ejemplar de Pez *Pachyrhizodus* sp. (MUZ 341) de la Cantera Palestina, Austin Chalk, vista seccional de los sedimentos laminare de la caliza tipo chalky que contiene fósiles. En las **Figuras A y B**, note el análisis comparativo entre la Luz regular (blanca) y luz UV a 365nm (LW), asimismo en la **Figura B**, se observa una fina laminación asociada a lodos calcáreos (flechas) que separa la calcita espática enriquecida con microfósiles calcáreos, este patrón está relacionado además a una descarga sedimentaria estacional (barra de escala 3mm). **Figuras C y D**, un análisis comparativo usando luz UV acoplada al microscopio en cortes seccionales de muestras no preparadas exhibe conchas completas, exoesqueletos calcáreos y restos orgánicos (barra de escala 400 $\mu$ m).

#### 4. 2 Mineralogía y Análisis no destructivo por PIXE

La variación de los patrones de color inducidos por luz UV en los ejemplares permitió establecer puntos de análisis específicos (hot spots) para ser medidos por PIXE. Este análisis compara la composición multielemental de tejidos blandos con huesos. Además, PIXE muestra valores elementales contrastantes para ambas localidades Lagerstätten e indicadores químicos diagnósticos para tejidos blandos y sedimento, los resultados se resumen en la **Tabla 1**.

Los hot spots en el tejido blando fueron seleccionados por análisis cuantitativos comparados. Así, se detectó la presencia de elementos diagnósticos como P/Ca, Sr/Ca, and S/Ca, en la masa muscular y el tracto digestivo preservados. Calcio y fósforo muestran una concentración promedio de 21.85 wt%, y 7.62 wt%, respectivamente. Además, se detectó un incremento de estroncio con  $\mu\text{gr/g}$ , y azufre con 2657  $\mu\text{g/g}$  (ver esto y los valores adicionales en la **Figuras 9 y 10**). En contraste, diferentes contenidos de los mismos elementos fueron reportados para los sedimentos: los contenidos promedio de calcio y fósforo fueron de 16.92 wt% y 1.55 wt%, respectivamente, además de un incremento de cobre (391  $\mu\text{g/g}$ ) y zinc (746  $\mu\text{g/g}$ ). Este patrón químico contrastante entre fósil y sedimento puede sugerir que la vía de mineralización fue distinta o la incorporación de iones externos durante los procesos de fosilización. Por ejemplo, el ratio P/Ca promedio en tejidos blandos de 0.34 es notablemente más alto que en los sedimentos con un valor de 0.09. Así como la concentración promedio de fósforo de 1.55  $\mu\text{g/g}$  en sedimentos, contrastando con un valor de 7.63  $\mu\text{g/g}$  en tejidos blandos. Comparando ambos, el factor de incremento del fósforo es mayor que 4. Esto es

consistente con la precipitación y/o recristalización del fósforo en la estructura primaria de los tejidos blandos.

Por otra parte, el intercambio iónico diferencial y los rearrreglos en los sedimentos carbonatados se pueden inferir por las firmas paleoquímicas que incluye Al/P, Si/P, K/P, estos elementos están asociados con material siliciclástico movilizado durante el régimen de depósito (**Figura 9**). Además, se observa un contenido diferencial de Mn/P and Fe/P (**Figura 9**), lo cual puede sugerir un sustitución química de un mineral secundario durante la alteración diagenética. De acuerdo con Boggs (2009), este intercambio mineral y recristalización en sedimentos carbonatados puede concentrar iones externos durante la litificación como el Mn y el Fe, y ambos están ligados a la diagénesis.

Shultze (1989), Martill (1990), Wilby y Martill (1992), Alvarado-Ortega *et al.* (2007) han reportado previamente la preservación de tejidos blandos en peces depositados en sedimentos carbonatados en diferentes edades y niveles estratigráficos. En tales trabajos se ha considerado que el factor regulador de la preservación es la acción de apatitas sedimentarias, como fue señalado por Allison y Briggs (1991), Lucas y Prévôt (1991), Briggs *et al.* (1993), Martill (2003). En la presente investigación, de manera complementaria al análisis PIXE, se aplicó un análisis cuantitativo de XRD en tejidos blandos, que revelan una concentración significativa de calcita microcristalina además de los fosfatos, los resultados se resumen en la **Tabla 2**.

Los resultados muestran la presencia de Fluorapatita (FAP) y Calcita en una fase cristalina de los tejidos blandos en las muestras analizadas provenientes de Múzquiz. No obstante, los tejidos blandos provenientes de ejemplares de los sedimentos de Palestina tienen una fase cristalina con mayor contenido de FAP que de Calcita (**Figura 11.A**). Aunque la



muestra M7a de Palestina exhibe un incremento en cuarzo, el resto de las muestras tienen menores cantidades de cuarzo relacionadas con el grado de cristalinidad.

En contraste, las muestras de El Pilote muestran un elevado contenido de carbonato de calcio en tejidos blandos, y este contenido de calcita es mayor que el de fosfato. Además, muestra un incremento de la cristalinidad en tejidos blandos si se le compara con las muestras de Palestina, lo que se infiere por la cantidad de cuarzo presente en las muestras (**Tabla 2, y Figura 11**).

Lo anterior también está fuertemente asociado con los rasgos de preservación, ejemplares provenientes de los estratos de Palestina muestran una mejor preservación de tejidos blandos y un menor grado de recristalización.

Adicionalmente, la **Tabla 2** muestra que el contenido de carbonato en los sedimentos varía entre 90% a 93.90 % en la calizas margosas (marly) de El Pilote, mientras que en la calizas tisozas (chalky) de Palestina, el contenido de carbonato tiene un rango entre 83.64 % y 86.99%. Además, los resultados que muestran el radio Cuarzo detrítico/ Calcita ( $\text{SiO}_2/\text{CaCO}_3$ ) en ambos sedimentos sugieren un precursor sedimentario diferente de material siliciclástico en los estratos fosilíferos de Palestina con un rango de 0.15 a 0.19, en contraste, los estratos de El Pilote tienen valores de 0.06 a 0.11 (**Figura 12**).

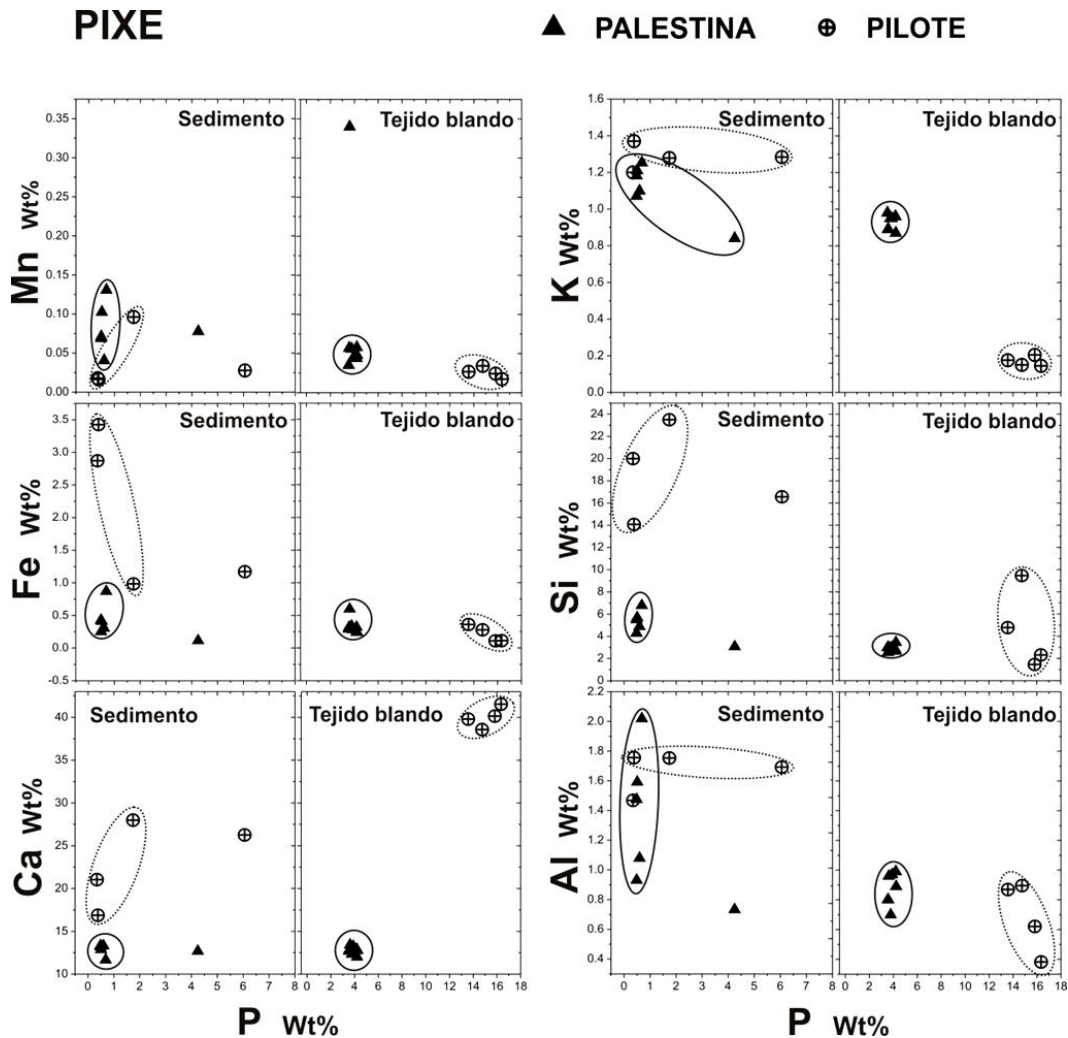
La cristalinidad en los tejidos de los cadáveres posiblemente se incrementa como resultado de la modificación post-enterramiento que expande el tamaño de los cristales de los carbonatos y fosfatos, por ello los huesos y tejidos blandos cambian drásticamente en su fase orgánica. Como sugieren Allison y Briggs (1991), el enterramiento es un factor que puede acelerar el proceso diagenético. De este modo, la nucleación de los fosfatos y la calcita microcristalina en tejidos blandos y huesos puede ocurrir simultáneamente con la degradación orgánica durante la diagénesis temprana. Eventualmente, esta

cristalización mineral autigénica preserva el material orgánico y restringe la descomposición orgánica (Dornbos, 2010). Los resultados obtenidos muestran que las partes blandas en los fósiles de Múzquiz tienen un patrón mineralógico complejo asociada a la preservación por acción de fosfato biogénico y calcita microcristalina en concentraciones variables (ver PIXE y XRD: Tabla 1 y 2).

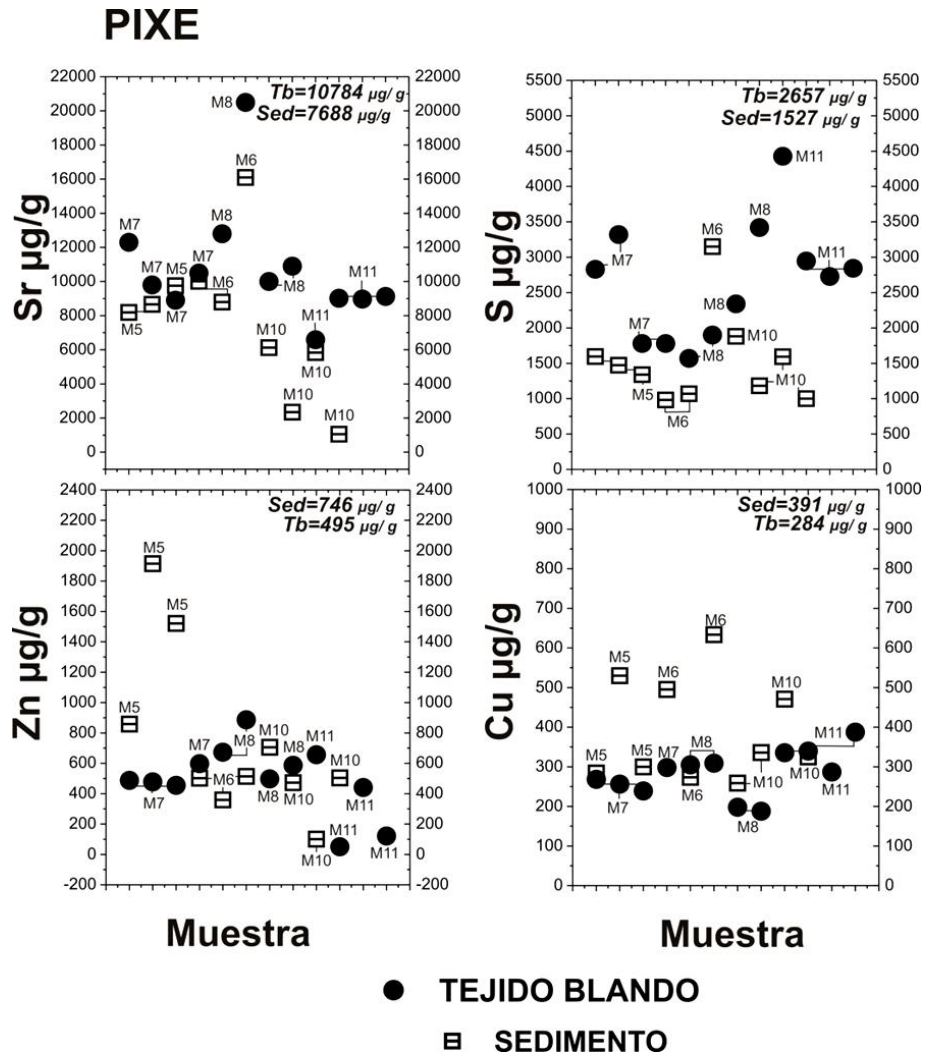
## PIXE

Muestra	Fuente	Punto	Depósito	Al	Si	P	K	Ca	Mn	Fe	S	Ti	Ni	Cu	Zn	As	Sr	Y
				elementos mayores Wt% porcentaje en peso							elementos traza µg/ g							
M5	Sedimento	1	Palestina	0.93	4.29	0.49	1.07	13.34	0.07	0.43	1596	---	501	284	859	14	8192	---
M5	Sedimento	2	Palestina	2.02	6.78	0.69	1.25	11.65	0.13	0.87	1474	595	1274	530	1915	113	8666	---
M5	Sedimento	3	Palestina	1.08	4.88	0.60	1.10	13.32	0.04	0.31	1340	---	604	300	1522	---	9752	---
M6	Sedimento	1	Palestina	1.59	5.69	0.51	1.21	12.87	0.10	0.41	982	137	213	495	502	---	10010	---
M6	Sedimento	2	Palestina	1.48	5.50	0.48	1.18	13.21	0.07	0.25	1071	60	439	273	360	---	8798	---
M6	Sedimento	3	Palestina	0.73	3.07	4.25	0.84	12.69	0.08	0.12	3151	133	198	634	514	---	16098	---
M10	Sedimento	1	Pilote	1.69	16.56	6.05	1.28	26.25	0.03	1.17	1882	857	---	259	706	27	6131	322
M10	Sedimento	2	Pilote	1.47	20.00	0.35	1.20	21.04	0.02	2.87	1182	---	---	336	473	---	2345	---
M10	Sedimento	3	Pilote	1.75	23.50	1.74	1.28	27.98	0.10	0.98	1593	---	---	471	101	---	5835	201
M10	Sedimento	4	Pilote	1.76	14.08	0.38	1.37	16.88	0.02	3.43	1000	---	---	325	504	34	1052	38
M7	Tejido Blando	1	Palestina	0.96	3.01	3.62	0.89	13.42	0.34	0.60	2830	190	534	268	488	---	12300	---
M7	Tejido Blando	2	Palestina	0.80	2.98	3.54	0.98	12.78	0.04	0.29	3320	240	533	256	478	---	9800	---
M7	Tejido Blando	3	Palestina	0.89	3.45	4.23	0.87	12.76	0.05	0.24	1780	320	239	239	455	98	8900	97
M7	Tejido Blando	4	Palestina	0.99	2.80	4.19	0.96	12.89	0.04	0.32	1780	280	347	298	598	78	10500	---
M8	Tejido Blando	1	Palestina	0.70	2.90	3.78	0.95	12.34	0.06	0.34	1570	340	389	305	673	65	12800	---
M8	Tejido Blando	2	Palestina	0.80	2.55	3.58	0.89	12.68	0.06	0.32	1900	290	498	309	887	---	20500	---
M8	Tejido Blando	3	Palestina	0.99	2.65	4.21	0.96	12.01	0.06	0.25	2340	320	299	198	498	---	10000	145
M8	Tejido Blando	4	Palestina	0.97	2.99	3.89	0.95	13.24	0.04	0.28	3420	410	344	188	587	---	10900	---
M11	Tejido Blando	1	Pilote	0.87	4.78	13.57	0.18	39.80	0.03	0.36	4428	1103	---	335	657	31	6590	367
M11	Tejido Blando	2	Pilote	0.90	9.46	14.74	0.15	38.57	0.03	0.28	2946	---	---	339	51	---	9020	457
M11	Tejido Blando	3	Pilote	0.62	1.45	15.81	0.20	40.15	0.02	0.11	2728	---	---	287	441	11	8975	1720
M11	Tejido Blando	4	Pilote	0.38	2.31	16.34	0.15	41.55	0.02	0.11	2844	---	---	388	122	23	9128	1757

**Tabla 1.** Análisis multielemental PIXE de los sedimentos y tejidos blandos provenientes de las localidades Múzquiz Lagerstätte: Palestina y El Pilote. Los valores para elementos mayores están expresados en wt%, y para elementos traza en µg/ g.



**Fig. 9.** Indicadores biogeoquímicos diagnósticos (fingerprints) mediante análisis PIXE de tejidos blandos y sedimentos de las Canteras Palestina y El Pilote. Se observan valores contrastantes de P/Ca asociados con el contenido de fosfato disuelto. Así como, Al, Si, y K que están ligados a fuentes siliciclásticas o no carbonatadas. Además, el Fe and Mn incrementa probablemente a procesos diagenéticos. Los valores están expresados en wt% y las incertidumbres son tan largas como el símbolo.



**Fig. 10.** Indicadores diagnósticos (Fingerprints) de tejidos blandos y sedimentos de las localidades fosilíferas Palestina y El Pilote. Los valores promedio de Estroncio y Azufre muestran un incremento en los tejidos blandos comparado con los sedimentos; mientras que el Zinc y Cobre decrece. Los valores adquiridos con PIXE están expresados en  $\mu\text{g/g}$  y las incertidumbres son tan largas como el símbolo. Sed: sedimentos; Tb: tejidos blandos.

