

Ecología

Bioestratigrafía del Devónico Superior y el Carbonífero Inferior: evento de extinción Kellwasser Inferior en Sonora central, México

Upper Devonian and Lower Carboniferous biostratigraphy: Lower Kellwasser extinction event in Central Sonora, Mexico

Juan José Palafox-Reyes ^{a, *}, Daniel Vachard ^b, Sébastien Clausen ^b,
Blanca Estela Buitrón-Sánchez ^c, Léa Devaere ^b
e Iveth Viridiana García-Amaya ^d

^a Universidad de Sonora, Departamento de Geología, Boulevard Luis Encinas y Rosales s/n, 83000 Hermosillo, Sonora, México

^b Centre National de la Recherche Scientifique, UMR 8198 - Evo-Eco-Paleo, F-59000 Lille, France

^c Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Departamento de Paleontología, Circuito de la Investigación Científica, Ciudad Universitaria, 04510 Ciudad de México, México

^d Universidad Estatal de Sonora, Ingeniería en Geociencias, Avenida Ley Federal del Trabajo s/n, 83100 Hermosillo, Sonora, México

*Autor para correspondencia: juan.palafox@unison.mx (J.J. Palafox-Reyes)

Recibido: 3 agosto 2021; aceptado: 31 mayo 2022

Resumen

En el estado de Sonora afloran importantes secuencias del Paleozoico Superior con una abundante biota fósil relativamente bien preservada. El objetivo de este trabajo es estudiar los afloramientos localizados en el cerro El Yugo, ubicado en el municipio de Arivechi, noroeste de México, mediante bioestratigrafía de alta resolución basada en foraminíferos. La metodología consiste en la elaboración de secciones delegadas para microfácies así como estudio de óxidos mayores por medio de fluorescencia de rayos X (FRX), además de la extracción de conodontos mediante la disolución de caliza con ácido acético. El estudio documenta la biota presente en las rocas portadoras, lo cual permite realizar una correlación de microfácies, óxidos mayores y biota. Los resultados permiten identificar las biozonas de *Nanicella gallowayi*, *Eogeinitzina devonica*, *Moravamminidae* indet., *Tikhinella measpis*, *Laxoendothyra parakosvensis* y *Stacheoides tenuis*, lo cual permite datar la secuencia en un rango comprendido del Devónico Superior (Frasniano) al Misisípico Inferior-Medio (Tournaisiano-Viseano). El evento de extinción Kellwasser (LKW) del Devónico Superior es identificado en el presente estudio mediante la desaparición de *T. measpis* y *E. devonica* en el límite Frasniano-Famenniano. Posterior al Famenniano, la ausencia de biota fósil indica un período de recuperación de ésta.

Palabras clave: Frasniano; Famenniano; Foraminíferos

Abstract

Important Upper Paleozoic sequences crop out in the state of Sonora with an abundant, relatively well-preserved, fossil biota. This work aims to study the outcrops found in Cerro El Yugo, which is located in the Municipality of Arivechi, in northwestern Mexico, through high-resolution biostratigraphy based on foraminifera. Samples were prepared for thin sections and studied for microfacies analysis. Major oxides were also studied by means of X-ray fluorescence, in addition to the extraction of conodont elements by dissolving limestone with acetic acid. The study documents the biota present in the host rocks, which allows for a correlation of microfacies, major oxides and biota. Biozones of *Nanicella gallowayi*, *Eogeinitzina devonica*, Moravaminidae indet., *Tikhinella measpis*, *Laxoendothyra parakosvensis*, and *Stacheoides tenuis* were identified, which allowed the dating of the sequence to between the Upper Devonian (Frasnian) and the Lower-Middle Mississippian (Tournaisian-Viséan). The Late Devonian (Kellwasser) event is identified in the present study by the disappearance of *T. measpis* and *E. devonica* at the Frasnian-Famennian boundary. After the Famennian, the absence of fossil biota indicates a period of recovery of it.

Keywords: Frasnian; Famennian; Foraminifera

Introducción

Los afloramientos del Cratón norteamericano están ampliamente expuestos al sureste de Arizona (EUA) y noreste de Sonora (México), los cuales están constituidos por un zócalo metamórfico y granítico del Precámbrico, y cubiertos por unidades del Paleozoico (Palafox-Reyes, 2011). Desde el punto de vista estratigráfico, las unidades del Paleozoico del estado de Sonora son las más completas de México, y comprenden desde el Cámbrico hasta el Pérmico en casi toda su distribución geográfica (Cuen-Romero et al., 2018, 2020). El Sistema Devónico es conocido en diferentes regiones de Sonora; al noreste de Agua Prieta y Cananea aflora la Formación Martin del Devónico Superior (Ransome, 1904), también el Devónico aflora en los alrededores de Caborca en el área del Bisani (Cooper y Arellano, 1946), y en la región de Bacanora (Vega-Granillo y Araux-Sánchez, 1985). En el centro de Sonora, el Devónico se encuentra en el cerro Cobachí, en la mina Barita de Sonora y en el rancho (Peiffer-Rangin, 1987); además se ha documentado en la sierra Agua Verde en las formaciones Santiago y La Joya (Ochoa-Granillo y Sosa-León, 1993).