## XRD Wt %

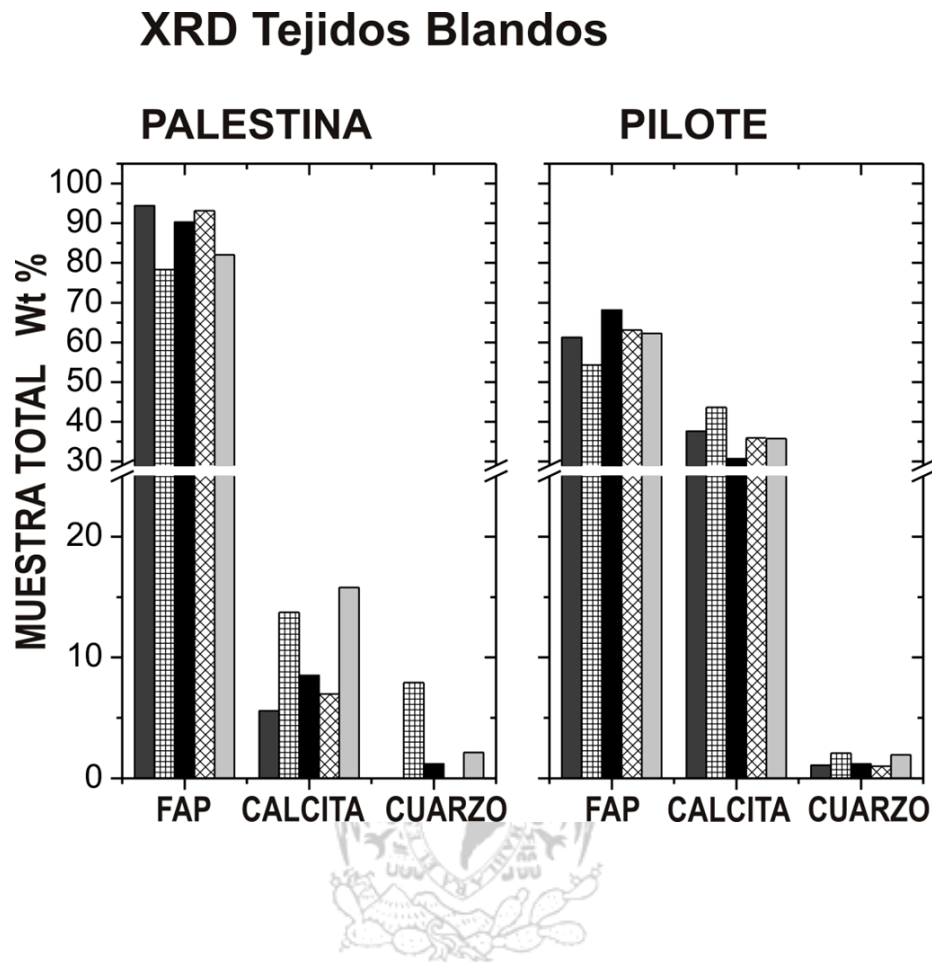
### A. Tejidos Blandos

Muestra	Depósito	FAP	Calcita	Cuarzo
M7	<i>Palestina</i>	94.42	5.58	-
M7a	<i>Palestina</i>	78.34	13.73	7.93
M8	<i>Palestina</i>	90.30	8.50	1.20
M8a	<i>Palestina</i>	93.13	6.97	-
M8b	<i>Palestina</i>	82.05	6.97	-
M11	<i>Pilote</i>	61.26	37.65	1.09
M11a	<i>Pilote</i>	54.30	43.61	2.09
M11b	<i>Pilote</i>	68.10	30.70	1.20
M12	<i>Pilote</i>	63.10	35.90	1.00
M12b	<i>Pilote</i>	62.25	35.80	1.95

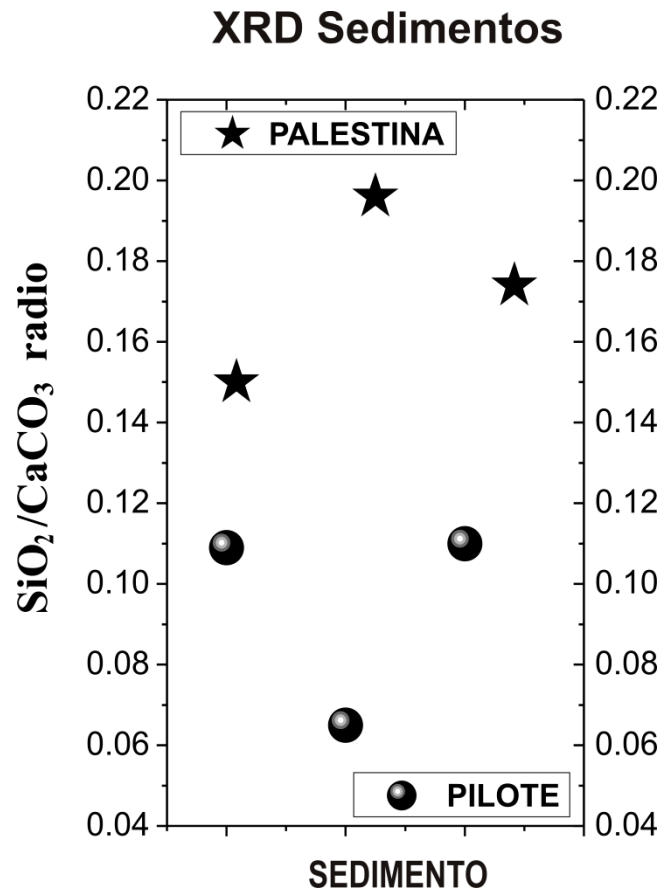
### B. Sedimento

Muestra	Depósito	Calcita	Cuarzo	radio SiO <sub>2</sub> /CaCO <sub>3</sub>
M5	<i>Palestina</i>	86.99	13.01	0.150
M6	<i>Palestina</i>	83.64	16.36	0.196
M9	<i>Palestina</i>	85.20	14.80	0.174
M10	<i>Pilote</i>	90.17	9.83	0.109
M13	<i>Pilote</i>	93.90	6.10	0.065
M14	<i>Pilote</i>	90.08	9.92	0.110

**Tabla 2.** Análisis cuantitativo por XRD de tejidos blandos y sedimentos de las Canteras Palestina y El Pilote: se detectan valores contrastantes para ambas muestras: tejido blando y sedimentos, la cantidad de Fluorapatita (FAP) en tejidos blandos varía entre ambas localidades (**A**), así como el contenido calcita en los sedimentos (**B**).



**Fig. 11.** Análisis cuantitativo por XRD del estado cristalino de los tejidos blandos: se observa una mayor concentración de Fluorapatita (FAP) en la Cantera Palestina; en contraste, los tejidos blandos de la Cantera El Pilote revelan una concentración significativa de calcita microcristalina casi en proporción con la FAP.



**Fig. 12.** Análisis comparativo del radio cuarzo/ calcita en los sedimentos de Palestina y El Pilote. La distribución contrastante de la proporción cuarzo/calcita en ambas localidades sugiere una fuente sedimentaria con un régimen de depósito variable. Los valores están expresados en wt %.

### 4.3 Microanálisis de tejidos blandos y Biomineralización

La microscopía electrónica revela el estado de conservación de los tejidos musculares con bandas fibrilares y características subcelulares, tales como aéreas vasculares y estructuras preservadas parecidas a mitocondrias en muestras de El Pilote (**Figura 13**). Una de las muestras de músculo recuperada de la zona abdominal (Cantera Palestina) revela estructuras biogénicas asociadas con tejido epitelial (**ver Figuras 14.A y B**). En estas muestras también se observan películas microbianas (parecidas a redes esferoidales) dentro de los vasos vasculares (**Figuras 14.C y D**). Estas estructuras subcelulares preservadas muestran evidencias de procesos de biomineralización y de descomposición orgánica temprana. Briggs (1997) sugiere que en este tipo de preservación están implicadas reacciones biogeoquímicas que ocurren en horas o pocos días después de la muerte de los organismos, lo cual inhibe la descomposición orgánica. En la presente investigación, este tipo de fenómeno en las fibras musculares de los peces de Múzquiz muestra una conservación estructural como si fuera una imagen congelada en el tiempo (**Figuras 13 y 14**).

No obstante, el proceso de preservación fósil de tejidos blandos en las Lagerstätten marinas no está entendido del todo. Martill (1989) sugiere un mecanismo de conservación al que llamó “Efecto Medusa”, el cual se define como una rápida litificación. Aparentemente, esto parece ser funcionar únicamente a micro-escala y a un nivel celular, aunque el mecanismo de petrificación permanece todavía inexplicable. Briggs (2003) concluye que la preservación por fosfatos está ligada a la cristalinidad (tamaño y forma de los cristalitos), además del régimen sedimentario. De manera adicional, Dornbos (2010) considera que la fosfatización acelerada es controlada por un



ambiente microbiano a profundidades limitadas en los sedimentos del piso marino, en donde las células microbianas pueden servir como puntos de nucleación de los fosfatos. Pero tal transformación química y estructural en la conservación de material orgánico en un periodo de tiempo corto -que va de unas horas a pocos días- involucra principalmente procesos de biomineralización (Mann, 2001, Weiner, 2008), más que largos procesos de fosilización. Los trabajos de Weiner & Dove (2003), Qiu & Orme (2008), han demostrado que la biomineralización de estructuras celulares y subcelulares ocurre a un nivel molecular inducido por reacción espontánea en una solución supersaturada. También, como ha sido documentado por De Yoreo & Vekilov (2003), y Williams (2008), la biomineralización comienza como un evento de nucleación mineral y el crecimiento cristalino continúa usando la materia orgánica como una plantilla o molde (ver **Figura 15**). De acuerdo con la naturaleza de las biomoléculas y de la solución mineral presente, ésta plantilla orgánica puede conservar o perder detalles fieles al morfotipo original (Mann, 2001). Por lo cual, la preservación de tejidos blandos de Múzquiz Lagerstätte interpretada como un proceso de biomineralización sugiere que las células musculares fueron finamente cristalizadas por un incremento de temperatura durante la diagénesis temprana y por una elevada concentración de fosfatos y carbonato en el agua del poro sedimentario, con una solución salina (agua de mar) como el factor precipitante cristalino. A partir de esto, aquí se sugiere el término de “Efecto de semilla cristalina”, con el cual se describe de mejor manera esta biomineralización de tejidos blandos a un nivel celular y subcelular durante el enterramiento temprano. La precipitación mineral en este sistema supersaturado induce el crecimiento cristalino en las células y una rápida biomineralización de tejidos blandos, biofilms, y microbios; este

proceso igualmente ha sido sugerido por otros autores como Frankel y Bazylinsk (2003).

De acuerdo a lo anterior, el material orgánico es **biomineralizado** como resultado de su propia constitución molecular dentro de un medio químicamente reactivo (Weiner & Dove, 2003). El término de Semilla Cristalina es muy conocido y ampliamente tratado en la investigación de la Biomineralización (e.g. Mann, 2001; De Yoreo & Vekilov, 2003; Weiner & Dove, 2003; Weiner, 2008; Williams, 2008), entre otros.

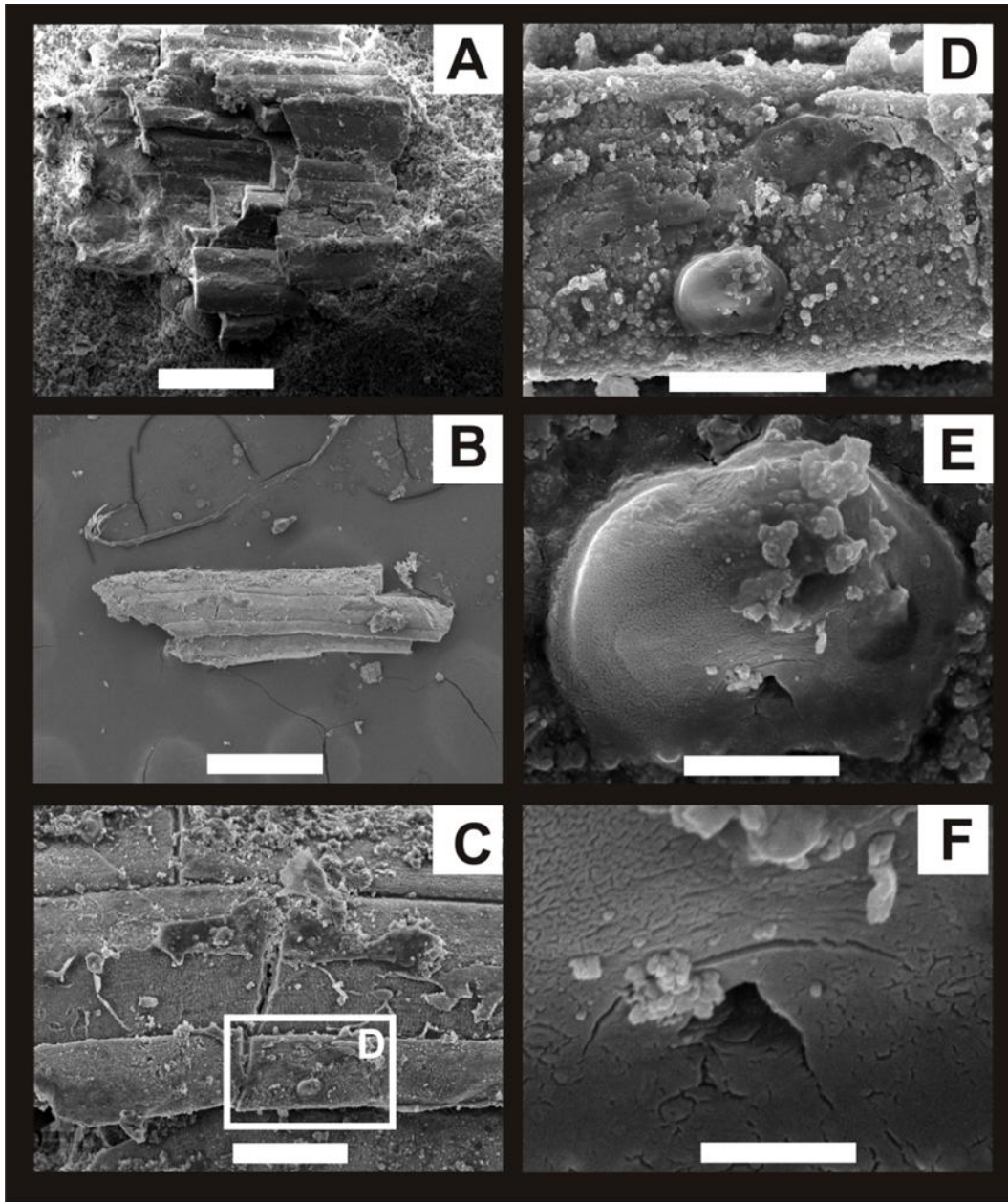
De manera semejante, el microanálisis por SEM muestra evidencias de que el “Efecto de semilla cristalina” ocurrió durante la biomineralización de los fósiles de Múzquiz. Las observaciones se hicieron en micro-cortes seccionales dentro del tracto digestivo de los peces fósiles. **Las Figuras 15.A y B** muestran el crecimiento cristalino sobre la materia orgánica que juega el rol de plantillas y moldes; los cristales nuclean orientados a lo largo de filamentos biogénicos, probablemente de origen microbiano.

Por otra parte, la **Figura 15.C** muestra agregados capilares de carbonatos pseudomorfos creciendo entre estructuras biogénicas, probablemente asociadas a un microambiente reductor (Boggs, 2009).

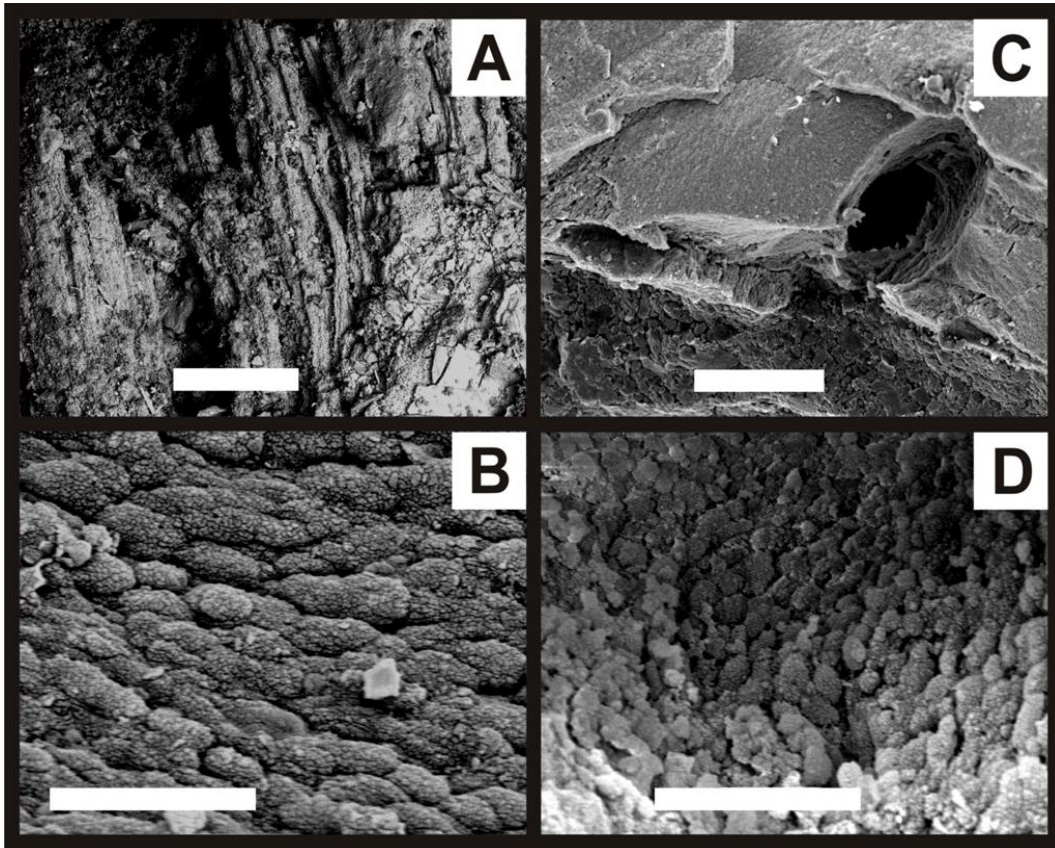
Los análisis aplicados al material orgánico encontrado en el tracto digestivo de los fósiles de Múzquiz revela la presencia de una cantidad importante de nanoplancton calcáreo: cocolitos y nanolitos (**Figura 16**), el cual es también el mayor componente de los sedimentos asociados. Por otro lado, como se muestra en las **Figuras 16.B y C**, estos microfósiles dentro del tracto digestivo muestran un alto grado de preservación (e.g. una cocósfera preservada intacta) comparados con los encontrados en el sedimento. Esto sugiere la existencia de microambientes distintos dentro y fuera de los tractos digestivos.

Adicionalmente, los tejidos blandos fósiles representan una fuente importante de preservación microbiana; biofilms bacterianos asociados con tejidos blandos han sido reportados en vertebrados e invertebrados provenientes de localidades Lagerstätten por Wilby *et al.* (1996), Briggs *et al.* (2005), Liebig (2003), entre otros. Los tejidos blandos recuperados de los sedimentos marinos de Múzquiz están fuertemente relacionados con películas microbianas preservadas (**Figura 17**). Análisis basados en microscopía electrónica (SEM) muestran imágenes detalladas del tamaño y morfotipo de hongos y bacterias. Además, una red que aparece entre los microbios ha sido interpretada como orgánica por su tamaño, y porque muestra una apariencia de una telaraña característica (**Figuras 17.B y C**). Esta presenta los rasgos del biopolímero secretado por las bacterias para fijarse a un sustrato orgánico o inorgánico, el tamaño (escala) y el patrón son consistentes con el EPS (Extracellular Polymer Substance, por sus siglas en inglés) (Liebig, 2003).

A mayores magnificaciones, las células bacterianas y fúngicas se distinguen fácilmente y muestran además que están relacionadas con el biofilm mineralizado que cubre las fibras musculares (**Figuras 17.B y C; 17.E y F**). Las células bacterianas se componen de morfotipos cocoides y baciliformes, mientras que las células fúngicas están compuestas de hifas largas.

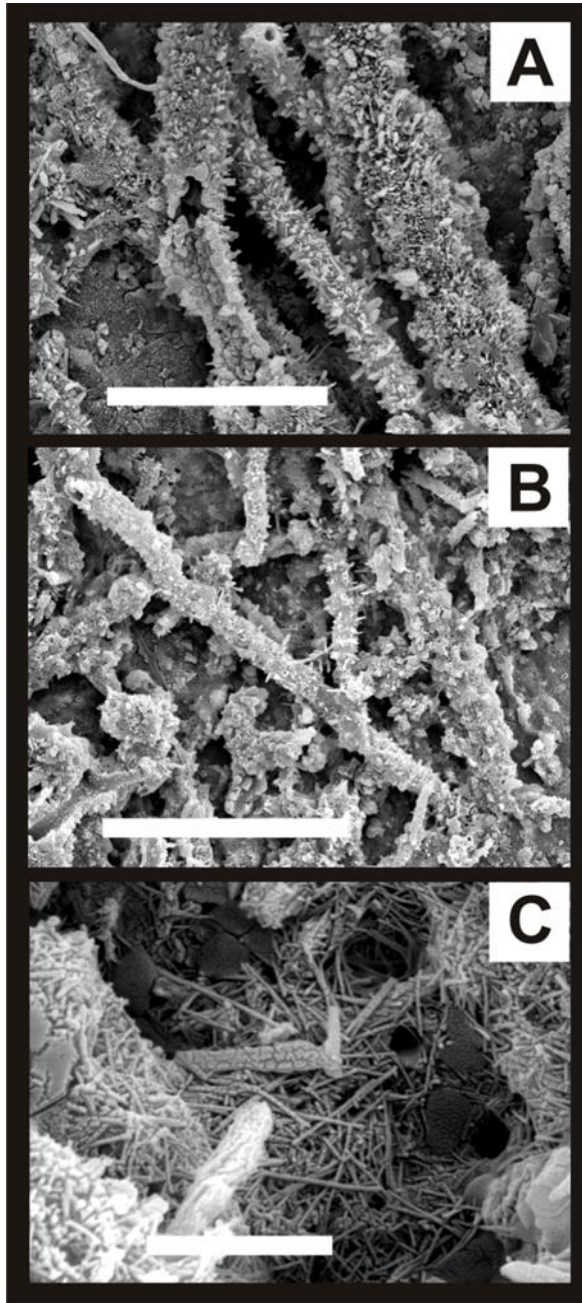


**Fig. 13.** Microfotografías SEM de la masa muscular recuperada de la zona abdominal de un Pez *Pachyrhizodus* sp. (MUZ 73), Cantera El Pilote, Eagle Ford Shale. **La Figura A:** paquete muscular (barra de escala 400  $\mu\text{m}$ ). **Figura B:** fibras musculares aisladas por disolución parcial de carbonatos usando EDTA (barra de escala 200  $\mu\text{m}$ ). **Figuras C, D, y E:** Estructuras biogénicas identificadas en una larga célula muscular, probablemente una mitocondria (barra de escala C: 50  $\mu\text{m}$ ; D: 20  $\mu\text{m}$ ; E: 5  $\mu\text{m}$ ), **Figura F:** un punto de colapso en la estructura celular parecida a Mitocondria que se asocia a la degradación orgánica (barra de escala 2  $\mu\text{m}$ ).

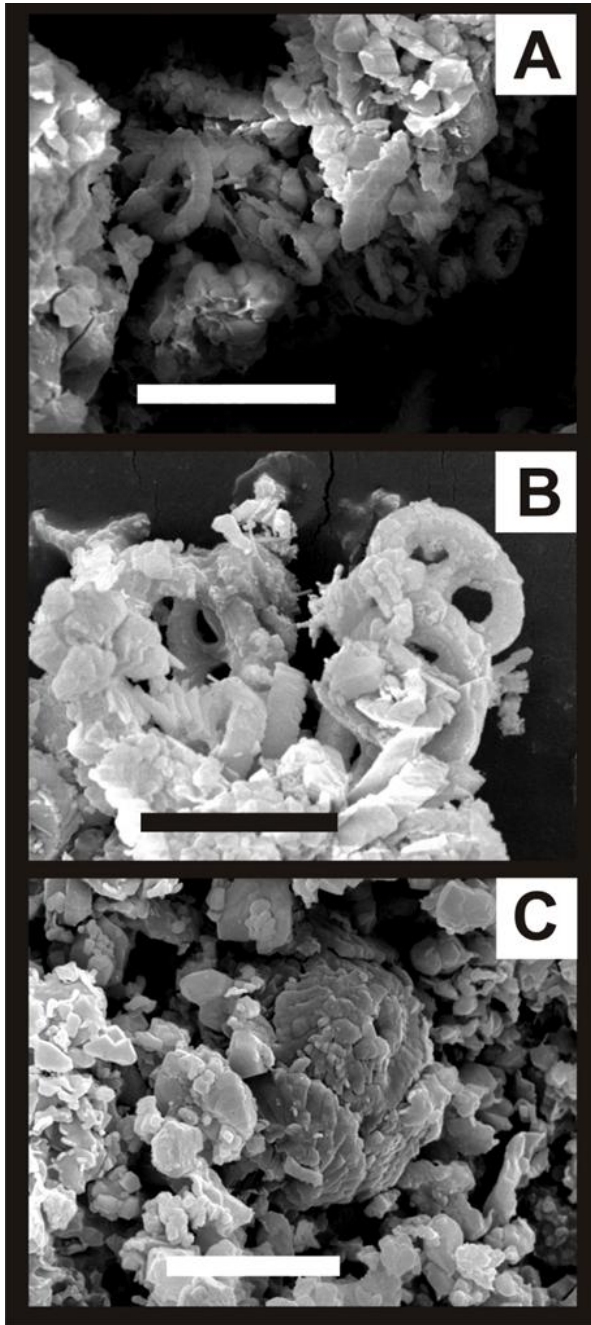


**Fig. 14.** Microfotografías SEM de la masa muscular recuperada del área abdominal del Pez Clupeido (MUZ 596 A), Cantera Palestina, Austin Chalk: **Figura A:** paquete de fibras musculares (barra de escala 400  $\mu\text{m}$ ). **Figura B:** Micromorfología de origen biológico ligada al tejido epitelial expuesto entre la masa muscular (barra de escala 200  $\mu\text{m}$ ). **Figura C:** vaso vascular en la fibra muscular (barra de escala 400  $\mu\text{m}$ ). **Figura D:** Biofilm bacteriano con un patrón parecido a una red esferulítica dentro del vaso vascular anterior (barra de escala 5  $\mu\text{m}$ ).

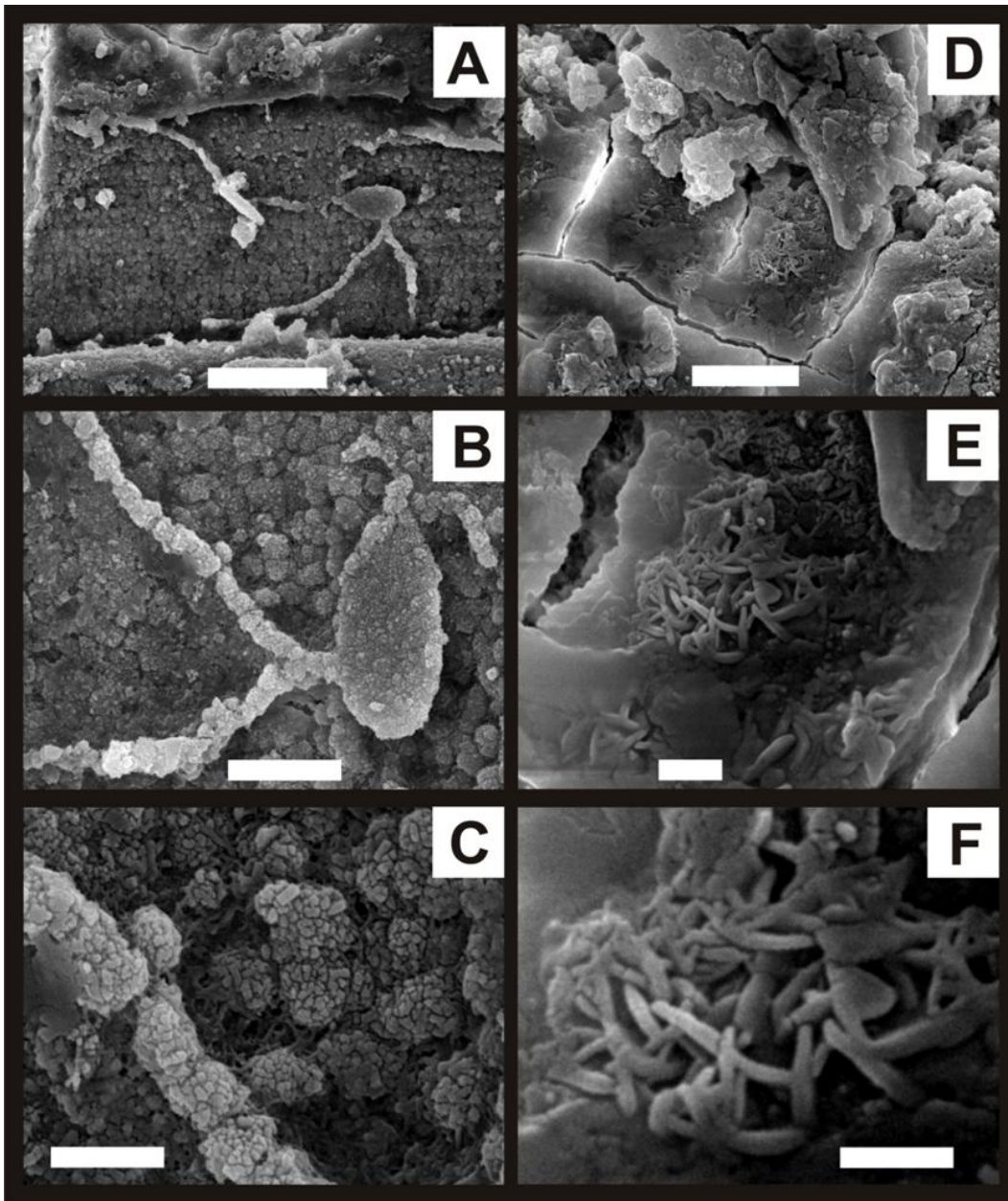




**Fig.15.** Microfotografías SEM de un corte interior del tracto digestivo recuperado del Pez *Pachyrhizodus* sp. (MUZ 341), Cantera Palestina, Austin Chalk: La **Figura A** muestra un crecimiento cristalino continuo usando el material orgánico como plantilla. (Barra de escala: 20  $\mu$ m). Igual que en la **figura** anterior, en la **Figura B** se observa la orientación de los cristales nucleando dentro y alrededor de los filamentos biogénicos, probablemente microbianos (barra de escala 3  $\mu$ m). **Figura C:** agregados capilares pseudo-mórficos de carbonatos creciendo entre estructuras biogénicas (barra de escala: 40  $\mu$ m).



**Fig.16.** Microfotografías SEM del contenido en el tracto digestivo recuperado del Pez *Pachyrhizodus* sp. (MUZ 341), Cantera Palestina, Austin Chalk. **Figuras A y B:** se observa coccolitos bien preservados y fragmentos calcáreos adyacentes relacionados con el substrato 'chalky' (barra de escala **Figura A:** 10  $\mu\text{m}$ ; **Figura B:** 6  $\mu\text{m}$ ). La **Figura C** muestra una cocósfera intacta y los restos de nanoplancton contiguo preservado dentro del contenido del tracto del Pez *Pachyrhizodus* sp. (MUZ 73), Cantera Pilote, Eagle Ford Shale (barra de escala 6- $\mu\text{m}$ ).



**Fig.17.** Microfotografías SEM de un biofilm microbiano preservado en la masa muscular y sedimento carbonatado contiguo recuperado del Pez *Pachyrhizodus* sp. (MUZ 73), Cantera El Pilote, Eagle Ford Shale: **Figuras A, B y C:** Célula parecida a un hongo fijada a un biofilm microbiano que muestra una característica red parecida a una telaraña (barra de escala **Figura A:** 20  $\mu\text{m}$ ; **Figura B:** 5  $\mu\text{m}$ ; **Figura C:** 2  $\mu\text{m}$ ). **Figuras D, E y F:** bacterias baciliformes fijadas al tejido blando preservado y delgadas microláminas de calcita (barra de escala **Figura D:** 5  $\mu\text{m}$ , **Figuras E y F:** 2  $\mu\text{m}$ ).



Las costras de formas cocoides fosfatizadas exhiben una textura criptocristalina en la superficie de las estructuras esféricas ligadas a la pared celular de formas extintas; la Figura 17.C muestra diminutos cristales nucleando alrededor de las estructuras de una pared orgánica. Así mismo, se detectan costras minerales microfracturadas, microláminas y cristales largos de calcita que están asociados con los biofilms de bacterias baciliformes fijados a lo largo de las fibras musculares (Figuras 17.D y E). Imágenes SEM obtenidas (Figura 14.D) muestran un patrón esferulítico bacteriano dentro de los vasos vasculares preservados en los paquetes musculares.

Adicionalmente, la Figura 18.C muestra estructuras botroidales de calcita en muestras del sedimento portador de fósiles (Cantera El Pilote), sugiriendo que estas microestructuras que rodean los fósiles y que junto con el nanoplancton forman el sedimento, pueden haber nucleado alrededor de estos agregados parecidos a células bacterianas.

Sanderman y Amundson (2003), además de Briggs *et al.* (2005), han planteado que la ocurrencia de biofilms microbianos dentro de los tejidos blandos fosilizados puede sugerir la presencia de un ensamble heterotrófico de microorganismos que degradan los cadáveres. De acuerdo con Gall (2003), los microbios interactúan con su ambiente mediante reacciones de superficie y actividades metabólicas, y para Visscher y Stolz (2005), esto hace probable que los microorganismos que crecen sobre y dentro de los cadáveres y generen un ambiente cerrado, fijando cationes de calcio y fósforo, y que además eventualmente induzcan una mineralización de sus mismas células mediante respiración microbiana (Briggs, 2003; Frankel y Bazylinsk, 2003; Liebig, 2003).

La fuente y los mecanismos de movilización de fosfato y calcita disueltos en los mares en los cuales se depositaron los sedimentos de Múzquiz Lagerstätte estuvieron ligados a la

disponibilidad de apatita biogénica y los precipitados de carbonato amorfo presentes que en del paleoambiente. La disponibilidad de cationes de Ca, P, CO<sub>2</sub>, y S asociados con la biomineralización de tejidos blandos es crítica y probablemente su fuente más probable fue la precipitación de carbonatos que forman los sedimentos del piso marino, así como lo sugirieron Lucas y Prévôt (1991), Sanderman y Amundson (2003), y Boggs (2009).

En este contexto, Emerson y Bender (1981) sugieren que otra fuente importante de cationes de Ca, CO<sub>2</sub>, and Na puede ser el nanoplancton calcáreo depositado en el piso marino. Así como se muestra en los estudios de Allison y Briggs (1991), Briggs *et al.* (1993), y Dornbos (2010), en la fosfatización selectiva una mayor fuente de P y Ca disuelto es liberado por la degradación orgánica, y aquí el metabolismo microbiano está directamente implicado. En tal escenario, la calcificación y la fosfatización a pequeña escala de tejidos blandos de Múzquiz Lagerstätte pudo ser disparada por un ambiente microbiano generado en torno a las zonas de la descomposición de los organismos en sedimentos enriquecidos por carbonato amorfo.

Por otra parte, como lo propone Schultze (1989), Martill (1990), la biología de los peces puede contribuir también como un factor intrínseco que incrementa el potencial de preservación observado en cada grupo de peces. Shewfelt (1981) muestra que el tejido muscular y las partes blandas de grupos recientes de peces tienen una concentración significativa de cationes disponibles de Ca y P, que son micro-bioelementos relacionados con los hábitos alimenticios.

#### 4. 4 Análisis ultraestructural de los sedimentos que contienen fósiles

A pesar de tener una continuidad lateral y una litología aparentemente monótona, los sedimentos laminares de Múzquiz Lagerstätte muestran claras diferencias sedimentarias en la microestratigrafía al ser observadas en secciones orientadas (**Figuras 18 y 20**). Asimismo, su composición geoquímica es variable, como lo demuestran los análisis por XRD y PIXE ya mencionados. Lo anterior refleja que en Múzquiz Lagerstätte prevaleció un régimen sedimentario episódico con diferentes cantidades de cocolitos, foraminíferos, y detritos calcáreos alóctonos, además de material siliciclástico depositado de manera alternante en estas sucesiones de margas-calizas.

Las imágenes SEM de los estratos fosilíferos muestran granos elongados en el sedimento que tienden a estar orientados diagonalmente y /o paralelamente al plano sedimentario de la roca (**Figuras 18.A y B**). De acuerdo con lo observado por Munnecke *et al.* (2005 y 2008), esto puede sugerir una tendencia de compactación de los sedimentos; en términos generales, las calizas laminares de ambas localidades (Palestina y El Pilote), muestran diferentes grados de compactación y de recristalización diagenética que es más intensa en El Pilote con sustratos de calizas margosas que en Palestina con sustratos de calizas 'chalky' (**Figura 18**). En contraste, las margas laminares muestran una pobre recristalización y una menor alteración diagenética, además son más fisibles (se separan en láminas finas) que las calizas. Tal diferencia en el endurecimiento se refleja en la ultraestructura de la litología en Múzquiz Lagerstätte (ver adicionalmente las **Figuras 5 y 20**).

La caliza margosa de El Pilote se compone de cristales de calcita con una textura estrechamente entramada, abundantes microagregados botroidales de carbonato,

cocolitos disueltos y recristalizados, escamas largas de calcita, y una microestructura cristalina de espatos completos y fragmentados (**Figuras 18.A, B, y C**). Lo cual se asocia con un fuerte sobrecarga diagenética, y de acuerdo con Munnecke y Westphal (2004) esto puede reflejar una menor porosidad del sedimento. En contraste, en la caliza tipo chalky de Palestina se observa una gran diversidad de cocolitos bien preservados y una pobre disolución de cristales de microspatos, y la microtextura está considerablemente menos entramada, lo que aumenta la porosidad del sedimento (**Figuras 14.D, E, y F**). Esta porosidad está relacionada con la disolución y esto se refleja en los rasgos tafonómicos de la preservación de la materia orgánica, por ejemplo, los esqueletos de peces están menos recristalizados y los tejidos blandos preservados se encuentran generalmente embebidos en el sedimento.

Aunque los estratos fosilíferos de Palestina son referidos aquí como calizas tipo chalky, debido principalmente al alto contenido de nanoplancton calcáreo en la matriz rocosa, es oportuno mencionar que el sedimento muestra también cantidades significativas de material no carbonatado, tal como aluminosilicatos provenientes probablemente de un sedimento arcilloso o alguna fuente de material siliciclástico (ver valores PIXE y XRD). Adicionalmente, los esqueletos de peces recuperados de los sedimentos 'chalky' de Palestina muestran características tafonómicas asociadas con un enteramiento rápido en un lodo carbonatado suave, tal como el ángulo de incidencia sobre el sustrato (aproximadamente entre 25 a 30 grados sobre el plano de depósito), además de que en la mayoría de los ejemplares se observan las columnas vertebrales contraídas en una forma tipo zigzag (ver adicionalmente la **Figura 6.B**).

La **Figura 18**, muestra los sedimentos de Palestina y El Pilote, en donde es posible observar las diferencias en el tamaño y la composición de los granos microcristalinos de

calcita que permite contrastar ambos sedimentos. Los estratos 'chalky' de Palestina muestran una microtextura compuesta mayormente por cristales más largos que  $4 \mu\text{m}$ , es decir, cristales de microespatos (por definición *sensu* Folk, 1959), así como una área menor cubierta por micrita con tamaño de granos menores o iguales a  $4 \mu\text{m}$  (**Figuras 18.D y E**). Al contrastar con los estratos margosos de El Pilote se observa aquí un contenido significativo de micrita y un componente menor de cristales de espatos. Estas diferencias en la microtextura detectadas por el análisis SEM sugieren que los estratos fosilíferos de las calizas 'chalky' y las calizas margosas han experimentado procesos diagenéticos distintos y además la fuente de los carbonatos es también variable (ver Flügel, 2004; Munnecke *et al.*, 2008).

Por otra parte, la **Figura 20** muestra un corte seccional de los sedimentos laminares provenientes de la Cantera Palestina. Se observa una gran cantidad de cocolitos, calciesferas y foraminíferos que están bien preservados y fijados por cemento de calcita espática sedimentaria (**Figura 20.A**). La microfotografía muestra el área que representa la Zona Tafonómicamente Activa o TAZ (Taphonomically Active Zone) mencionada por Botjer *et al.* (2002), la cual describe la zona espacial y temporal donde se depositan los fósiles, y que aparece en la parte superior de los sedimentos laminares (de acuerdo al corte orientado). En contraste, la **Figura 20.B** muestra una capa laminar por abajo del horizonte mencionado (TAZ) con notablemente menos proporción de nanoplancton, y calciesferas y restos de foraminíferos depositados y cementados por calcita espática (en gris); así como se muestra laminaciones delgadas de arcilla con contenido de hidróxido de Fe (en rojo). La laminación alternada indica periodos de depósito episódicos.