Los estudios del Paleozoico en México comenzaron a inicios de siglo pasado en el estado de Sonora (Cuen-Romero et al., 2020). La Formación Martin (Devónico) y Formación Escabrosa (Misisípico Inferior) fueron definidas por Ransome (1904), para referirse a las rocas que afloran en el cerro El Yugo; sin embargo, el primer estudio estratigráfico regional de Sonora central, incluyendo rocas del Paleozoico, fue realizado por King (1939). El Devónico del cerro El Guayacán y el Misisípico de la Formación Picacho Colorado fueron cartografiados y descritos por Noll (1981) y Noll et al. (1984), indicando además la presencia de braquiópodos del Famenniano

(Devónico Superior) asignados al género *Dzieduszyckia*, el cual también es conocido para Polonia (Europa), Marruecos (África) y Nevada (EUA). Lo anterior permitió correlacionar el Devónico de Sonora con las Montañas Holy en Polonia y además proporciona información sobre el evento de extinción Kellwasser Inferior en el estado (Noll et al., 1984).

En Sonora central, en el rancho El Real Viejo, localizado en la sierra de Santo Domingo, aflora un paquete de 300 m de caliza fosilífera del Devónico y Misisípico, para el cual no se conoce el límite Frasniano-Famenniano (Minjárez-Sosa et al., 1985); sin embargo, en un estudio bioestratigráfico del Paleozoico del noreste y centro de Sonora realizado por Peiffer-Rangin (1987), se identificaron los diferentes contactos entre el Devónico y Misisípico de la región. En la región de Cobachí, centro de Sonora, se exponen 2 conjuntos litológicos yuxtapuestos, uno de mar poco profundo y otro de cuenca, los cuales permanecieron durante todo el Paleozoico (Ketner y Noll, 1987); esta información sirvió como base para reconocer la estratigrafía del área de estudio del presente trabajo. El Devónico Superior (Frasniano-Famenniano) y el Carbonífero Inferior, Misisípico (Tournaisiano), fueron reconocidos en el cerro El Yugo por Palafox-Reyes (2011), mediante una sección geológica realizada en el área, donde también se reportaron biofacies del Frasniano por Borjas (2021), las cuales contienen conodontos de la Zona de *rhenana* propuesta por Ziegler y Sandberg (1990).

Desde el punto de vista geocronológico el Devónico Tardío fue un intervalo de tiempo caracterizado por distintas crisis de biodiversidad en ambientes marinos (Caplan y Bustin, 1999; McGhee, 1996), además de presentarse durante este intervalo 2 eventos de extinción globales: el evento de extinción Kellwasser, el cual

denota el límite Frasniano-Famenniano (F-F), así como el Evento Hangenberg, el cual denota el límite Devónico-Carbonífero (Hallam y Wignall, 1997; Myrow et al., 2014; Racki, 2005; Walliser, 1996). Estos eventos de extinción son considerados importantes para el desarrollo de biodiversidad en el planeta debido a que se calcula que afectaron aproximadamente el 50 y 30% de los géneros marinos existentes en ese tiempo, respectivamente (Bambach et al., 2004; Benton, 2003).

El objetivo del presente trabajo es describir e ilustrar la bioestratigrafía detallada de las rocas del Devónico Superior-Carbonífero Inferior que afloran en el cerro El Yugo. Para lo anterior, se describe la litología confirmándola con geoquímica por medio de fluorescencia de rayos X (FRX), análisis de microfacies, foraminíferos y elementos conodontales, lo cual permite datar y caracterizar la secuencia. Además, se discute sobre la presencia del evento de extinción Kellwasser Inferior en Sonora, relacionándolo a las condiciones climáticas ocurridas durante el Devónico en América del Norte.

Materiales y métodos

El área de estudio se ubica en el límite de los municipios de Arivechi y Bacanora (fig. 1), en el centro-oriente de Sonora, aproximadamente a 240 km de la ciudad de Hermosillo. La sección bajo estudio inicia en la latitud 28°55'51" y longitud 109°10'36" a 513 m de altitud, el acceso principal se realiza por la carretera Hermosillo-Sahuaripa-Arivechi.