Al combinar los resultados de los análisis estructurales por microscopía con las señales químicas obtenidas por los valores PIXE y EDX, se puede obtener una caracterización de

los sedimentos portadores de fósiles más comprensible. Usando EDX se midieron micro-áreas de  $500\mu\text{m}^2$  en los sedimentos laminares que contienen peces fósiles de las Canteras Palestina y El Pilote de manera orientada en cortes seccionales, perpendicularmente al plano de depósito, el análisis está correlacionado con la microestratigrafía multilaminar de los sedimentos, tal como se muestra en la **Figura 20.C**. De esta manera, los valores de EDX se graficaron primeramente haciendo un ajuste lineal (**Figura 19**), y posteriormente se realizó un análisis de coeficiente de correlación de Pearson, para entender la relación Ca/Mg en los sedimentos carbonatados (**Figura 21**); con respecto a estos elementos, tales datos indican que el sedimento precursor de las calizas margosas y 'chalky' es consistente con un flujo constante de magnesio; aunque en general, el contenido de magnesio en los sedimentos de Múzquiz es mínimo (**Figura 19**). Los resultados del análisis de ajuste y de correlación muestran una asociación positiva observada por la línea de pendiente y por el valor positivo de (*r*) para cada localidad, respectivamente. Aunque estos resultados no están relacionados con un proceso de causalidad entre las concentraciones de ambos elementos, el Mg junto con el Ca son dos de los ocho solutos más abundantes en el medio marino (Bernal & Railsback, 2008), los valores de concentración de ambos elementos si representan un régimen de depósito de carbonatos semejante entre las localidades. Además, se observa que el magnesio incrementa en estos horizontes donde el nivel de depósito del nanoplancton también tiende a incrementar. De acuerdo a Boggs (2009), esto puede estar relacionado con una paleocuenca abierta y un depósito episódico de nanoplancton calcáreo. Además, siguiendo con este mismo autor, una calcita pobre en magnesio en un depósito marino esta igualmente asociada a un ambiente diagenético meteórico. Igualmente, puede estar asociado a la variabilidad de la paleotemperatura que afecta la

entrada de los sedimentos, como está documentado por Cléroux *et al.* (2008), el magnesio es sensible a los cambios de temperatura registrados en los depósitos carbonatados biogénicos.

De manera semejante, las mediciones PIXE muestra cantidades contrastantes de Al, Si, K, Fe, and Mn (**Tabla 1, y Figura 6**), estos aniones están relacionados con la contribución variable de material siliciclástico en un medio marino (Bernal & Railsback, 2008).

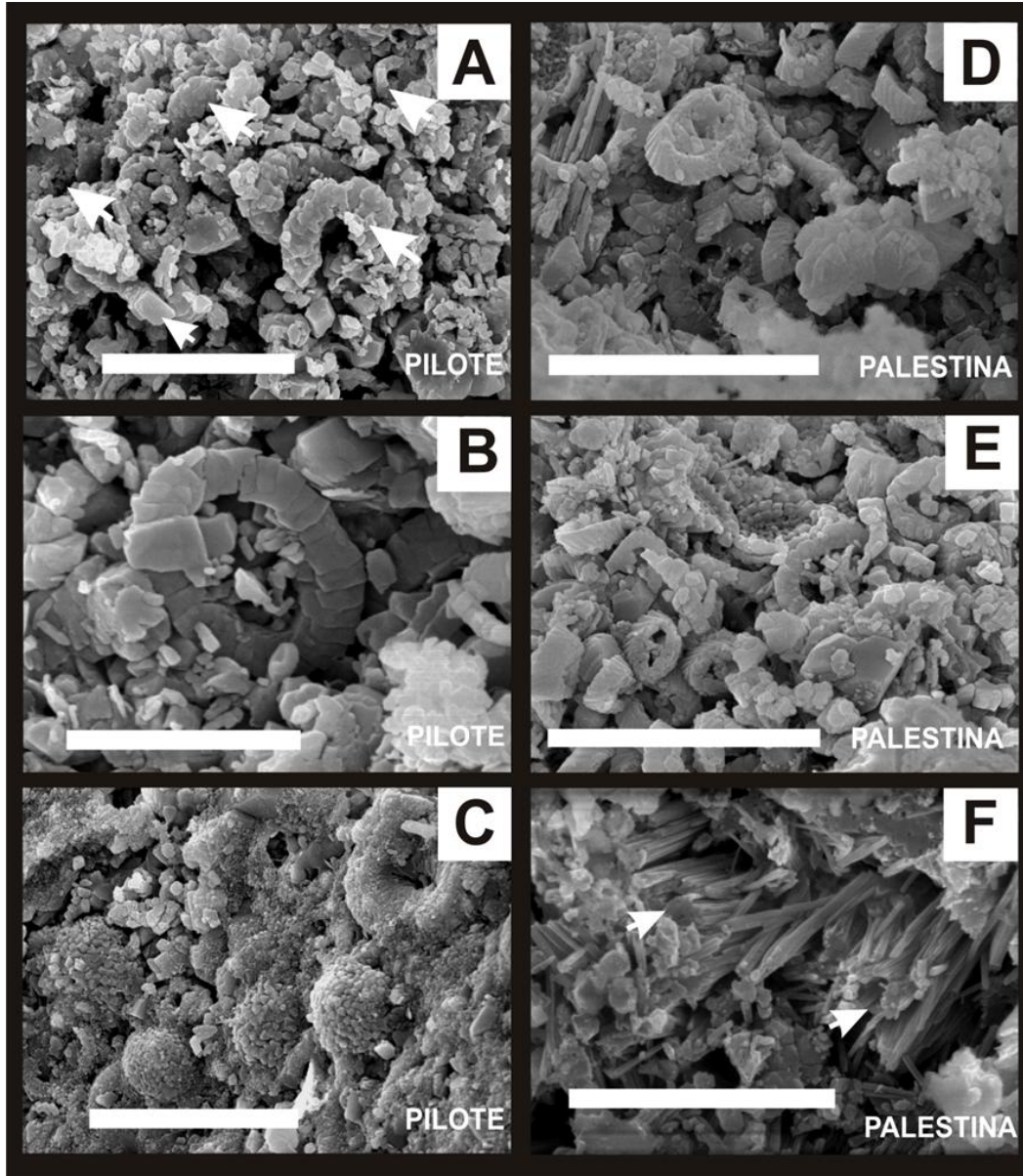
El sedimento precursor de ambos tipos de las calizas de Múzquiz está compuesto por una mezcla de carbonatos biogénicos con una cantidad variable de material arcilloso. En este sentido, los estratos de caliza en estas sucesiones de margas-calizas de Múzquiz tienen una laminación dura entre los depósitos de fósiles y están compactados más fuertemente que los estratos de margas. En los trabajos de Munnecke & Westphal (2004), y Westphal (2006) se concluye que la diagenesis por enterramiento marino temprano de carbonatos biogénicos se produce una disolución selectiva de aragonita en las capas de margas, y esto suministra el cemento carbonatado necesario para la litificación de los estratos de las calizas laminares (ritmitas). Aquí, el contenido de estroncio es un relicto del carbonato de calcio biogénico y es interpretado como una evidencia de la disolución de la aragonita (ver también Munnecke & Westphal, 2005, Munnecke *et al.*, 2008). El análisis PIXE en los sedimentos de Múzquiz Lagerstätte muestran un contenido promedio de estroncio en los rangos de 2300 a 10000  $\mu\text{g/g}$  (o su equivalente en ppm) (ver Tabla 1); esta cantidad de estroncio contrasta con los bajos valores reportados en rocas carbonatadas por Kinsman (1969), los cuales son valores promedio menores a las 1000 p.p.m. (o su equivalente en  $\mu\text{g/g}$ ). Adicionalmente, el análisis ultraestructural muestra cristales aciculares característicos asociados con la morfología de la aragonita en los estratos de las margas (ver las anterior **Figura 20.F**), así

como una cementación porosa observada por el alto contenido de lodo aragonítico. Probablemente, la alteración diagenética de los sedimentos con una significativa disolución de la aragonita ha jugado un papel importante en la formación de las ritmitas de Múzquiz rythmites con una acumulación de sedimentos carbonatados pelágicos.

Además, estas observaciones son consistentes con una excelente preservación de los cocolitos en los estratos de las calizas 'chalky' y también en las calizas margosas, sugiriendo que la calcita microcristalina no es la única fuente de cemento de carbonato de calcio en los sedimentos que contienen fósiles. Tales cocolitos bien preservados constituyen el grueso de los sedimentos en las calizas 'chalky' y también enriquecen los planos de depósito de las calizas margosas donde usualmente se preservan.

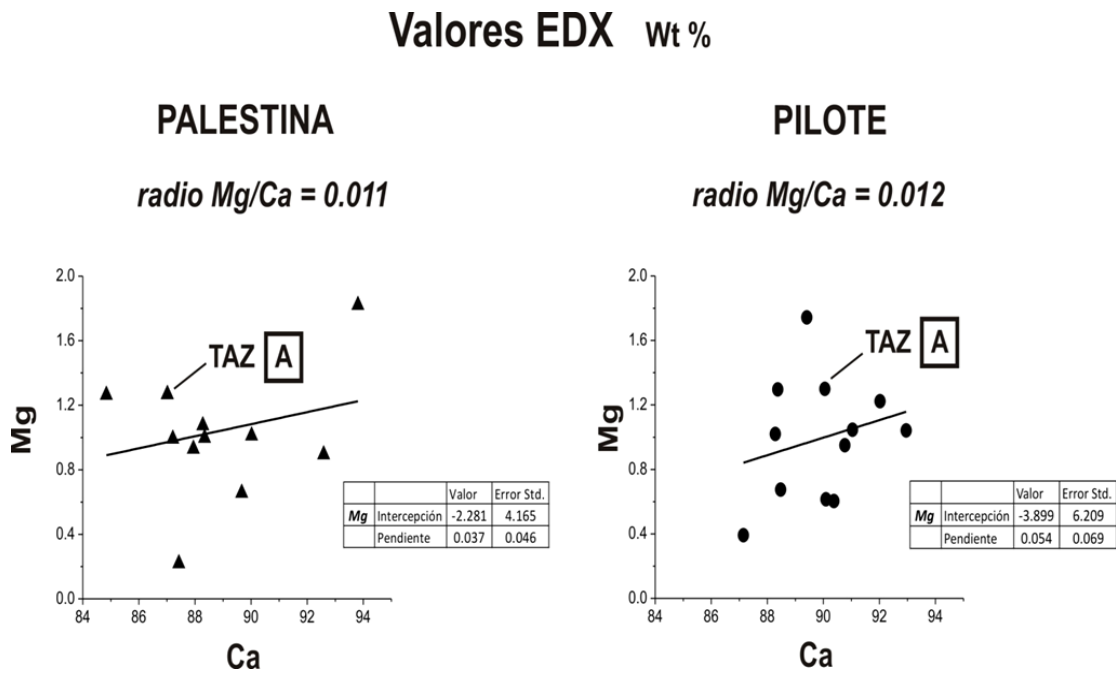
La naturaleza del lodo carbonatado que forma la textura micritica y microesparítica en las calizas 'chalky' y margosas en Múzquiz Lagerstätte está relacionada a la precipitación directa de carbonato de calcio proveniente de una masa de agua estratificada. Munnecke & Samtleben (1996), y Westphal *et al.* (2004), describen este tipo de depósitos episódicos de calizas fuertemente asociados a aguas estratificadas, donde se distinguen capas de diferentes densidades (distinta temperatura y oxígeno disponible) que evitan la mezcla del agua superficial con el agua del fondo. Lo que de acuerdo a Scholle y Ulmer-Scholle (2003), y Boggs (2009), esto puede representar un ambiente relativamente estable que permite el establecimiento de un sistema microbiano en el fondo de una masa de agua con poca energía. Aparentemente, las matas microbianas observadas en los planos de depósito de las ritmitas de Múzquiz podrían estabilizar la superficie de los sedimentos, pero no eran los productores de los carbonatos (ver Gall, 2003; Flügel, 2004, Boggs, 2009).



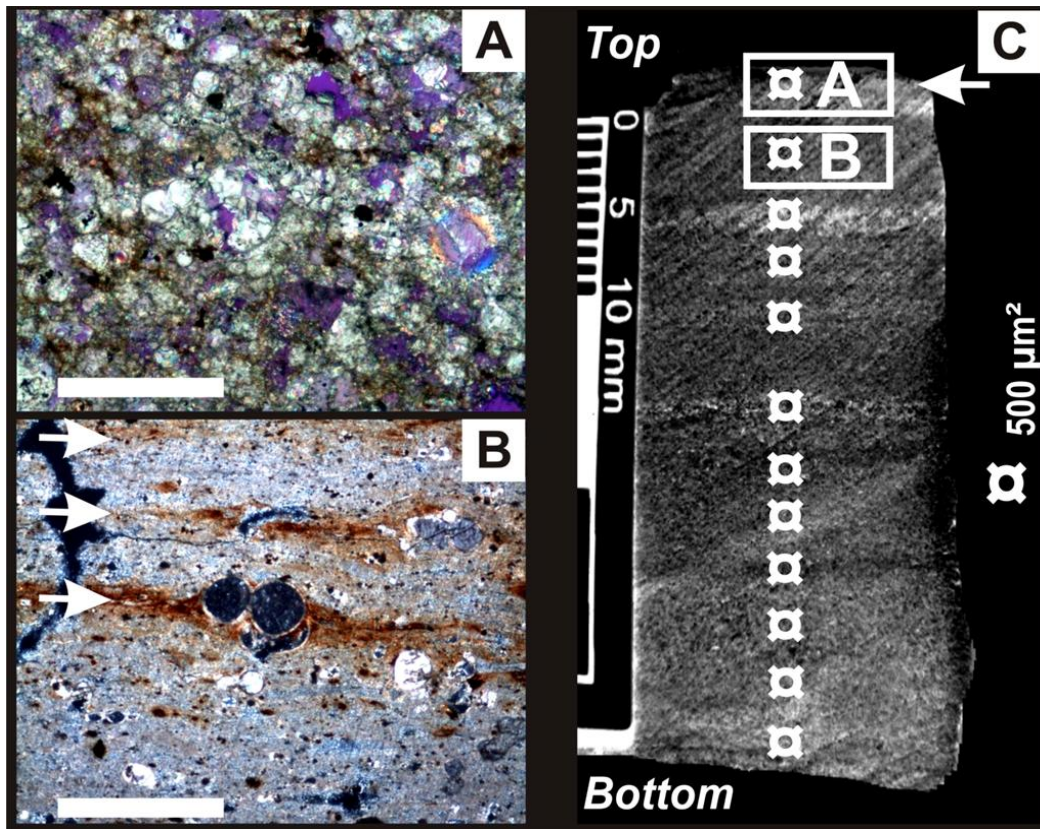


**Fig. 18.** Microfotografías SEM del análisis ultraestructural comparativo entre ambas localidades: Palestina (derecha) y El Pilote (izquierda). La **Figura A** muestra coccolitos diagenéticamente alterados y fragmentos disueltos asociados a nanoplancton; las flechas muestran fragmentos elongados orientados (barra de escala 10  $\mu\text{m}$ ). **Figura B:** Microtextura estrechamente entrelazada y cristales de microespatos (barra de escala 4  $\mu\text{m}$ ). **Figura C:** masas de estructuras botroidales de cristalitas de carbonato de calcio, coccolitos disueltos, microláminas delgadas de calcita, y cristales de microespatos (barra de escala 10  $\mu\text{m}$ ). **Figuras D y E:** Los sedimentos de Palestina muestran cristales de

espato menos entrelazados, cocolitos bien preservados y pobre disolución de éstos (barra de escala 10  $\mu\text{m}$ ). **Figura F:** cristales aciculares orientados asociados con la aragonita, cristales de espatos, y carbonato de calcio amorfo en los sedimentos de las margas de la Cantera Palestina (barra de escala 4  $\mu\text{m}$ ).



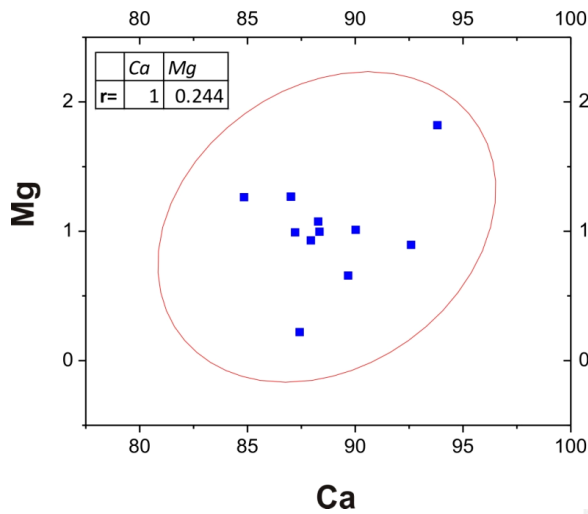
**Fig.19.** Gráfica de dispersión para los valores EDX de Mg y Ca (wt%) en ambos sedimentos laminados de Palestina y El Pilote. TAZ describe la Zona Tafonómicamente Activa (ver **Figuras 15.A y C**). En la gráfica se muestra por la línea de la pendiente el ajuste lineal de los valores de Mg/Ca en análisis orientados de los sedimentos laminares. Además, el radio Mg/Ca indica una fuente baja de Magnesio. La incertidumbre es tan larga como el símbolo.



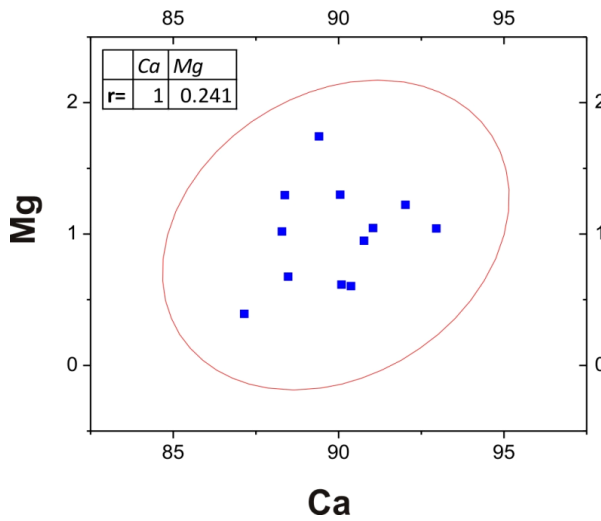
**Fig. 20.** Secciones transversales orientadas de los sedimentos laminares provenientes de la Cantera Palestina, Austin Chalk. La **Figura A** muestra abundante nanoplancton calcáreo (cocolitos) bien preservado, calciesferas, y foraminíferos tal como aparecen en secciones delgadas (barra de escala 500  $\mu\text{m}$ ); estos sedimentos representan la TAZ: el área temporal y espacial donde ocurre la degradación orgánica y los macrofósiles son preservados (flecha superior). **Figura B:** Capa laminar en la parte inferior del horizonte previo muestra notablemente menos contenido de nanoplancton, calciesferas y pocos remanentes de foraminíferos cementados con calcita espática (gris), asimismo se muestra finas laminas de material arcilloso (flechas) con contenido de hidróxido de Fe (barra de escala 500  $\mu\text{m}$ ). **Figura C:** Laminación fina en calizas tipo 'chalky' que contienen fósiles, los círculos indican las áreas de análisis EDX (500 $\mu\text{m}^2$ ).

## Valores EDX wt %

### PALESTINA



### PILOTE



**Fig. 21.** Análisis de coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ ) usando los valores EDX de Mg y Ca antes mencionados para ambos sedimentos de Palestina y El Pilote. Los valores de ( $r$ ) para ambas localidades indican una asociación positiva, a mayor concentración de Calcio aumenta ligeramente el Magnesio. Si bien esta correlación no demuestra una causa-efecto si revela un régimen de depósito de carbonatos semejantes. La incertidumbre es tan larga como el símbolo.

#### **4.5 Contribución de microfósiles en la génesis de los carbonatos de Múzquiz Lagerstätte: algunos ejemplos.**

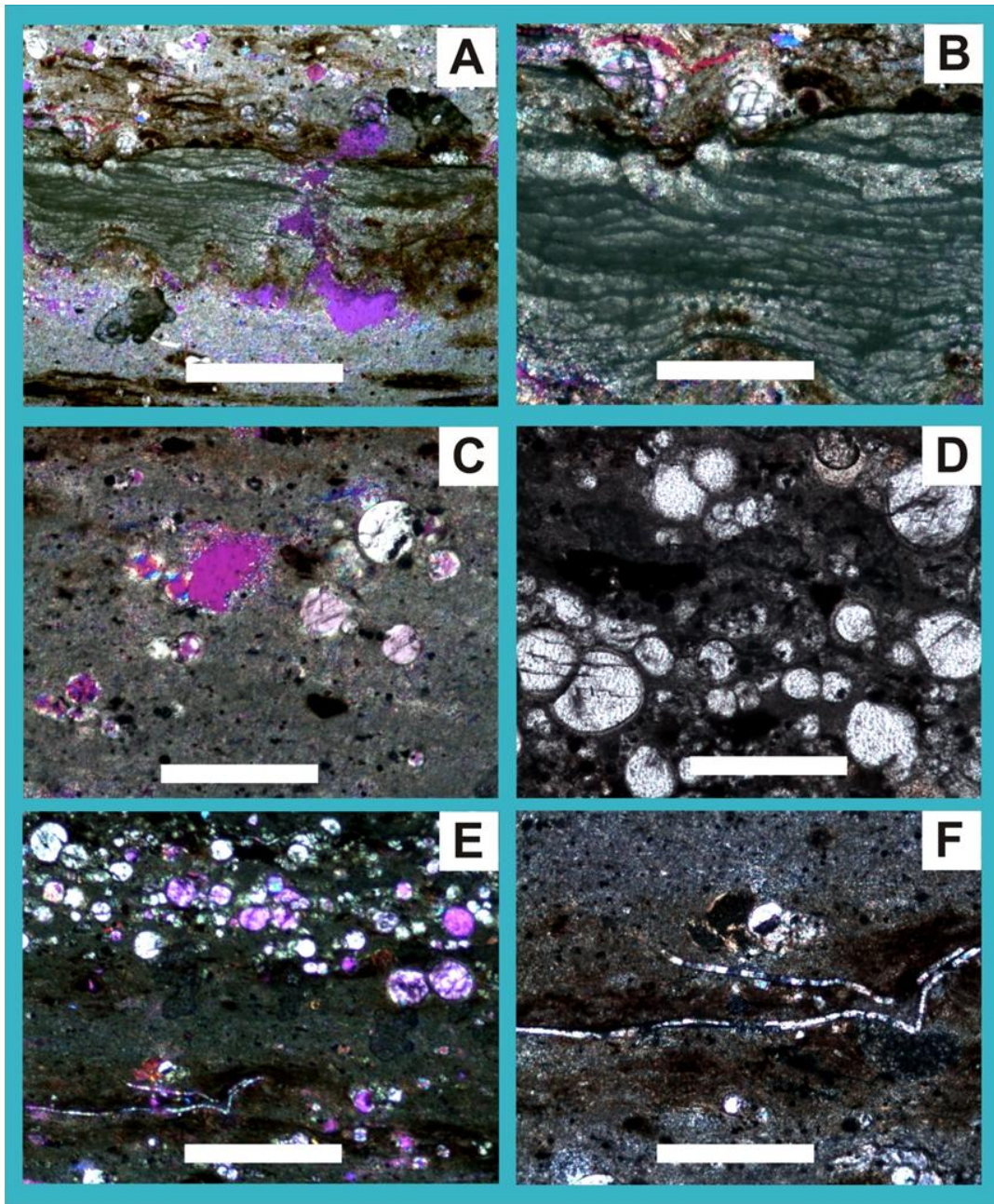
El análisis ultraestructural descrito en el apartado anterior muestra evidencias del aporte de los nanofósiles en la génesis de las fases laminares de Múzquiz Lagerstätte, esto es particularmente importante en los estratos carbonatados de la Cantera Palestina descritos aquí como calizas tipo chalky, donde el nanoplancton calcáreo (cocolitos, nanolitos y calciesferas) puede alcanzar una abundancia de hasta el 80% en los planos de estratificación que contienen macrofósiles de vertebrados. De acuerdo con Flügel (2004), los sedimentos pelágicos que consisten en una mayor proporción de nanoplancton calcáreo (cocolitos) pueden ser descritos como chalk. Este tipo de sedimento se compone de abundantes placas de cocolitos alterados diagenéticamente (el grado de alteración es variable), además de granos de carbonato de calcio micríticos y microesparíticos, y de largos cristales de calcita.

Con una microtextura más porosa que la caliza micrita, las calizas chalky de la cantera Palestina son menos densas y compactas. Probablemente, una baja cementación de la calcita, y la ausencia de fluidos meteóricos en el poro sedimentario en estas calizas formadas por lodos carbonatados pelágicos, contribuyeron en la buena preservación del material orgánico depositado de manera alternante. Mientras que las calizas margosas de El Pilote muestran una mayor compactación y recristalización, además de un contenido mayor de micrita, tal como se ha demostrado en los resultados presentados anteriormente en este trabajo, y que se sugiere aquí que son resultado una mayor alteración diagenética, tal como se observa en los trabajos de Land, 1986, Tucker, 1993, y Flügel, 2004. Este tipo de sedimentación y diagénesis de carbonatos por contribución de nanoplancton calcáreo, como la ocurrida en Múzquiz Lagerstätte, ha sido estudiado



igualmente por diferentes autores, tales como Boggs (2009), y en localidades Lagerstätten por Keupp (1994), entre otros.

De manera adicional al análisis ultraestructural mencionado, se realizó un análisis de microfacies de secciones orientadas en láminas delgadas de la roca portadora de fósiles para ambas canteras: Palestina y El Pilote. Las muestras vistas en microscopio petrográfico (nícoles cruzados) exhiben el patrón laminar episódico relacionado con la variabilidad del aporte de sedimentos (**Figura 22 y 23**). La **Figura 22.A** muestra la microfacie wackestone/packstone de la roca fosilífera proveniente de la Cantera El Pilote, vista a través del microscopio petrográfico (nícoles cruzados), la microfotografía muestra una laminación conspicua que se asocia con el aporte episódico de los sedimentos bajo condiciones paleoambientales estacionales. La **Figura 22.B** muestra un acercamiento a la muestra anterior que permite ver los niveles escalonados de depósito, en la parte superior se encuentra nanoplancton calcáreo y restos de foraminíferos dispuesto en una matriz alomicrítica, y bajo la línea de sedimentación se observa estructuras algales, probablemente estromatolíticas, cementadas en una matriz esparítica, restos de óxidos de hierro de origen terrígeno y abundante materia orgánica.



**Fig. 22.** Microfotografías de secciones delgadas de los estratos fosilíferos de El Pilote (Eagle Ford): **Figuras A, B, C, y D.** Así como de Palestina (Austin Chalk): **Figuras E y F.** Barra de escala 500  $\mu\text{m}$ .

La **Figura 22.C** muestra una microfacie tipo wackestone de un corte vertical de la roca proveniente de la Cantera El Pilote, que se compone de un conjunto de foraminíferos, calciesferas, restos calcáreos biogénicos, y materia orgánica que está cementado en una matriz alomicrítica. La fracción terrígena se compone de cuarzo, diminutos nódulos de óxidos de hierro, y partículas líticas probablemente volcanogénicos. La **Figura 22.D** muestra una microfacie tipo packstone de un corte seccional de una roca portadora de fósiles de la Cantera El Pilote, que presenta un conjunto de cocolitos, calciesferas, otros nanofósiles y materia orgánica que está inmerso en una matriz alomicrítica, recristalizada a microesparítica en algunas zonas de contacto con los microfósiles.

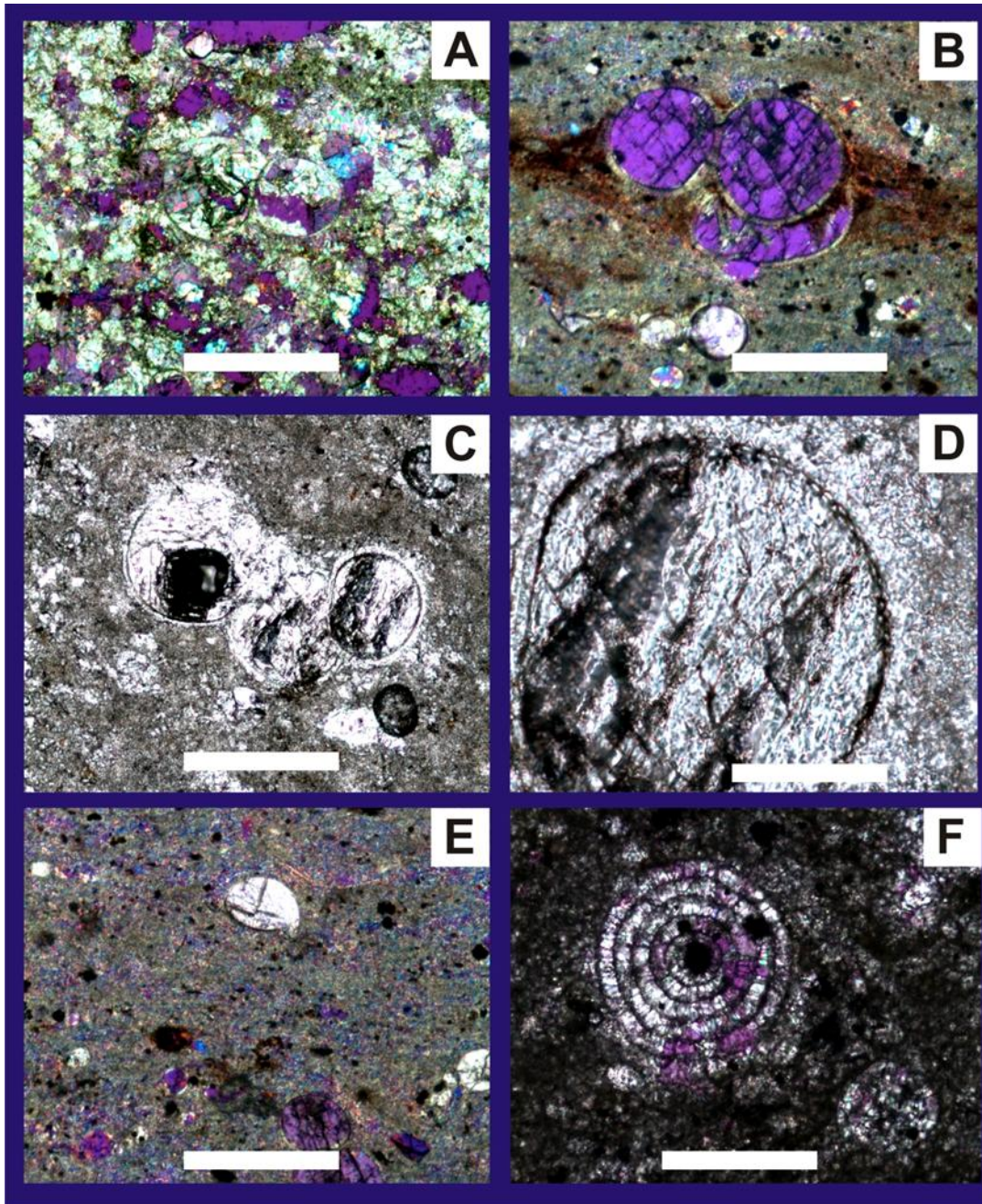
De manera semejante, en cortes orientados en la roca fosilífera proveniente de la Cantera Palestina se observó el patrón de apilamiento en las microfacies que ha permitido distinguir secuencias de depósito alternantes. La **Figura 22.E** muestra una microfacie wackestone/packstone de la roca de Palestina con un cambio significativo de la densidad del conjunto de cocolitos, foraminíferos, calciesferas, nanofósiles, y algas filamentosas. El conjunto además está cementado en una matriz alomicrítica, aquí la fracción terrígena está compuesta por nódulos de Fe, cuarzo y feldespatos. En esta distribución vertical de facies se observa una fina laminación que además documenta la baja energía deposicional. La **Figura 22.F** muestra un acercamiento a las largas estructuras del alga filamentosa depositada de manera concordante al plano de sedimentación del material terrígeno compuesto por partículas de óxido de hierro y abundante materia orgánica. La Adicionalmente, la **Figura 23** muestra las microfacies wackestone/packstone de la roca fosilífera de Palestina, vista a través del microscopio petrográfico (nícoles cruzados), que presenta un ensamble de nanoplancton calcáreo, usualmente abundante y bien preservado, además revela una diversidad significativa de



formas asociadas a diferentes taxones -no reportados en la literatura hasta ahora- para distintos grupos de nanoplancton y foraminíferos en el Cretácico Tardío de Norteamérica (Gale *et al.*, 2008).

La **Figura 23.A** muestra la microfacie packstone de la caliza chalky de Palestina que se compone de abundantes cocolitos, calciesferas, fragmentos calcáreos (restos de foraminíferos), materia orgánica y partículas terrígenas en una matriz alomicrítica/esparítica. Esta microfacie representa un corte transversal de la TAZ (Zona Tafonómicamente Activa) en la roca portadora de fósiles. La **Figura 23.B muestra** calciesferas y foraminíferos depositados de manera concordante a la laminación, la porción terrígena se compone de nódulos de óxidos de Fe, partículas siliciclásticas, cuarzo, feldespatos y líticos probablemente volcanogénicos, además se observa abundante materia orgánica. El conjunto está embebido en una matriz alomicrítica que recrystaliza a microesparita. La textura porosa de la las calizas de Palestina es resultado en mayor medida de la mineralización del nanoplancton calcáreo. La **Figuras 23.C y D** muestran ejemplos de la diversidad de foraminíferos presente en los sedimentos calcáreos de Palestina, el conjunto de microfósiles, partículas terrígenas, y materia orgánica se encuentra inmerso en una matriz alomicrítica/micrítica.

En La **Figura 23.D** se observa detalladamente la microestructura de la pared externa, placas y suturas de recrystalización del exoesqueleto calcáreo de un foraminífero indeterminado como evidencia de la buena preservación. De acuerdo con Keupp (1994), Flügel (2004), Boggs (2009), la preservación diferencial de nanoplancton calcáreo es un proxy importante para entender el patrón de paleocorrientes del fondo marino, además de la disolución química en la masa de agua y dentro de los sedimentos.



**Fig. 23.** Microfotografías de secciones delgadas de la Cantera Palestina (Austin Chalk).  
**Figuras A, E, y F:** Barra de Escala 500 µm. **Figuras B, y C:** 200 µm. **Figura D:** 50 µm.

En la roca fosilífera de Palestina usualmente se encuentra buena preservación de cocolitos y foraminíferos, calcitización de su exosqueleto, y una recristalización variable. La **Figura 23.E** muestra un ejemplo de la microfacie wackestone/packstone de la roca de Palestina que presenta un conjunto embebido en un cemento alomicrítico/microsparítico de calciesferas, nanoplancton, ostrácodos, algas filamentosas, partículas terrígenas, nódulos de hierro y abundante materia orgánica, el conjunto es característico de sedimentos pelágicos de mar abierto (ver Scholle y Ulmer-Scholle, 2003; Flügel, 2004.). La **Figura 23.F** muestra un ejemplar de foraminífero indeterminado tal como aparece en secciones delgadas observadas bajo el microscopio petrográfico (nícoles cruzados), en la caliza chalky de Palestina.

Tucker y Wright (1990), Flügel (2004), sugieren que esta acumulación de nanoplancton calcáreo dominada por algas planctónicas es característica de lodos carbonatados pelágicos en ambientes actuales, los cuales se encuentran en depósitos marinos con profundidades de varios cientos de metros (ver también Scholle y Ulmer-Scholle, 2003), En los sedimentos fosilíferos de Múzquiz Lagerstätte se observa una predominancia semejante, con una variabilidad de la densidad de cocolitos y foraminíferos entre las canteras Palestina y El Pilote. Lo que sugiere que la producción de carbonato pudo haber sido controlada por la deposición de cocolitos, nanofósiles, y foraminíferos, además de la entrada de carbonatos de grano fino derivados de las plataformas cercanas a las paleocuenca.

## 5. CONCLUSIONES

### 5.1 Fosilización selectiva y análisis no destructivo

Los tejidos blandos de Múzquiz Lagerstätte explorados de manera inicial mediante la técnica de fluorescencia inducida por luz UV acoplada a un microscopio muestran paquetes musculares que retienen su posición anatómica y que exhiben también un gradiente de color entre rosa-anaranjado-ocre asociado con el estado químico de los tejidos fosilizados (**Figuras 6 y 7**). Probablemente, estos paquetes musculares laterales se disgregaron aleatoriamente a lo largo de los restos orgánicos por la degradación y la descarga sedimentaria. Las mediciones PIXE en estas partes blandas muestran que éstas experimentan un aumento de fósforo con un factor de incremento mayor que 4, lo cual es consistente con la concentración de fosfatos en estos tejidos (**Tabla 1**). Además, existe una clara diferencia entre la concentración de fosfatos en partes orgánicas y el sedimento que rodea y cubre a los fósiles (**Tabla 1, Figuras 9 y 10**), lo que es un carácter tafonómico significativo que está asociado a la preservación.

Análisis cuantitativos de XRD adicionales indican que la Fluorapatita es la fase mineral predominante y la calcita es complementaria (**Tabla 2**). Esta preservación por fosfatos y calcita microcristalina en tiempos geológicos ocurre de manera inmediata, entre horas a algunos días (Dornbos, 2010). Los resultados de la presente investigación muestran que la preservación selectiva de tejidos blandos también incluye células microbianas conservadas en el sustrato orgánico (paquetes musculares y el tracto digestivo), así como



biofilms microbianos fijados al sustrato mineral en las capas superficiales de los sedimentos donde se depositaron los fósiles, lo cual igualmente puede estar ligado a las condiciones microambientales durante el enterramiento. Las comunidades microbianas regulan el microambiente de la degradación orgánica y el enterramiento, evidencia de esta actividad en los fósiles y los sedimentos de Múzquiz Lagerstätte es la preservación misma de estos biofilms microbianos.

De esta manera, la microscopía con luz UV, y los valores cuantitativos PIXE y XRD, generan una medida directa de las señales químicas (fingerprints) de la fosilización de tejidos blandos. Esta combinación de técnicas analíticas, que se incluyen en la metodología no destructiva presentada en este trabajo, resuelven con solvencia la problemática de conservación de los ejemplares fósiles únicos, que además caracteriza las localidades Lagerstätten. Así, el presente es un trabajo inédito que representa una metodología con un enfoque claramente multidisciplinario.

Adicionalmente, a partir de estos resultados, en la presente investigación se replantea el estudio de la preservación selectiva en el material fósil basado en los conceptos de biomineralización (Mann, 2001), lo que implica el estudio de un tipo de interacción entre la materia orgánica y las fases minerales presentes. El “Efecto de semilla cristalina” se plantea aquí como un modelo de biomineralización que puede llevar a una mejor comprensión del fenómeno de fosilización excepcional en las localidades Lagerstätten, y en un sentido más amplio, ayuda a entender la preservación fósil a diferentes edades geológicas. Este primer modelo de biomineralización debe ser soportado por nuevos datos y fundamentos teóricos en trabajos futuros que intenten abarcar el complejo fenómeno de la relación entre la materia orgánica preservada en sedimentos antiguos. Precisamente, como consecuencia de este nuevo enfoque, en este trabajo se plantea una

nueva definición de la Tafonomía, la cual puede incluir estos fenómenos que afectan la materia orgánica a pequeña escala. La tafonomía se define aquí como la interacción de la materia orgánica sobre superficies minerales a través del tiempo (Riquelme, 2009), y este puede ser un tiempo geológico, pero igualmente puede ser en un tiempo más inmediato, como el que implica análisis tafonómicos a muestras actuales, y donde se puede observar la misma relación crítica entre los organismos y los sedimentos.

De acuerdo a lo anterior, la preservación de tejidos blandos hace de Múzquiz Lagerstätte uno de los más importantes depósitos de conservación fósil para América del Norte. Esta área reúne una diversidad taxonómica significativa con implicaciones paleobiogeográficas observadas por otros autores, tales como Blanco-Piñon y Alvarado-Ortega, 2005; Buchy *et al.*, 2005; Stinnesbeck *et al.*, 2005; Frey *et al.*, 2006; Alvarado-Ortega *et al.*, 2006, y 2009; Vega *et al.*, 2007. Lo que sumado al presente trabajo de tafonomía permite una mejor comprensión de la vida marina durante el Cretácico Tardío de Norteamérica (Skelton *et al.*, 2003).

Por otra parte, en el presente trabajo de investigación, las localidades en la región de Múzquiz (véase **Figuras 3 y 4**) se han descrito de manera genérica como localidades tipo Múzquiz Lagerstätte, a pesar de sus diferencias en litología y nivel estratigráfico. Lo anterior se observa en el estudio de localidades Lagerstätten alrededor del mundo (ver Botjer *et al.*, 2002; Goldring, 1985, entre otros), y sirve para agrupar localidades de conservación excepcional con características paleobiológicas, paleoambientales, y paleogeográficas semejantes, y cuyos afloramientos están expuestos en una misma área geográfica.