Para la elaboración de la sección estratigráfica del cerro El Yugo, se utilizó el bastón de Jacob con una orientación este-oeste (28°51'44" N, 109°18'42" O y 28°51'42" N, 109°18'16" O). En esta sección se recolectaron 50 muestras, referidas como SLB1-SLB50, con las cuales se elaboraron secciones delgadas. El análisis de microfacies se realizó en un microscopio AmScope integrado con una cámara SLR Digital Nikon D80 con una lente de 10X, siguiendo la metodología de Flügel (2004). Los elementos conodontales se extrajeron mediante disolución de caliza en ácido formico según la metodología propuesta por Jeppsson y Anehus (1995) y posteriormente fueron analizados en un microscopio electrónico de barrido Jeol 5410LV; además fueron identificados a nivel de paragénere con el objetivo de caracterizar las biofacies de conodontos en cada muestra según Syberg (1976). La identificación de los diferentes taxones recuperados en este estudio permitió establecer un esquema bioestratigráfico detallado de zonaciones.

El análisis de óxidos mayores se realizó mediante espectrometría de fluorescencia de rayos X, utilizando un equipo FRX S4, localizado en el Laboratorio de Rayos X

de la Universidad de Cádiz, España. Los valores de los 5 óxidos mayores (CaO, SiO₂, Al₂O₃, MgO, Na₂O) fueron normalizados a 100% y posteriormente comparados en la columna estratigráfica, permitiendo correlacionar estos valores con la litología de la sección.

Resultados

Microfacies

La secuencia estratigráfica expuesta en el cerro El Yugo tiene un espesor total de 733 m, comprendiendo rocas del Devónico Superior con un espesor de 283 m hasta el Misisípico Inferior-Medio con un espesor de 450 m. La secuencia se inicia con una intercalación de arenisca calcárea con partes brechoides de color rosa con un espesor de 85 m. Esta parte inicial de la secuencia aflora en estratos masivos, bien expuestos y se expande hacia la cima de la secuencia como una brecha del mismo color. En el microscopio, las rocas de esta unidad se observan como fragmentos dolomíticos angulares cortados por numerosas vetas de calcita con la presencia de abundantes corales tabulados no identificados debido al estado de conservación.

En el nivel comprendido entre los 85 y 138 m la litología está representada por caliza gris, la cual se presenta en estratos delgados a gruesos, bien expuestos, conteniendo biota del Devónico-Misisípico (fig. 2). En el microscopio se observa como un wackestone bioclástico y arenoso con la presencia de crinoideos y estromatopóridos identificados como *Amphipora ramosa* (Phillips, 1841) (fig. 3a), lo cual permite asignar la secuencia al Frasniano (Devónico Superior), y además permite determinar el ambiente de depósito debido a que ha sido documentado que los estromatopóridos masivos se desarrollaron en aguas cálidas poco profundas, constituyendo conjuntamente parte del núcleo de los arrecifes (Palafox-Reyes, 2011). También es conocido que diversas especies incluidas dentro del género *Amphipora* prosperaron durante el Devónico Tardío en ambientes lagunares Palafox-Reyes (2011). En este intervalo de la secuencia también se tiene la presencia de *A. ramosa* y *Sycidium* sp. (fig. 3a, b).

En la parte superior de la columna estratigráfica se depositó un dolowackestone con abundantes fragmentos de placas columnares de crinoideos, sobreyacidos por caliza bioconstruida de color gris, con presencia de *Chaetetes*, identificados como formas comunes en ambientes arrecifales durante el Paleozoico (Palafox-Reyes, 2011). También se tiene la presencia de corales solitarios, corales tabulados y estromatopóridos (fig. 3c) como *Stachyodes* sp. del Devónico Superior, Frasniano (fig. 3d). Lateralmente, se desarrollaron encrinitas de color gris con