## 5.2 Paleoambiente

Por otra parte, los resultados obtenidos en este trabajo muestran que las sucesiones de margas y calizas de Múzquiz pueden interpretarse como alternancias de un fondo sedimentario autóctono de lodos carbonatados pelágicos provenientes de fábricas sedimentarias de carbonatos de profundidades medias (los estratos de calizas), interrumpidos por una descarga episódica de sedimentos provenientes de aéreas bajas en los márgenes de la paleocuenca (los estratos de margas). En los sedimentos fosilíferos de Múzquiz Lagerstätte se observa una acumulación significativa de nanoplancton calcáreo, con una variabilidad de la densidad de cocolitos y foraminíferos entre las canteras Palestina y El Pilote. De acuerdo con Tucker y Wright (1990), y Flügel (2004), este patrón sedimentario caracteriza los lodos carbonatados pelágicos en profundidades de varios cientos de metros en ambientes actuales.

Adicionalmente, como sugieren los trabajos de Viohl, 1994; Munnecke y Samtleben, 1996; Westphal *et al.*, 2004, Munnecke *et al.*, 2008, esta descarga episódica de carbonatos pelágicos está fuertemente asociada a tormentas estacionales que pueden afectar la dinámica de depósito de los sedimentos en la paleocuenca. Uno de los argumentos en este contexto es la gran abundancia de cocolitos y foraminíferos en los estratos de las calizas 'chalky', además de las calizas margosas, como se muestra en el análisis ultraestructural de estos sedimentos mencionado en los capítulos anteriores. En este análisis de secciones delgadas se observan foraminíferos, calciesferas, cocolitos, y restos calcáreos en capas escalonadas y claramente definidas asociadas a un transporte por tormentas estacionales (tormentitas) resultando así un régimen transicional (Scholle y Ulmer-Scholle, 2003).

Otra característica tafonómica notable (relacionada con el enterramiento) en la Cantera Palestina, por ejemplo, es que muchos de los peces aparecen en un ángulo inclinado de incidencia de hasta 30° con respecto al plano de la roca, y en este horizonte fosilífero se observa un incremento del depósito de cocolitos, foraminíferos y restos calcáreos biogénicos.

En contraste, los estratos de margas representan otros tiempos reducidos de depósito de carbonatos o más probablemente, tiempos del incremento de la descarga de material siliciclástico de grano fino durante episodios de aumento de la humedad, tal como lo observa Tucker (1993), Westphal (2006), y Munnecke *et al.* (2008). Estos sedimentos margosos de grano fino probablemente fueron exportados de las áreas bajas de aguas someras por corrientes tipo turbiditas durante tormentas estacionales, como lo describe Westphal *et al.*, 2004.

De acuerdo a lo anterior, las ritmitas de Múzquiz forman parte de las sucesiones carbonatadas de aguas pelágicas en un paleoambiente subtropical, donde el régimen de depósito estuvo bajo la influencia de una masa de agua estratificada. Algunas capas de material no carbonatado (sedimentado en capas milimétricas), pudo depositarse por eventos únicos de descarga de material siliciclástico (Westphal, 2006), como se menciona arriba, así como por efecto de la diagénesis meteórica de los carbonatos como sugiere Land (1986), y Boggs (2009).

Lo anterior nos lleva a considerar que el régimen de depósito marino en Múzquiz Lagerstätte, durante la alternancia de margas a calizas, pudo estar ligado al desarrollo de importantes cambios climáticos estacionales, que aportaron a la paleocuenca grandes cantidades de material carbonatado.



La ubicación espacial de estas plataformas carbonatadas, además de la distribución del material por medio de corrientes marinas, ha determinado el tipo de facies alternadas con material siliciclástico que se encuentra en Múzquiz Lagerstätte. Asimismo, afectó la distribución del nanoplancton calcáreo y de los foraminíferos; esta distribución de los microfósiles depende de la composición de los sedimentos, que a su vez es una función de otros parámetros, como la energía de la masa de agua, y de las condiciones fisicoquímicas de la paleocuenca (temperatura y oxígeno disponible) (Tucker y Wright, 1990; Flügel, 2004).

Hasta ahora no hay un consenso acerca de la naturaleza del patrón litológico rítmico de los sedimentos de Múzquiz Lagerstätte, aunque algunas ideas se han propuesto en varios estudios de manera preliminar (Blanco-Piñón & Alvarado-Ortega, 2005; Stinnesbeck *et al.*, 2005; y Alvarado-Ortega *et al.*, 2006).

Por otra parte, el estudio ultraestructural y geoquímico de las calizas laminares aplicado a dilucidar el paleoambiente, y que es descrito en la última parte del capítulo anterior, no es concluyente. Sin embargo, este estudio representa las primeras mediciones y datos obtenidos en orden de entender la génesis de las ritmitas que componen el patrón laminar característico en Múzquiz Lagerstätte. Además, los resultados de la presente investigación muestran que existió una diagénesis diferencial durante la litificación de las ritmitas de Múzquiz y presenta por primera vez el estudio de las señales primarias para interpretar la génesis de estas sucesiones de margas a calizas. Estudios adicionales que incluyen medidas sobre las señales químicas y análisis ultraestructurales de los sedimentos están actualmente en proceso.

En este punto se debe considerar igualmente la alteración diagenética como consecuencia de la profundidad de enterramiento de las dos localidades, donde se

observa variación del régimen de depósito y alteración diagenética. Como sugiere Gray *et al.*, (2001), la evolución tectónica y sedimentaria puede afectar significativamente los estratos rocosos de una misma sección expuesta a lo largo de una amplia zona, tal como ocurre con las localidades de Múzquiz Lagerstätte (véase también Boggs, 2009).

De manera semejante, la relación estratigráfica entre las canteras de Múzquiz Lagerstätte resulta problemática (ver esto y datos adicionales en Blanco-Piñón y Alvarado-Ortega, 2005; Stinnesbeck *et al.*, 2005; Alvarado-Ortega *et al.*, 2006; Vega *et al.*, 2007), porque está situada en área donde la estratigrafía es complicada *per se* debido a que ocurren cambios en las litofacies. Pero, como se muestra en los trabajos de Hancock y Walaszczyk (2004), un cambio en la facies es generalmente causado por variaciones en el nivel del mar. Probablemente, las facies siliciclásticas de la Eagle Ford cambian a secuencias pelágicas chalk de la Austin Chalk como consecuencia de un aumento en el nivel del mar durante el Cretácico Tardío (Young, 1986; Sohl *et al.*, 1991; Skelton *et al.*, 2003); por lo cual, es posible sugerir que las sucesiones de Múzquiz son probablemente el resultado de un régimen sedimentario alternante dentro de los límites de ambas unidades rocosas.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar, F., Porrás-Múzquiz, H., 2009. Los fósiles del Museo de Múzquiz A. C. y su resguardo patrimonial por el Instituto Nacional de Antropología e Historia. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, v. 61, 2, 147-153.
- Allison P.A., Briggs D.E.G., 1991. Taphonomy of Nonmineralized Tissues. En: Allison P.A., Briggs D.E.G. (Eds.), *Taphonomy, Releasing the Data Locked in the Fossil Record*, Plenum Press, New York, 26-58.
- Allison, P.A., 1988. Konservat-Lagerstätten: Cause and Classification. *Paleobiology*, v. 14, 4, 331-344.
- Alvarado-Ortega, J., Porrás-Múzquiz, H., 2009. On the occurrence of *Gillicus arcuatus* (Cope, 1875) (Pisces, Ichthyodectiformes) in Mexico. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, v. 61, 2, 215-224.
- Alvarado-Ortega, J., Espinosa-Arrubarrena, L., Blanco-Piñón, A., Vega, F., Benammi, M., Briggs, D.E.G., 2007. Exceptional preservation of soft tissues in cretaceous fishes from the Tlayúa Quarry, Central México. *Palaios*, v. 22, 682-685.
- Alvarado-Ortega, J., Blanco-Piñón, A., Porrás-Múzquiz, H., 2006. Primer registro de *Sauroidon* (Teleostei: Ichthyodectiformes) en la cantera La Mula, Grupo Eagle Ford (Cretácico Superior: Turoniano), Múzquiz, Estado de Coahuila, México, *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 23, 107-112.

- Applegate, S.P., L. Espinosa-Arrubarrena, J. Alvarado-Ortega & M. Benammi. 2006. Revision of Recent investigations in the Tlayúa quarry. En: Vega, F.J., Nyborg, T.G., Perrilliat, M.C., Montellano-Ballesteros, M., Cevallos-Ferriz, S.R.S., Quiróz-Barroso, S.A. (eds.) *Studies on Mexican Paleontology*: Springer, Dordrecht, The Netherlands, Topics in Geobiology, 24, 265-291.
- Barbosa-Luna, D., Bucio-Espinoza, J.L., Montiel-Escobar, J.E., Bustos-Moreno, M.A., 2008a. Geology of Northern Coahuila. En: Servicio Geológico Mexicano (Eds.), *Carta Geológica–Minera Ciudad Acuña H14-7 (Coahuila), and Description*, 3.
- Barbosa-Luna, D., Bucio-Espinoza, J.L., Montiel-Escobar, J.E., Bustos-Moreno, M.A., 2008b. Geology of Northern Coahuila. En: Servicio Geológico Mexicano (Eds.), *Carta Geológica–Minera SN Miguel H13-12 (Coahuila), and Description*, 3.
- Barthel, K. W., N. H. M. Swinburne, S. Conway Morris. 1990. Solnhofen. A study in Mesozoic palaeontology. *Cambridge University Press*. Cambridge, 236.
- Blanco-Piñón, A., Alvarado-Ortega, J., 2005. Fishes from la Mula Quarries, a new Late Cretaceous Locality from The vicinity of Múzquiz, Coahuila, NE México. En: Poyato-Ariza, F.J. (Ed.), *Fourth Internacional Meeting on Mesozoic Fishes – Systematics, Homology, and Nomenclature, Extended Abstracts*, España-UAM-Mex., 37-41.
- Blanco-Piñón, A., 2003. *Peces fósiles de la Formación Agua Nueva (Turoniano) en el Municipio de Vallecillo, Nuevo León, NE-México*. Tesis de Doctorado, Universidad Autónoma de Nuevo León, 345.
- Blanco, A., Stinnesbeck, W., López-Oliva, J.G., Frey, E., Adatte, T., González, A.H., 2001. Vallecillo, Nuevo León: una nueva localidad fosilífera del Cretácico Tardío en el noreste de México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 18, 2, 186-199.

- Behrensmeyer, A. K.; Kidwell, S. M.; Gastaldo, R. A. (2000). Taphonomy and Paleobiology. *Paleobiology* 26, 4, 103–147.
- Bernal, J. P., L. B. Railsback. 2008. Introducción a la Tabla Periódica de los Elementos y sus Iones para Ciencias de la Tierra. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 25,2, 236-246.
- Boggs, S., 2009. *Petrology of Sedimentary Rocks*. Cambridge University Press, 311-555.
- Botjer, D.J., Etter, W., Hagadorn, J.W., Tang, C.M., 2002. Fossil-Lagerstätten: Jewels of the Fossil Record. En: Botjer, D.J., Etter, W., Hagadorn, J.W., Tang, C.M. (Eds.), *Exceptional Fossil Preservation, A Unique View of the Evolution of Marine Life*, Columbia University Press, New York, 1-10.
- Brett, C.E., Seilacher, A., 1991. Fossil Lagerstätten: a taphonomic consequence of event sedimentation. En: Einsele, G., Ricken, W., Seilacher, A. (Eds.), *Cycles and Events in Stratigraphy*, Springer-Verlag, Berlín, 283-297.
- Briggs, D.E.G., Moore, R.A., Shultz, J.W., Schweigert, G., 2005. Mineralization of soft-part anatomy and invading microbes in the horseshoe crab *Mesolimulus* from the Upper Jurassic Lagerstätte of Nusplingen, Germany. *Proc. R. Soc. B*, 272, 627–632.
- Briggs, D.E.G., 2003. Exceptionally Preserved Fossils. En: Briggs, D.E.G., Cowther, P.R. (Eds.) *Palaeobiology II*, Blackwell Publishing. Malden, USA, 328-332.
- Briggs, D.E.G., 1997. Molecular taphonomy of animal and plant cuticles: selective preservation and diagenesis. *Phil.Trans. R. Soc. Lond. B*, 354, 7-17.
- Briggs, D.E.G., Kear, A.J., Martill, D.M., Wilby, P.R., 1993. Phosphatization of soft-tissue in experiments and fossils. *Journal of the Geological Society*, v. 150, 6, 1035-1038
- Buchy, M.C., Smith, K.T., Frey, E., Stinnesbeck, W., González-González, A.H., Ifrim, C., López-Oliva, J.G., Porras-Muzquiz, H., 2005. Annotated catalogue of marine

- squamates (Reptilia) from the Upper Cretaceous of northeastern Mexico. *Netherlands Journal of Geosciences — Geologie en Mijnbouw*, v. 84, 3, 195 – 205.
- Cléroux, C., Cortijo, E., Anand, P., Labeyrie, L. Bassinot, F., Caillon, N., Duplessy, J.C., 2008. Mg/Ca and Sr/Ca ratios in planktonic foraminifera: Proxies for upper water column temperature reconstruction. *Paleoceanography*, v. 23: 3214.
- Dawson, W.C., 1997. Limestone Microfacies and Sequence Stratigraphy: Eagle Ford Group (Cenomanian-Turonian) North-Central Texas Outcrops. *GCAGS Transactions*, 99-105.
- De Yoreo, J.J., Vekilov, P.G., 2003. Principles of Crystal Nucleation and Growth, in: Dove, P.M., De Yoreo, J.J., Weiner, S. (Eds.) *Biomineralization. Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, MSA, v.54, 3.
- Donoghue, P. J., Bengtson, S., Dong, X., Gostling, N.J., Huldtgren, T., Cunningham, J. A., Yin, Ch., Yue, Z., Peng, F., Stampanoni, M., 2006. Synchrotron X-ray tomographic microscopy of fossil embryos. *Nature* 442, pp. 680-683.
- Dornbos, S.Q., 2010. Phosphatization through the Phanerozoic, in: Allison, P.A., Bottjer, D.J. (Eds.), *Taphonomy: Process and Bias through Time*. Aims & Scopes Topics in Geobiology Book Series, Springer, v. 32, 435-453.
- Davis, J.J., 1980. *Sedimentology and Diagenesis of the Upper cretaceous Austin Chalk Formation, South Texas and Northern Mexico*. PhD Thesis, Rice University, 511.
- Efremov, I. A., 1940, Taphonomy, a new branch of paleontology. *Pan-American Geologist* (1940), v. 74, 81-93
- Eguiluz de Antuñano, S., 2001. Geologic evolution and gas resources of the Sabinas Basin in Northeastern Mexico. En: Bartolini, C., Buffler, R.T., Cantú-Chapa, A. (Eds.), *The*

- western Gulf of Mexico Basin: Tectonics, sedimentary basins, and petroleum systems*, American Association of Petroleum Geologists Memoir 75, 241-270.
- Emerson, S., Bender, M., 1981. Carbon fluxes at the sediment-water interface of the deep-sea: calcium carbonate preservation, *J Marine Res.* 39, 139–162.
- Espinosa-Arrubarrena, L. y S. P. Applegate. 1996. A possible model for the paleoecology of the vertebrate bearing beds in the Tlayúa quarries, near Tepexi de Rodríguez, Puebla, México. En: Arratia, G. y Viohl, G. (eds.); *Mesozoic Fishes-Systematics and Paleocology*, Verlag Dr. Friedrich Pfeil München, Alemania, 539-550.
- Flügel, E., 2004. Microfacies of carbonate rocks. Analysis, interpretation and application, *Springer-Verlag*, Berlín, 73-176.
- Folk, R.L., 1959. Practical petrographical classification of limestones. *Amer. Ass. Petrol. Geol. Bull.*, 43, 1-38.
- Frankel, R.B., Bazylinsk, D.A., 2003. Biologically Induced Mineralization by Bacteria. En: Dove, P.M., DeYoreo, J.J., Weiner, S. (Eds.), *Biomineralization. Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, v. 54, 95-114.
- Fraser, D. G. 1995. The nuclear micropobe- PIXE, PIGE, RBS, NRDA and ERDA. pp. En: Potts, P.J., Bowles J.F.W., Reed S. J. 6 Cave, M. R. (eds), *Microprobe Techniques in the Earth Sciences*: Chapman & Hall, London,141-160
- Frey, E., Buchy, M.C., Stinnesbeck, S., González-González, A., Di Stefano, A., 2006. *Muzquizopteryx coahuilensis* n.g., n. sp., a nyctosaurid pterosaur with soft tissue preservation from the Coniacian (Late Cretaceous) of northeast Mexico (Coahuila), *Oryctos*, 6, 47-66.
- Gale, A.S., Hancock, J.M., Kennedy, W.J., Petrizzo, M.R., Lees, J.A., Walaszczyk, I., Wray, D.S., 2008. An integrated study (geochemistry, stable oxygen and carbon isotopes,



nannofossils, planktonic foraminifera, inoceramid bivalves, ammonites and crinoids) of the Waxahachie Dam Spillway section, north Texas: a possible boundary stratotype for the base of the Campanian Stage. *Cretaceous Research* 29, 131-167

Gall, J.C., 2003. Role of Microbial Mats, in: Briggs, D.E.G., Cowther, P.R. (Eds.), *Palaeobiology II*, Blackwell Publishing, Malden, USA, 280-284.

Goldhammer, R.K., Johnson, C.A., 2001. Middle Jurassic-Upper Cretaceous Paleogeographic Evolution and Sequence-stratigraphic Framework of the Northwest Gulf of Mexico Rim: *American Association of Petroleum Geologists Memoir* 75, 45-81.

Goldhammer, R.K., 1999. Mesozoic sequence stratigraphy and paleogeographic evolution of northeast Mexico, in: Bartolini, C., Wilson, J.L., Lawton, T.F. (Eds.), Mesozoic sedimentary and Tectonic History of North-Central Mexico, Boulder- Colorado, EUA, *Geological Society of America Special Paper*, 340, 1-58.

Goldring, R., 1985. Extraordinary Fossil Biotas: Their Ecological and Evolutionary Significance, *Phil.Trans. R. Soc. Lond. B, Biological Sciences*, v. 311, 1148, 25-26.

González-Barba, G. and Espinosa-Chavez, B. (2005): Cenomanian-Turonian fish fauna from the Boquillas Formation at Jaboncillos, North-West Coahuila, Mexico. En: Poyato-Ariza, F.: *Fourth International Meeting on Mesozoic Fishes – Systematics, Homology and Nomenclature— Extended Abstracts*, 105-108.

Goodwin, M.B., Grant, P.G., Bench, G., Holroyd, P.A., 2007. Elemental composition and diagenetic alteration of dinosaur bone: Distinguishing micron-scale spatial and compositional heterogeneity using PIXE. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 253, 458–476.

- Gray, G.G., Pottorf, R.J., Yurewicz, D.A., Mahon, K.I., Pevear, D.R., Chucla, R.J., 2001. Thermal and chronological record of syn-to post-Laramide burial and exhumation, Sierra Madre Oriental, México. En: Bartolini, C., Buffler, R.T., Cantú-Chapa, A. (eds.), *The western Gulf of Mexico Basin: Tectonics, sedimentary basins, and petroleum systems*, AAPG Memoir 75, 159-181.
- Gupta N. S., O. E. Tetlie, D. E. G. Briggs & R. D. Pancost. 2007. The fossilization of Eurypterids: A result of molecular transformation. *Palaios*, v. 22, 439–447.
- Hancock, J.M., Walaszczyk, I., 2004. Mid-Turonian to Coniacian changes of sea level around Dallas, Texas. *Cretaceous Research* 25, 459-471.
- Hone, D.W.E., Tischlinger, H., Xu, X., Zhang, F., 2010. The Extent of preserved feathers on the Four-Winged dinosaur *Microraptor gui* under Ultraviolet Light. *Plos One*, v. 5, 2, 9223.
- Ifrim, C., Stinnesbeck, W., 2008. Cenomanian-Turonian high-resolution biostratigraphy of north-eastern Mexico and its correlation with the GSSP and Europe. *Cretaceous Research* 29, 943–956.
- Jiang, M.J., 1989. *Biostratigraphy and geochronology of the Eagle Ford Shale, Austin Chalk and lower Taylor Marl in Texas based on calcareous nannofossils*. PhD Thesis, Texas A & M University, 524.
- Johansson, S.A.E., Campbell, J.L., Malmqvist, K.G., 1995. Particle-Induced X-ray Emission Spectrometry (PIXE). En: Widefrodner, J.D. (Ed.), *Chemical Analysis: Series of monograph on analytical chemistry and its applications*, John Wiley & Sons, New York, 133.

- Kashiyama, Y., D. E. Fastovsky, S. Rutherford, J. King y M. Montellano. 2004. Genesis of a locality of exceptional fossil preservation: paleoenvironments of Tepexi de Rodríguez (mid-Cretaceous, Puebla, Mexico), *Cretaceous Research*, 24:407-431.
- Kellner, A.W.A., Wang, X., Tischlinger, H., de Almeida Campos, D., Hone, D.W.E., Meng, X., 2010. The soft Tissue of Jeholopterus (Pterosauria, Anurognathidae, Batrachognathinae) and the structure of the pterosaur wing membrane. *Proc. R. Soc. B*, 227, 321-329.
- Keupp, H., 1994. Aspects of the origin of the Solnhofen lithographic limestone facies based on a new core drilling in the Maxberg quarry. *GEOBIOS* 27, 1, 71-80
- Kinsman, D.J.J., 1969. Interpretation of  $Sr^{+2}$  concentrations in carbonate minerals and rocks. *J. Sed. Petrol.*, 39, 486-508.
- Land, L.S., 1986. Limestone Diagenesis –some geochemical considerations. En: Mumpton, F.A. (ed.) *Studies in Diagenesis*: US Geological Survey Bulletin 1578, 129-137.
- Larson, P.A., Morin, R.W., Kauffman, E.G., Larson, A., 1991. Sequence stratigraphy and cyclicity of lower Austin/upper Eagle Ford outcrops (Turonian-Coniacian), Dallas County, Texas. *Dallas Geological Society, Guidebook Field Trip #9*, 61.
- Liebig, K., 2003. Bacteria. En: Briggs, D.E.G., Cowther, P.R. (Eds.), *Palaeobiology II*, Blackwell Publishing. Malden, USA, 253-256.
- Lucas, J., Prévôt, L.E., 1991. Phosphates and Fossil Preservation. En: Allison, P.A., Briggs, D.E.G. (Eds.), *Taphonomy. Releasing the Data Locked in the Fossil Record*, Plenum Press. New York, 389-405.
- Logan, G. A., M. J. Collins, G. Eglinton. 1991. Preservation of Organic Biomolecules. En: Allison, P. A., Briggs, D. E. G (Eds.), *Taphonomy. Releasing the Data Locked in the Fossil Record*. Plenum Press. New York, 1-18.

- Mann, S., 2001. *Biomineralization, principles and concepts in bioinorganic materials chemistry*. Oxford University Press. 193.
- Martill, D.M., Ibrahim, N., Brito, P.M., Baider, L., Zhouri, S., Loveridge, R., Naish, D., Hing, R., 2011. A new Plattenkalk Konservat Lagerstätte in the Upper Cretaceous of Gara Sbaa, south-eastern Morocco. *Cretaceous Research* 32, 4, 433-446.
- Martill, D.M., 2003. The Santana Formation, in: Briggs, D.E.G., Cowther, P.R. (Eds.), *Palaeobiology II*, Blackwell Publishing. Malden, USA, 351-356.
- Martill, D.M., 1990. Macromolecular resolution of fossilized muscle tissue from an elopomorph fish. *Nature*, v. 346, 171–172.
- Martill, D.M., 1989. The Medusa effect: Instantaneous fossilization, *Geology Today*, v. 5, 201–205.
- McNulty, C., 1966. Nomenclature of Uppermost Eagle Ford Formation in Northeastern Texas, *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists*, v. 50, 2, 375-396.
- Munnecke, A., Westphal, H., Kölbl-Ebert, M., 2008. Diagenesis of plattenkalk: examples from the Solnhofen area (Upper Jurassic, southern Germany). *Sedimentology* 55, 1931–1946.
- Munnecke, A., Westphal, H., 2005. Variations in primary aragonite, calcite, and clay in fine-grained calcareous rhythmites of Cambrian to Jurassic age – an environmental archive? *Facies*, 51, 611–626.
- Munnecke, A., Westphal, H., 2004. Shallow-water aragonite recorded in bundles of limestone–marl alternations – the Upper Jurassic of SW Germany. *Sed. Geol.*, 164, 191–202.

- Munnecke, A., Samtleben, C., 1996. The formation of micritic limestones and the development of limestone–marl alternations in the Silurian of Gotland, Sweden, *Facies*, 34, 159–176.
- Myers, T., 2010. Earliest occurrence of the Pteranodontidae (Archosauria: Pterosauria) in North America: New material from the Austin Group of Texas. *Journal of Vertebrate Paleontology*, v. 84; 6, 1071-1081.
- Nyborg, T., Alvarado-Ortega, J., Blanco, A., Vega, F.J., 2005. Taphonomy of fish preserved within ammonite chambers from the Upper Cretaceous Austin Group, Coahuila, México. *Geological Society of America-Abstracts with Programs*, 37, 15.
- Orr, P.J., Kearns, S.L., Briggs, D.E.G., 2009. Elemental mapping of exceptionally preserved ‘carbonaceous compression’ fossils. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 277: 1–8.
- Pantoja-Alor, J. 1992. Geología y paleoambientes de la Cantera Tlayúa, Tepexi de Rodríguez, estado de Puebla. Universidad Nacional Autónoma de México, *Revista del Instituto de Geología*, 9, 2, 156-176.
- Paulson, O.L., 1968. Correlations in Austin group of Texas, *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, v. 52, 5, 864-866.
- Peterson P. J., Summons, R.E., Donnoghue, P.J., 2007. Molecular Palaeobiology. *Palaeontology*, v. 50, 4, 775–809.
- Qiu, S.R., Orme, C.A., 2008. Dynamics of Biomineral Formation at the Near-Molecular Level, *Chem. Rev.* 108, 4784–4822.
- Raff, E. C., K. L. Schollaerta, D. E. Nelsona, P.C. J. Donoghuec, C. Thomasc, F. R. Turnera, B. D. Steina, X. Dongd, S. Bengtsone, T. Huldtgrene, M. Stampanonigh, Y. Chongyui,

- Raff, R.A., 2008. Embryo fossilization is a biological process mediated by microbial biofilms. *PNAS*, v. 105, 49, 19359–19364.
- Riquelme, F., Alvarado-Ortega, J., Ruvalcaba-Sil, J.L., Hornelas-Orozco, Espinoza- Matías, S., Linares-López, C., Aguilar-Franco, M., 2010. Microanálisis ultraestructural y multielemental en la fosilización selectiva de localidades Lagerstätten del Cretácico Tardío (Turoniano) en Coahuila, México. *Memorias del X Congreso Nacional de Microscopía*, México, 3.
- Riquelme, F., 2009, *Paleontología molecular: Preservación excepcional de tejidos no-mineralizados fósiles del Cretácico temprano (Albiano) de la Cantera Tlayúa, una Konservat-Lagerstätte de Puebla, México*. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México, 149.
- Riquelme, F., Ruvalcaba-Sil, J.L., Alvarado-Ortega, J., 2009. Palaeometry: Non-destructive analysis of fossil materials. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, v. 61, 2, 177-183.
- Ruvalcaba-Sil, J.L., 2002. Las técnicas de origen nuclear: PIXE y RBS, in: Del Egado, M.A., Calderón, T. (Eds.), *La Ciencia y el Arte, Instituto del Patrimonio Histórico Español: IPHE-CSI*, Madrid, 151-172.
- Sanderman, J., Amundson, R., 2003. Biogeochemistry of Decomposition and Detrital Processing, En: Holland, H.D., Turekian, K.K. (Eds.), *Treatise on Geochemistry*, Elsevier Pergamon, Oxford, 249-316.
- Scholle, P.A., Ulmer-Scholle, D.S., 2003. *A color Guide to the Petrography of Carbonate Rocks: Grains, Textures, Porosity, Diagenesis*, AAPG Memoir 77.
- Schultze, H.P., 1989. Three-Dimensional muscle preservation in Jurassic fishes of Chile. *Revista Geológica de Chile*, v. 16, 2, 183-215.

- Schweitzer, M. H., R. Avci, T. Collier, M. B. Goodwind. 2008. Microscopic, chemical and molecular methods for examining fossil preservation. *C. R. Palevol* 7, 159–184.
- Seilacher, A., Reif, W.E., Westphal, F., Riding, R., Clarkson, E.N.K., Whittington, H.B., 1985. Sedimentological, ecological and temporal patterns of fossil Lagerstätten (and Discussion), *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B*, v. 311, 1148, 5-24.
- Seilacher, A., 1970. Begriff und Bedeutung der Fossil-Lagerstätten, *Neues Jahrb. Geol. Paläontol. Abh.* 34-39.
- Selden, P., Nudds, J., 2004. *Evolution of Fossil Ecosystems*. Manson Publ. Ltd., London, UK, 160.
- Shewfelt, R.L., 1981. Fish Muscle Lipolysis-A Review, *Journal of Food Biochemistry* 5, 79-100.
- Skelton, P.W., Spicer, R.A., Kelley, S.P., Gilmour, I., 2003. *The Cretaceous World*. Cambridge University Press, Cambridge, 360.
- Smith, C.C., 1981. Calcareous nanoplankton and stratigraphy of late Turonian, Coniacian, and early Santonian age of the Eagle Ford and Austin Groups of Texas. *U.S. Geological Survey Professional Paper*, 1075, 98.
- Sohl, N.F., Martínez, R.E., Salmerón-Ureña, P., Soto-Jaramillo, F., 1991. Upper Cretaceous. En: Salvador, A. (Ed.), *The Geology of North America, v. J: The Gulf of Mexico Basin*, Geological Society of America, Boulder-Colorado, 205–244.
- Stinnesbeck, W., Ifrim, C., Schmidt, H., Rindfleisch, A., Buchy, M.C, Frey, E., González-González, A.H., Vega, F.J., Cavin, L., Keller, G., Smith, K.T., 2005. A new lithographic limestone deposit in the Upper Cretaceous Austin Group at El Rosario, county of Múzquiz, Coahuila, northeastern Mexico, *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 22: 3, 401-418.



- Suarez, M., L. González, G. Ludvingson, F. Vega & J. Alvarado-Ortega. 2009. Isotopic composition of tropical paleo-precipitation during the Early Cretaceous. *Geological Society of America, Bulletin*, 121 (11-12), 1584-1595.
- Taut, T., Kleeberg, R., Bergmann, J. 1988. The new Seifert Rietveld program BGMN and its application to quantitative phase analysis. *Materials Science, Bulletin of the Czech and Slovak Crystallographic Association* 5, 55–64.
- Tischlinger, H., Frey, E., 2002. Ein Rhamphorhynchus (Pterosauria, Reptilia) mit ungewöhnlicher Flughauterhaltung aus dem Solnhofener Plattenkalk, *Archaeopteryx*, 20, 1-20.
- Tsuji, K., J. Injuk & R. Grieken. 2004. *X-ray Spectrometry: Recent Technological Advances*. John Wiley and Sons. 603.
- Tucker, M. E., 1993. Carbonate Diagenesis and sequence stratigraphy. En: Wright, V. P. (ed.), *Sedimentology review*, v. 1, Wiley-Blackwell Scientific, Oxford, 51-72.
- Tucker, M.E., Wrigth, V.P., 1990. *Carbonate Sedimentology*. Blackwell Scientific, Oxford, 482.
- Vega, F.J., Nyborg, T., Rojas-Briceño, A., Patarroyo, P., Luque, J., Porrás-Múzquiz, H., Stinnesbeck, W., 2007. Turonian Crustacea from Mexico and Colombia Upper Cretaceous Crustacea from Mexico and Colombia, similar faunas and environments during Turonian times, *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 24 (3), 403-422.
- Viohl, G., 1994. Fish taphonomy of the Solnhofenplattenkalk-an approach to the reconstruction of the palaeoenvironment. *Geobios* 27, 1, 81-90.
- Visscher, P.T., Stolz, J.F., 2005. Microbial mats as bioreactors: populations, processes and products, *Paeologogr. Paleoclimatol. Paleoecol*, 219, 87–100.

- Weigelt, J. 1989. *Recent vertebrate carcasses and their paleobiological implications*.  
University of Chicago Press, 188.
- Weiner, S., 2008. Biomineralization: A structural perspective Review Article Journal of  
Structural Biology, v. 163, 3, 229-234.
- Weiner, S., Dove, P.M., 2003. An overview of biomineralization processes and the  
problem of the vital effect, in: Dove, P.M., De Yoreo, J.J., Weiner, S. (Eds.),  
*Biomineralization, Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, MSA, v. 54, 1-29.
- Westphal, H., 2006. Limestone–marl alternations as environmental archives and the role  
of early diagenesis: a critical review. *Int J Earth Sci (Geol Rundsch)*, 95, 947–961
- Westphal, H., Munnecke, A., Pross, J., Herrle, J., 2004. Multiproxy approach to  
understanding the origin of Cretaceous pelagic limestone–marl alternations (DSDP  
Site 391, Blake-Bahama Basin), *Sedimentology*, 51, 109–126.
- Wilby, P.R., Briggs, D.E.G., Bernier, P., Gaillard, C., 1996. Role of microbial mats in the  
fossilization of soft tissues, *Geology*, v. 24, 787–790.
- Wilby, P.R., Martill, D.M., 1992. Fossil fish stomachs: A microenvironment for  
exceptional preservation, *Historical Biology*, v. 6, 25–36.
- Williams, R.J.P., 2008. Some fundamental features of biomineralization, in: Austin,  
W.E.N., James, R.H., James, R.(Eds.), *Biogeochemical controls on  
palaeoceanographic environmental proxies*, Geological Society of London, 303, 33-  
59.
- Wright, E.K., 1987. Stratification and paleocirculation of the Late Cretaceous Western  
Interior Seaway of North America, *GSA Bulletin*, v. 99, 4, 480-490.
- Young, K., 1986. Cretaceous, Marine Inundations of the San Marcos Platform, Texas.  
*Cretaceous Research*, 7, 117-140.

Young, K., 1985. The Austin division of central Texas, In: *Austin Chalk in its Type area; Stratigraphy and Structure: Austin, TX* (ed. Woodruff CM), Austin Geological Society Guidebook, 7, 3-52.

Young, K., Marks, E., 1952. Zonation of Upper Cretaceous Austin Chalk and Burditt Marl, Williamson County, Texas; *AAPG Bulletin*, v. 36, 3, 477-488.




## 7. ANEXO

### **7.1 Fossil fingerprints and microbial biomineralization on fish soft tissues from the Múzquiz Rythmites Late Cretaceous Lagerstätte, México.**

Artículo enviado a revisión al Journal: Geobiology (Agosto, 2011).

Geobiology



**Fossil fingerprints and microbial biomineralization on fish soft tissues from the Múzquiz Rythmites Late Cretaceous Lagerstätte, México.**

Journal:	Geobiology
Manuscript ID:	Draft
Manuscript Type:	Standard Research Paper
Key Words:	Konservat-Lagerstätte , Molecular Taphonomy, Biomineralization, PIXE

SCHOLARONE™  
Manuscripts

Draft Only

1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22  
23  
24  
25  
26  
27  
28  
29  
30  
31  
32  
33  
34  
35  
36  
37  
38  
39  
40  
41  
42  
43  
44  
45  
46  
47  
48  
49  
50  
51  
52  
53  
54  
55

**Abstract**

*A non destructive PIXE analysis is complemented by UV-Ligth microscopy inspection, micro-scale XRD, SEM and EDX on Molecular Taphonomy research of ancient soft tissues from the Múzquiz Lagerstätte (Late Turonian- Early Coniacian) of Northern México.*

*Results show digestive tract and muscle tissues of fishes preserved with cellular and subcellular features. Also fossil biofilm with bacteria and fungi cells were exceptional preserved. XRD detects cryptocrystalline Fluorapatite and Calcite involved on preservation. Likely ancient microbes and soft tissues were biomineralized at cellular level induced by spontaneous reaction in supersaturated solution into pore-water. here is referred to as the Cristal seed effect. This suggests that muscle mass was biomineralized by dissolved phosphate and amorphous calcite in a saline solution (seawater) as the precipitant factor during temperature increase in early burial. Also we report that mineral nucleation takes the organic material such as templates of crystal growth; hence, fungi, bacteria and spider-web-like biofilm were preserved as casts and moulds.*

*The Chemical state of soft tissues by PIXE measurements show diagnostic values of Strontium (10784 µgr/gr) , Sulfur (2657 µgr/gr), and 0. 346 P/Ca ratio. Phosphorus increases by a factor of more than 4 compared with sediment. Adittionally, a Mg/Ca correlation on the laminated sediments is detected, probably associated to episodic deposition of calcareous nanoplankton at limited depths.*

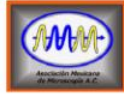
*Evidences suggest that Múzquiz rythmites were deposited under the strong influence of stratified sea-water mass, and are a part of carbonate successions of subtropical shallow-water that are found throughout the Western Interior Sea deposits of the Cretaceous.*

1  
2  
3  
4

*Key words: Konservat-Lagerstätte, Molecular Taphonomy, Biomineralization, PIXE.*

## 7.2 Microanálisis Ultraestructural y Multielemental en la Fosilización Selectiva de Localidades Lagerstätten en el Cretácico Tardío (Turoniano) en Coahuila, México.

Ponencia presentada en el X Congreso Nacional de Microscopía, México, Octubre, 2010.



X Congreso Nacional de Microscopía-Morelia

201  
0

### MICROANÁLISIS ULTRAESTRUCTURAL Y MULTIELEMENTAL EN LA FOSILIZACIÓN SELECTIVA DE LOCALIDADES LAGERSTÄTTEN DEL CRETÁCICO TARDÍO (TURONIANO) EN COAHUILA, MÉXICO.

Francisco Riquelme<sup>1</sup>, Jesús Alvarado Ortega<sup>1</sup>, José Luis Ruvalcaba Si<sup>2</sup>, Yolanda Homelas Orozco<sup>3</sup>, Silvia Espinoza Matias<sup>4</sup>, Carlos Linares López<sup>5</sup> y Manuel Aguilar Franco<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Posgrado de Ciencias Biológicas, Instituto de Geología, UNAM, 04510, México

<sup>2</sup> Instituto de Física, UNAM, 20-364, México.

<sup>3</sup> Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM, 04510, México

<sup>4</sup> Facultad de Ciencias, UNAM, 04510, México

<sup>5</sup> Instituto de Geofísica, UNAM, 04510, México

Email: [riquelme.fc@gmail.com](mailto:riquelme.fc@gmail.com)

#### INTRODUCCIÓN

La fosilización selectiva en depósitos de conservación excepcional o localidades *Konservat-Lagerstätten* [1], representa una fuente importante de información sobre la biología de los organismos extintos y la evolución de los ecosistemas. Este tipo de fosilización extraordinaria preserva organismos con esqueletos articulados y tejido blando, además de la mineralogía original correlacionada con el ambiente de depósito.

El presente trabajo de investigación estudia los procesos biológicos, físicos y químicos que afectan a la preservación fósil (Tafonomía) en una serie de pequeñas canteras fosilíferas tipo *Konservat-Lagerstätten*, las cuales afloran en las proximidades de la ciudad de Múzquiz, al Noroeste del Estado de Coahuila, México [2]

Las canteras El Pilote y Palestina comparten una litología similar de margas y calizas, forman parte de una secuencia sedimentaria repetitiva con una edad geológica del Turoniano tardío, cuyo ambiente sedimentario se ha interpretado como una cuenca marina abierta en una plataforma carbonatada.

Los ejemplares fósiles aparecen tanto típicamente aplanados como tridimensionalmente preservados en las interfaces laminares de sedimentos alternados de margas a calizas, las cuales representan un tipo particular de ritmitas calcáreas de grano fino.

Un estudio de alta resolución con técnicas combinadas de análisis de imágenes y composición elemental en las muestras de tejido fósil permite caracterizar el proceso de biomineralización y degradación orgánica ocurrido a tal clase de material biológico preservado en matrices rocosas [3]. Dos herramientas básicas en este tipo de estudios es la Microscopía Electrónica de Barrido y la Microscopía con Fluorescencia Uv, mediante las cuales se realiza la caracterización ultraestructural de tejidos, células microbianas y sustrato calcáreo. La presente investigación está enfocada en la caracterización de los rasgos tafonómicos a nivel celular y molecular ocurridos en la biota fósil de Múzquiz, aplicando análisis ultraestructurales por MEB y Micro-Fluorescencia UV, además de análisis multielementales por microsonda EDS,  $\mu$ -DRX y PIXE.