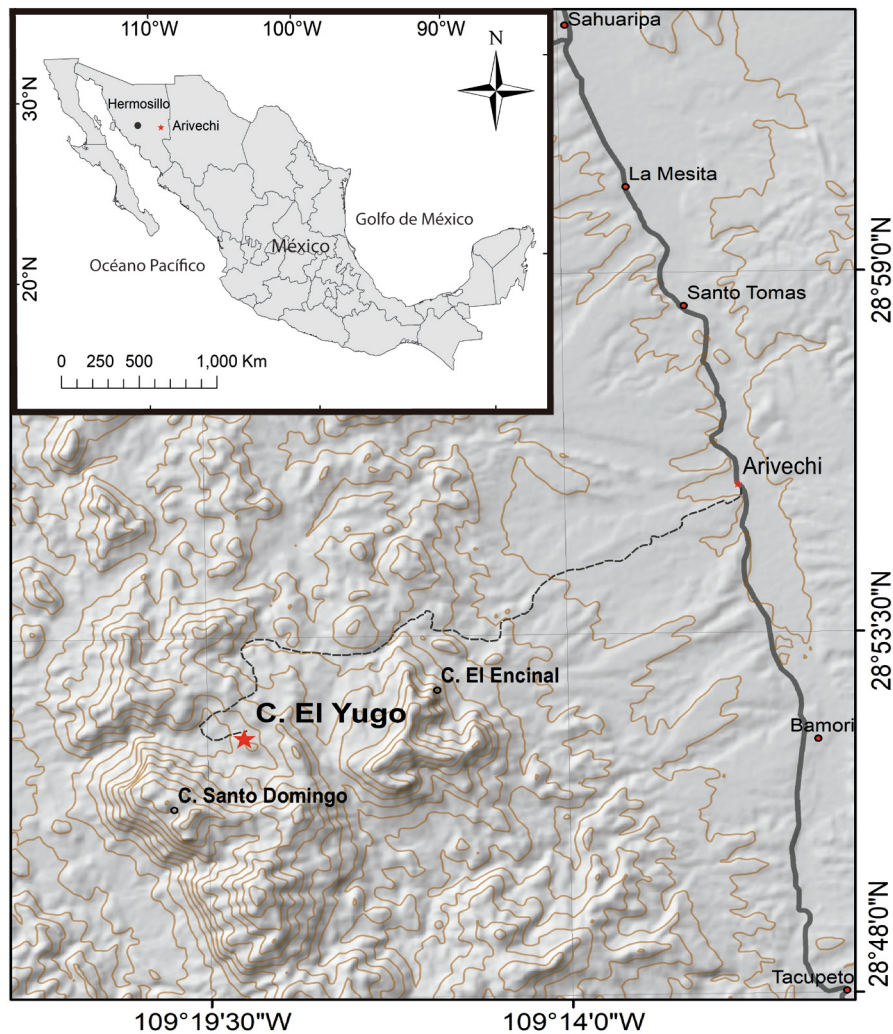


Figura 1. Mapa de localización del cerro El Yugo.

un espesor aproximado de 2 m, sugiriendo en conjunto un ambiente arrecifal. En el microscopio estas rocas se observan como una caliza bioclástica con fragmentos de crinoideos y *Tentaculites* sp. (fig. 3e), correspondiendo a un wackestone dolomitizado con numerosos fragmentos de placas columnares de crinoideos.

En el intervalo de 138 a 233 m se encuentra caliza gris, en estratos masivos, bien expuestos, con numerosos fragmentos de placas columnares de crinoideos y lentes de pedernal. En el microscopio se observa un wackestone bioclástico con fragmentos de estromatopóridos, corales solitarios, crinoideos, ostrácodos y foraminíferos como *Evlania* sp., *E. devonica* (Lipina, 1950) (fig. 3f) y *N. gallowayi* (Thomas, 1931) del Frasniano superior (fig. 3g).

La fauna más abundante en este intervalo corresponde a *N. gallowayi* y *E. devonica* (fig. 3h-l).

En la sección de 233 a 268 m se tiene caliza de color gris en estratos medios a finos, con intercalaciones de arenisca de color rosa de grano fino a grueso, con presencia del gasterópodo *Eumphalus* sp. En el microscopio se observa como un wackestone bioclástico con restos de columnas de gasterópodos, crinoideos y ostrácodos, además de foraminíferos como *T. measpis* (Bykova, 1952), *N. gallowayi*, *Kettnerammina* sp. y *Devonoscala* sp. (fig. 4a-c). En general, la asociación biótica de esta unidad, representada por *T. measpis*, *N. gallowayi*, *E. devonica* y *Kettnerammina* sp., y quitinozoos no identificados, indica el Frasniano Superior (fig. 4d-i).

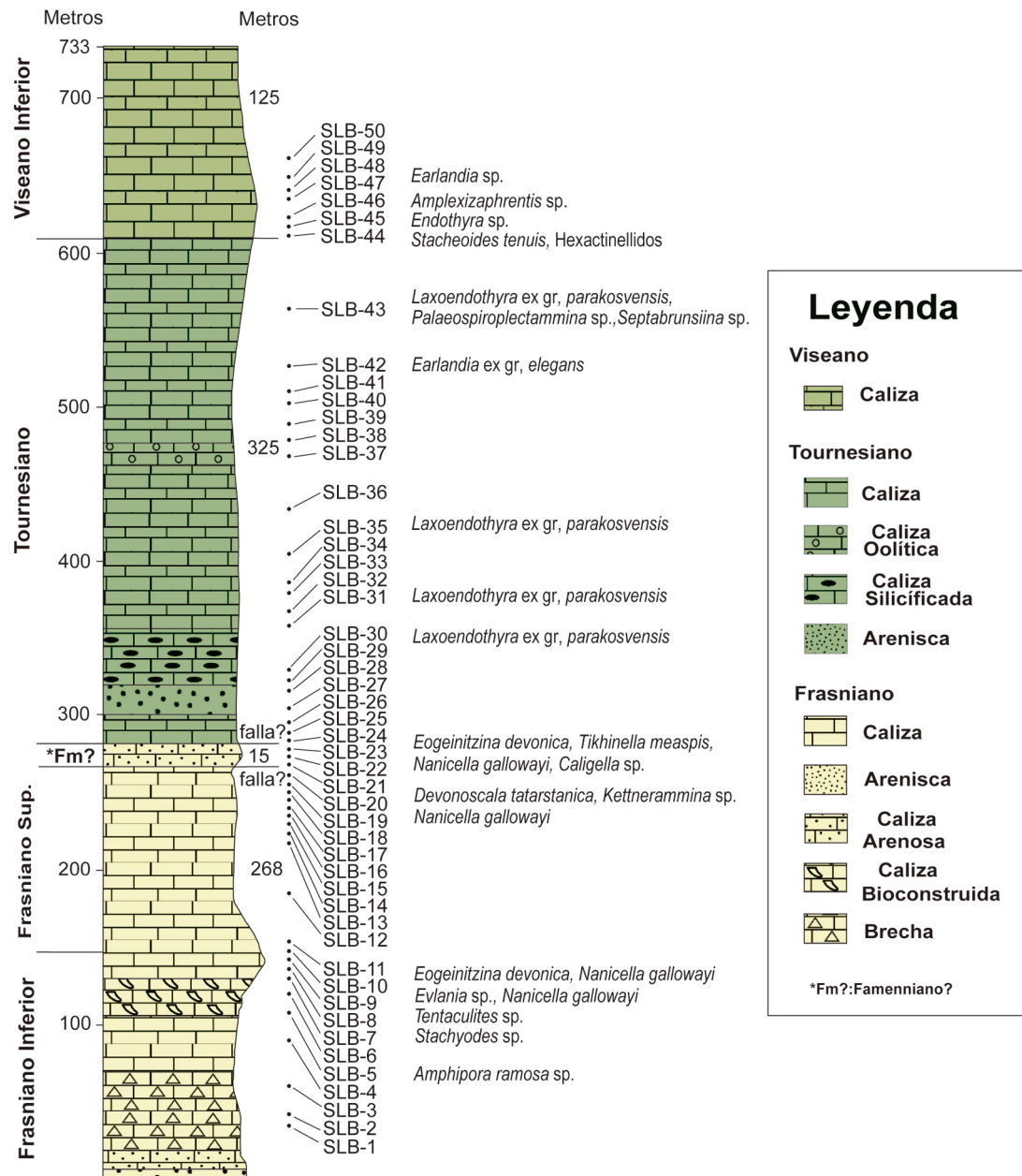


Figura 2. Columna estratigráfica del cerro El Yugo (Sonora, México). Datos litológicos y bioestratigráficos.

Hacia la parte superior de la secuencia se depositó una caliza gris, la cual aflora en estratos medio a finos, con presencia de granos de cuarzo. Esta caliza fue clasificada como wackestone bioclástico con fragmentos de placas columnares de crinoideos y además la presencia de microfósiles como *?Trochiliscus* sp. y *?Sycidium* sp., foraminíferos como *Caligella* sp., *Devonoscala*

tatarstanica (Antropov, 1959), *T. measpis*, *N. gallowayi*, *E. devonica* los cuales indican también el Frasniano Superior (fig. 4j-l). A la secuencia anterior le sobreyace caliza gris, clasificada como wackestone bioclástico con foraminíferos y fragmentos de placas columnares de crinoideos. Destaca en esta unidad la abundancia de *T. measpis* especie guía del Frasniano superior.