#### METODOLOGÍA

Siguiendo criterios de cualidad de preservación y diversidad de estructuras orgánicas conservadas se seleccionaron 2 ejemplares fósiles: el ejemplar *MUZ 596b* (pez teleosteo indeterminado) de la Cantera Palestina; y *MUZ 13b* (pez Pachirhyzodontiforme) de la Cantera El Pilote. El micromuestreo de tejido blando y sustrato se realizó usando un Estereomicroscopio Olympus con cámara integrada mediante agujas quirúrgicas y cortes milimétricos paralelos al patrón de sedimentación.

Las características celulares y micromorfológicas de las muestras se obtuvieron usando un Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) JEOL modelo JSM-6360 del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM. Adicionalmente, se usó un equipo JEOL modelo JSM-5310 perteneciente a la Facultad de Ciencias,





UNAM. Se empleó alto vacío en muestras cubiertas con grafito y oro paladio. Las muestras de tejido blando se limpiaron previamente con agua desionizada y se sometieron a un periodo de digestión de carbonatos por EDTA 5% (2-4 min).

Se obtuvieron imágenes de tejido blando mediante Micro-Fluorescencia visible inducida por luz UV, empleando un Estereomicroscopio Olympus con cámara integrada, iluminando la muestra con un lámpara Black-Ray modelo B100 AP de 365 nm (LW) a 60 Watts, y una lámpara UVP modelo UVL-58 365 nm (LW) y 254nm (SW) a 8 Watts.

El análisis composicional de la muestras se obtuvo con un Espectrómetro de Energía Dispersada (EDS) multicanal, con un voltaje de aceleración de 20 keV, a un tiempo de adquisición de 30 a 60 segundos y una corriente de  $2.0 \times 10^{-8}$  A, el cual está instalado en un Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) JEOL modelo JXA8900-R del Laboratorio Universitario de Petrología (LUP) perteneciente al Instituto de Geofísica, UNAM.

Las micromuestras de tejido blando y sustrato fueron analizadas por Difracción de Rayos X (DRX) empleando un equipo Bruker AXS™ D8 Advanced del Instituto de Física, UNAM, siguiendo el método descrito en Riquelme, 2009 (3)

Especímenes completos, micromuestreo de tejidos y sustrato fueron sometidos a análisis multielementales por PIXE (*Espectroscopía de Emisión de Rayos X inducida por partículas*) [4], basados en el uso de la sonda externa de protones del acelerador Tandem 3MeV Pelletron del Instituto de Física, UNAM. Los ejemplares y muestras sometidos a un análisis multielemental no fueron tratadas con desmineralizantes o solventes, realizándose análisis *in situ* siguiendo una metodología descrita en Riquelme *et al.*, 2009[5].

## RESULTADOS

La figura 1 muestra los resultados del análisis de Micro-Fluorescencia UV. La Fig. 1.1 corresponde a la imagen microscópica compuesta con luz blanca de un corte longitudinal de muestra fósil conteniendo tejido blando (TB) perteneciente al músculo del pez Pachirrhynchodontiforme (*MUZ13b*). En contraste, en la Fig. 1.2 se observa el mismo tejido blando bajo microscopía con luz-UV; la señal de materia orgánica preservada es más evidente que bajo luz ambiental o blanca, debido a que la materia orgánica tiende a ser más fluorescente que las fases minerales presentes en el sustrato, evidenciando el tejido blando preservado. En la Fig. 1.3 se observa un gradiente tonal asociado a las diferencias en composición elemental en el tejido, es decir, los minerales que interaccionan químicamente con la materia orgánica durante el proceso de fosilización se depositan de manera diferencial aún sobre el mismo tejido. En este sentido, La micro-fluorescencia UV además de identificar la materia orgánica sirve como una herramienta preliminar para posteriores análisis químicos, puntualizando éstos de acuerdo al gradiente tonal que está asociado a una concentración biogeoquímica característica. La figura 2 muestra una serie de microfotografías MEB de paquetes musculares fosilizados. La Fig. 2.1 corresponde a un paquete muscular de la región abdominal de *MUZ 13b*, aislado a partir de la micro-prospección anterior por Fluorescencia UV. La Fig. 2.2 corresponde a un paquete muscular aislado de la cintura pélvica de *MUZ 596b*. La Fig. 2.3 es un segmento ampliado de la muestra anterior donde se aprecia la orientación de las fibras musculares fosilizadas (*FbM*) dentro de una fina matriz de fosfatos y carbonatos de calcio, ésta corresponde al sustrato donde el organismo se depositó y eventualmente se fosilizó. De acuerdo a los datos obtenidos por microsonda EDS los elementos mayoritarios son O, C, P, Si y Ca. Los resultados obtenidos por  $\mu$ -DRX demuestran que las fases minerales dominantes en tejido blando son la fluorapatita y la calcita autigénica. La fosilización por fosfatos y carbonato de calcio son dos de los tipos más espectaculares de preservación, incluso conservan estructuras celulares. Adicionalmente, datos obtenidos por PIXE muestran altas concentraciones de P, S, K, Ca, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, y Sr en el tejido blando, los cuales pueden funcionar como indicadores diagnósticos o *fingerprints* fósiles.

## CONCLUSIONES

La Paleontología Molecular se caracteriza por el uso combinado de análisis microscópicos, químicos y moleculares del material fósil [6]. De esta manera, la Microscopía Electrónica de Barrido y la Micro-Fluorescencia UV se convierten en herramientas imprescindibles para caracterizar la estructura y forma de





tejidos, células microbianas y micromorfologías de organismos ancestrales preservados en matrices rocosas. Estas técnicas forman parte de un programa de laboratorio especialmente diseñado para entender la degradación orgánica, los procesos de biomineralización y el ambiente sedimentario a un nivel estructural y composicional en las localidades de fosilización excepcional.

Figura 1. Micro-Fluorescencia UV

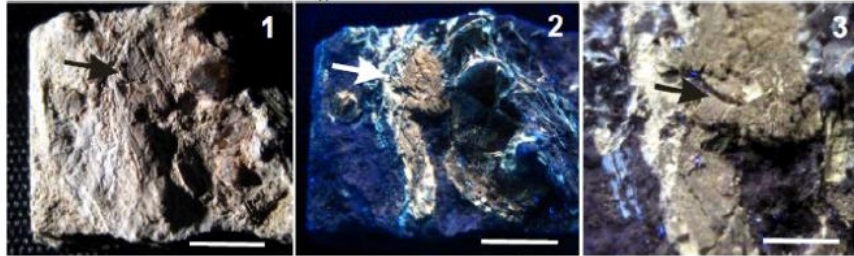


Fig. 1.1 imagen con luz blanca de un corte de tejido muscular en MUZ 13b (Barra de escala 1000  $\mu\text{m}$ ) Fig. 1.2 imagen con Fluorescencia UV (365 nm) del mismo corte (Barra de escala 1000  $\mu\text{m}$ ) Fig. 1.3 imagen UV (365nm) de un segmento ampliado del tejido anterior (Barra de escala 500  $\mu\text{m}$ )

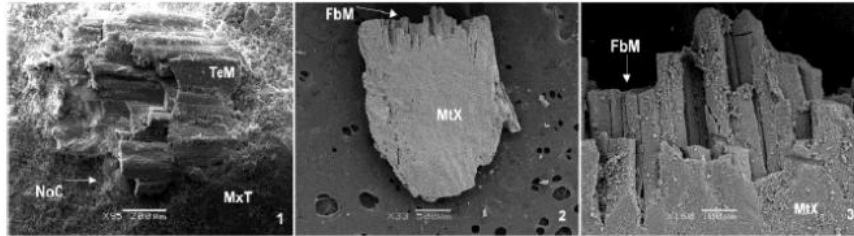


Figura 2. Microfotografía MEB

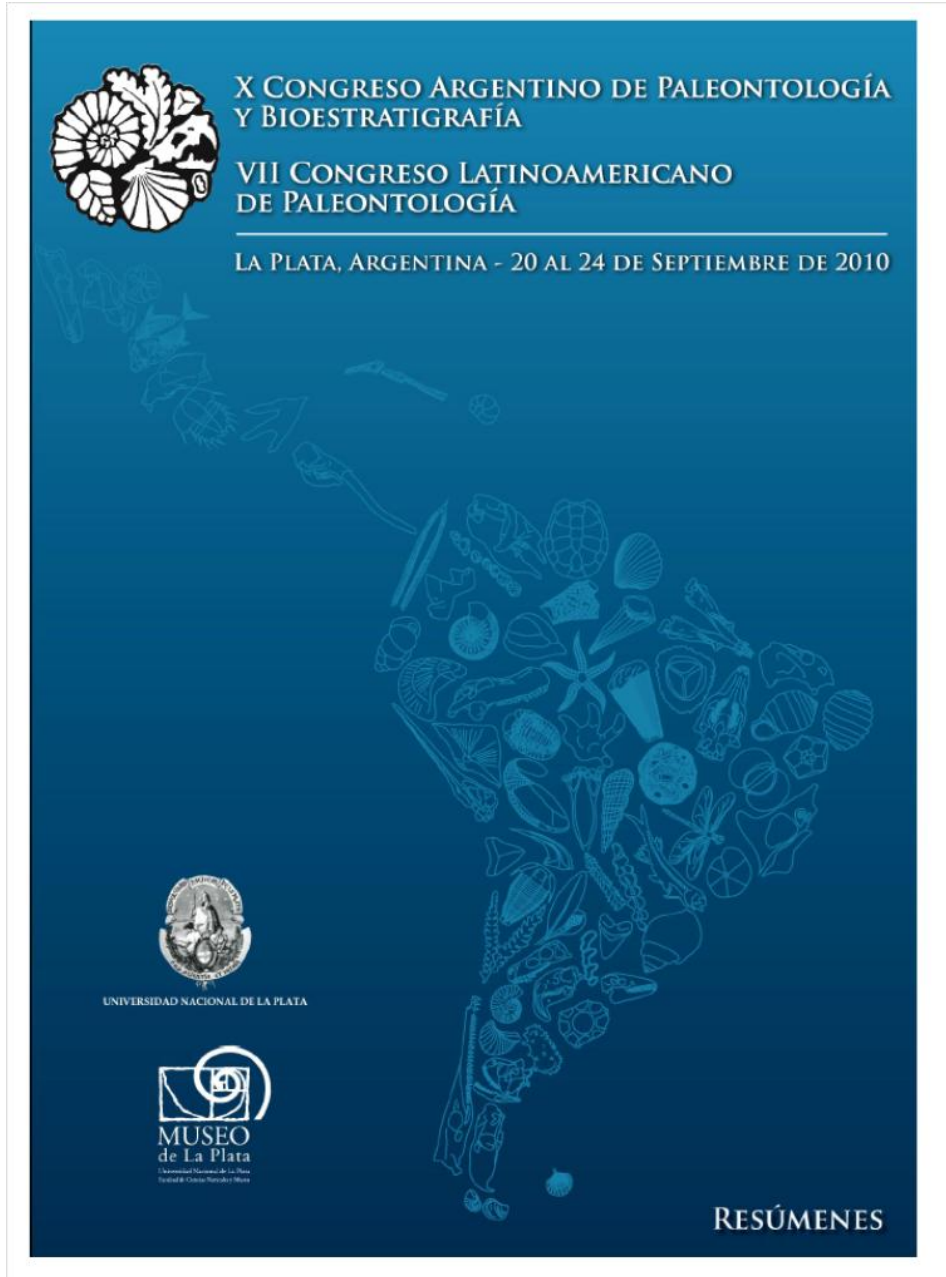
Fig. 2. 1 imagen de tejido muscular en MUZ 13b. Fig. 2.2 imagen de paquete de fibras musculares en MUZ 596a. Fig. 2.3 imagen ampliada de un segmento de la muestra anterior, se aprecia las fibras musculares preservadas en una fina matriz carbonato-fosfatada. (TeM: tejido muscular; FbM: fibra muscular; MxT: matriz sedimentaria; NoC: nódulo calcáreo)

#### REFERENCIAS

- [1] A. Seilacher, W. E. Reif, F. Westphal, R. Riding, E. N. K. Clarkson and H. B. Whittington. *Phil. Trans. R. Soc. B*, Vol. 311, 1148 (1985) 5.
- [2] J. Alvarado-Ortega and H. Porras-Muzquiz. *Bol. Soc. Geo. Mex.* Vol. 61, 2 (2009) 215.
- [3] F. Riquelme, *Tesis de Licenciatura, UNAM, México* (2009) 149.
- [4] J.L. Ruvalcaba-Sil, en *Del Egipto y Calderón, Eds. La Ciencia y el Arte, IPHE-CSIC, Madrid* (2008) 151.
- [5] F. Riquelme, J. L. Ruvalcaba-Sil and J. Alvarado-Ortega, *Bol. Soc. Geo. Mex.* Vol. 61, 2 (2009) 177.
- [6] M. H. Schweitzer, R. Avci, T. Collier and M. B. Goodwind. *C. R. Palevol* 7(2008) 159.

**7.3 Molecular Taphonomy and Microbial Biomineralization in the Late Cretaceous Múzquiz Lagerstätte, México.**

Ponencia presentada en el VII Congreso Latinoamericano de Paleontología, Argentina, septiembre 2010.



348. Molecular taphonomy and microbial biomineralization in the Late Cretaceous Múzquiz Lagerstätte, Mexico

F. RIQUELME<sup>1</sup>, J. ALVARADO-ORTEGA<sup>2</sup>, J.L. RUVALCABA-SIL<sup>3</sup>, J.P. BERNAL-URUCHURTU<sup>4</sup>, M. AGUILAR-FRANCO<sup>5</sup> and H. PORRAS-MÚZQUIZ<sup>5</sup>

LA-ICP-MS (Laser Ablation-Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry), PIXE (Particle Induced X-ray Emission),  $\mu$ -XRD (Micro X-ray Diffraction) and SEM (Scanning Electron Microscope) techniques are combined in molecular taphonomy research on soft tissue remains and substrata in fossil assemblage from the Late Cretaceous (Turonian) Múzquiz Lagerstätte, Coahuila, northeastern of Mexico. Skin, gills, digestive tract, blood vessel and muscle fiber show preserved features at cellular levels. The study also revealed bacterial and fungal cells with an exceptional preservation induced by autigenic biominerals such as fluorapatite and calcite; this biomineralization of cells probably occurred by spontaneous reactions in supersaturated solutions. Soft tissue preservation represents an important source of microbial fossilization and this process is recognizable as a bio-inorganic pattern of tiny crystallites preserving the morphology of both microbes and soft tissues. Organic contents of muscle cells were replaced by phosphatized minerals. Fungal and bacterial cells, including extracellular polymer (EPS), were preserved as casts and moulds. Ultrastructural and biogeochemical analysis of the sedimentary rock matrix yielded significant data on the genesis of the limestone-marl laminar rhythmites of the Múzquiz fossil bearing strata, probably induced by diagenetic alteration, mainly as consequence of aragonite dissolution in the laminar interfaces. Biogeochemical analysis of fossil material showed a high concentration of Si, P, Ca, Fe and enrichment of Na, Mg, K, Cr, Mn, Zn, As, Sr and Ba, suggesting that such elements may be involved in the process of soft tissue preservation and could be used as fossil fingerprints. Trace metal content reveals a significant amount of S, V, Ni, Cu, Cd, Sb, Tl, Bi, Th and U. These can operate as paleoenvironmental markers in order to reconstruct the ancient conditions and simulate the Lagerstätten settings, having direct implications for ecosystems evolutionary studies.

<sup>1</sup> Posgrado en Ciencias Biológicas, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito de la Investigación S/N, Ciudad Universitaria, C.P. 04510, D.F., México. riquelme.fc@gmail.com

<sup>2</sup> Departamento de Paleontología, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México. Circuito de la Investigación S/N, Ciudad Universitaria, C.P. 04510, D.F., México. jao.mex@gmail.com

<sup>3</sup> Instituto de Física, Universidad Nacional Autónoma de México, Apartado Postal 20-364, D.F., México. jose Luis.ruvalcaba@gmail.com, m.aguilarf@gmail.com

<sup>4</sup> Departamento de Geoquímica, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México. Circuito de la Investigación S/N, Ciudad Universitaria, C.P. 04510, D.F., México. jpbernal@gmail.com

<sup>5</sup> Museo Histórico de Múzquiz, Hidalgo Norte 205, Zona Centro, Múzquiz, Coahuila, C.P. 26340, México. museomuzquiz@hotmail.com

#### **7.4 Synchrotron Radiation applied on Molecular Taphonomy of Cretaceous Marine Lagerstätten of México.**

Ponencia presentada en el XII Congreso Nacional de Paleontología (SOMEXPAL), Puebla, Febrero 2011



XII CONGRESO NACIONAL DE PALEONTOLOGÍA. Puebla de los Ángeles-Febrero 2011

maturation. Complementary analysis were made using Infrared Spectroscopy (IR), X-ray Fluorescence (XRF), Atomic Force Microscopy (AFM) and Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy ( $^{13}\text{C}$  NMR), here we characterized the molecular preservation of arthropods and paleo-botanical source of the fossilized resin. Spectroscopy measurements indicate traces of sedimentary imprint and biomineralization process; we contrast ancient resins versus recent samples. Also, information obtained allows distinguishing what kind of hard and soft parts of the ancient organisms were remaining intact or partially mineralized. This certainly allows the best insight into organic preservation on fossil resins.

#### **Synchrotron Radiation applied on Molecular Taphonomy of Cretaceous Marine Lagerstätten of México**

Riquelme, F.<sup>1</sup>, J. Alvarado Ortega<sup>2</sup> y J. L. Ruvalcaba-Sil<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Posgrado de Ciencias Biológicas, Instituto de Geología, <sup>2</sup>Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México. Circuito de la Investigación, Ciudad Universitaria, c.p. 04510, Coyoacán, D.F., México; <sup>3</sup>Instituto de Física, Universidad Nacional Autónoma de México, A. postal 20-364, D.F. México.  
<sup>2</sup>riquelme.fc@gmail.com

Synchrotron radiation is advanced analytical tool for studies of biogeochemical composition, ultrastructural and crystal constitution in fossil material at micro and nano scale. Rarity and scientific value of exceptionally preserved fossils from Lagerstätten sediments allows applying extended synchrotron investigation. Here is a review of the various techniques used synchrotron combining microscopy and nanoscale spectroscopy. The work will focus on the preservation of ancient soft tissue and paleoenvironmental reconstruction based on diagnostic fossil fingerprints and biomarkers. Molecular Taphonomy of ancient organic material provides wider significance about molecular transformation of biomolecules during decay, preservation and early diagenetic biomineralization. Based on Synchrotron Raman Spectroscopy and Scanning Transmission X-ray Microscopy (STXM), here we investigated the paleobiochemical signatures preserved on soft tissue from Tlayúa and Múzquiz Lagerstätten. Diagnostic traces of Mg/Ca in marine carbonate sediments are widely used as proxies of temperature past climates. Applying Synchrotron-based X-ray Absorption Spectroscopy (XAS) and X-ray Absorption Near-Edge Structure (XANES), here is examined the paleosignature of Mg speciation in Lagerstätte sediments. As yet there is little consensus about the nature of the lithological rhythmic pattern of the Lagerstätten sediments, its origin and diagenetic history remain unsolved. Using Synchrotron-based X-ray fluorescence (XRF), micro X-ray Diffraction ( $\mu$ -XRD) and Focused Ion Beam (FIB), here is search the strong influence of diagenetic alteration testing ultrastructural petrography, aluminosilicates ratio, and diagenetic coordination of Sr/Ca in Lagerstätten rythmites. Results of Synchrotron testing show a higher information content of life trace and environmental conditions of ancient communities exceptionally preserved in marine deposits of the Cretaceous of México.





**“PALEOBIOLOGÍA DE LOCALIDADES LAGERSTÄTTEN EN MÉXICO: USO DE INDICADORES  
DIAGNÓSTICOS EN LA FOSILIZACIÓN SELECTIVA Y EL PALEOAMBIENTE”**

**Ciudad Universitaria, México, D.F, Octubre de 2011.**