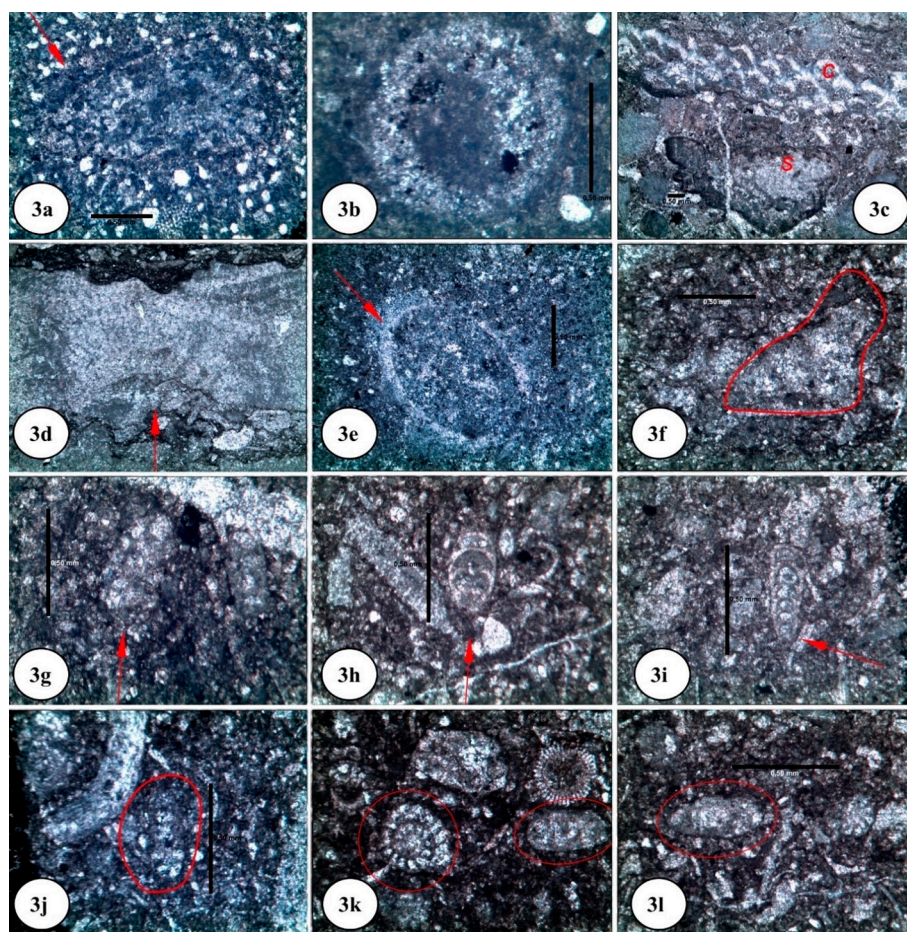


Figura 3. Biota Devónico-Misisípico del cerro El Yugo (Sonora, México). A, *Amphipora ramosa*; sección oblicua Muestra SLB4; b, *?Sycidium* sp.; sección oblicua. Muestra SLB4; c, microfácies de corales (c) y estromatoporoides (s). Muestra SLB6; d, *Stachyoides* sp.; sección longitudinal. Muestra SLB6b; e, *Tentaculites* sp.; sección oblicua. Muestra SLB7; f, *Evlania* sp.; sección subaxial. Muestra SLB9; g, *Nanicella gallowayi*; sección subtransversal. Muestra SLB9; h, *Eogeinitzina devonica*; sección subaxial. Muestra SLB10; i, *Eogeinitzina devonica*; sección subaxial. Muestra SLB10; j, *Nanicella gallowayi*; sección axial; Muestra SLB10; k, *Nanicella gallowayi* microfácies; sección transversal (izquierda) y sección axial (derecha). Muestra SLB10; l, *Nanicella gallowayi*; sección axial. Muestra SLB10.

El intervalo de 268 a 283 m de la sección se compone de arenisca calcárea de color café, en estratos delgados, con presencia de óxidos de hierro e intercalada con arenisca de color rosa con estratificación cruzada. Hacia la cima, esta unidad se encuentra dolomitizada.

La parte de la sección comprendida de 283 a 358 m contiene caliza de color gris, presentándose en estratos delgados a masivos bien expuestos. En el microscopio se observa como una grainstone. Esta unidad es sobreyacida por caliza de color café con horizonte de arenisca con presencia de gasterópodos como *Euomphalus* sp. Posteriormente aflora arenisca de grano fino de color café, la cual se encuentra intercalada con estratos de

pedernal de 10 cm de espesor. Bajo el microscopio se observa una limolita, la cual fue clasificada como un wackestone silicificado. De acuerdo con Borjas (2021), aproximadamente a los 342 m de la secuencia se presenta caliza arenosa con la presencia de *Vicinesphaera* sp., la cual indica el Famenniano (Devónico Superior).

En los niveles de 358 a 463 m la litología está dominada por rocas carbonatadas, las cuales se presentan en estratos gruesos a masivos, con abundante presencia de corales, braquiópodos y crinoideos. En el microscopio se observa como un wackestone bioclástico con abundantes placas columnares de crinoideos y foraminíferos como *L. ex gr. parakosvensis* (Lipina, 1955). Hacia la cima se tiene caliza

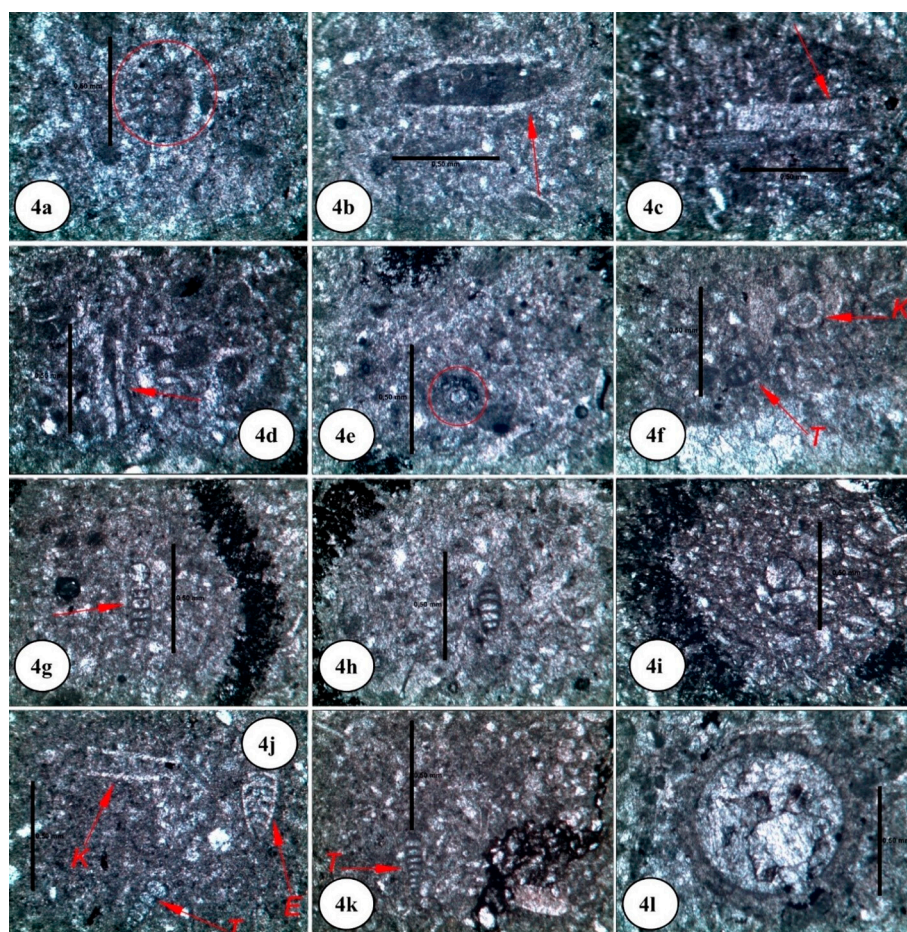


Figura 4. Biota Devónico-Misisípico del cerro El Yugo (Sonora, México). a, *Nanicella gallowayi*; sección transversal. Muestra SLB13; b, *Kettneramina* sp. 2; sección axial. Muestra SLB15; c, *Devonoscala* sp.1; sección longitudinal. Muestra SLB15; d, *Kettneramina* sp.; sección longitudinal. Muestra SLB15; e, *Nanicella gallowayi*; sección subtransversal. Muestra SLB15; f, *Thinkinella measpis* (T) y *Kettneramina* sp. (K). Muestra SLB15; g, *Thinkinella measpis*; sección axial. Muestra SLB15; h, *Thinkinella measpis*; sección oblicua. Muestra SLB15; i, *Chitinozoa*; sección oblicua. Muestra SLB16; j, *Kettneramina* sp. (K); *Thinkinella measpis* (T) y *Eogeinitzina devonica* (E). Muestra SLB18; k, *Thinkinella measpis* (T) sección longitudinal. Muestra SLB18; l, *Trochiliscus* sp.; sección oblicua. Muestra SLB19.

gris en estratos delgados con la presencia de *Chaetetes* sp., *Syringopora* sp. y briozoarios no identificados. En la parte superior de este intervalo aflora caliza gris en estratos delgados con abundantes briozoarios. En el microscopio se observa un wackestone bioclástico que contiene fragmentos de briozoarios, corales solitarios y crinoideos, además de *L.* ex gr. *parakosvensis* (fig. 5a-l).

En el intervalo comprendido de 463 a 608 m, se depositó caliza gris en estratificación masiva con abundantes fragmentos de fósiles e intercalaciones de encrinita. Esta roca fue clasificada como grainstone oolítico de crinoideos.

De los 533 a 593 m se tiene caliza gris de color claro en bancos masivos, con numerosos corales solitarios.

Es un packstone bioclástico con la presencia de *L.* ex gr. *parakosvensis* y *Earlandia* ex gr. *elegans* (Rauzer-Chernousova y Reitlinger, 1937) del Misisípico Inferior, Tournaisiano (fig. 6a-j). De los 593 a 608 m se depositó caliza gris en estratos masivos, con abundantes corales solitarios, con la presencia de foraminíferos como *Palaeospiroplectammia* sp., *Septabrunsinia* sp., *L.* ex gr. *parakosvensis* y *S. tenius* del Tournaisiano Medio-Superior (fig. 6k-m).

En el intervalo de 608 a 733 m se tienen depósitos del Misisípico Medio (Viseano), cuya edad es inferida por la superposición de estratos con los del Tournaisiano superior y el Viseano. Esta unidad se caracteriza por la presencia de

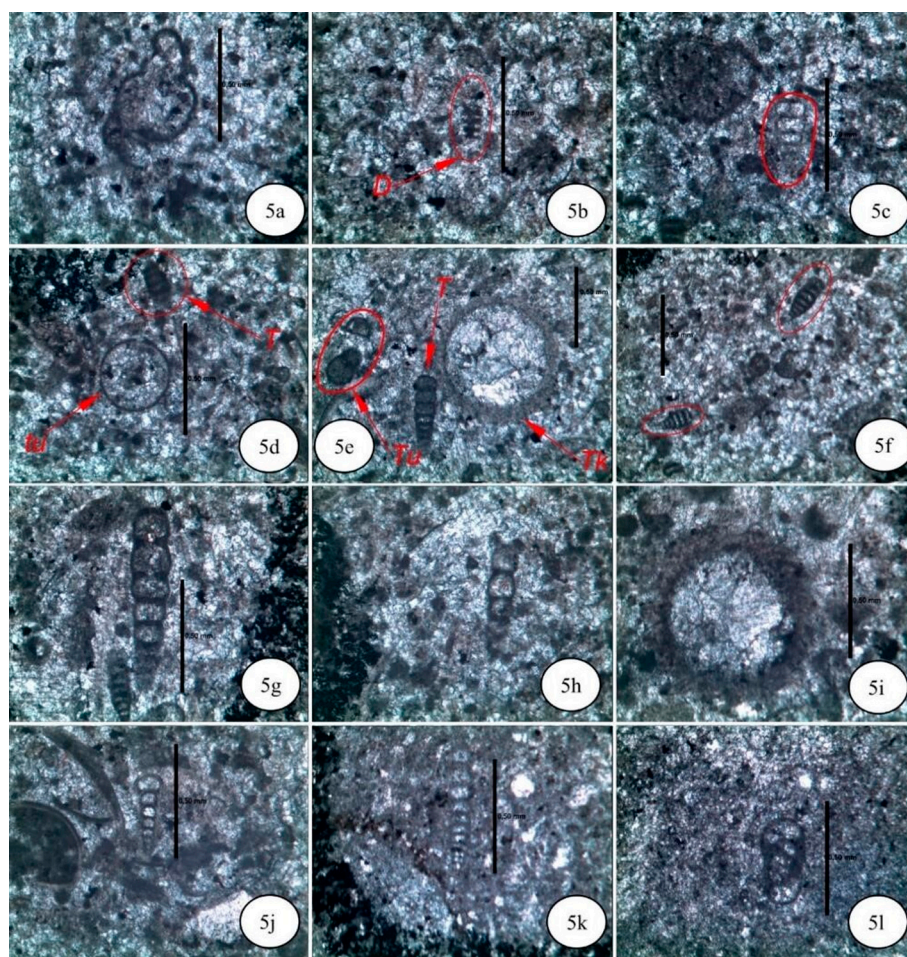


Figura 5. Biota Devónico-Misisípico del cerro El Yugo (Sonora, México). a, *Caligella* sp.; sección axial. Muestra SLB19; b, *Devonoscala tatarstanica* (D); sección oblicua. Muestra SLB19; c, *Eogeinitzina devonica*; sección oblicua. Muestra SLB19; d, *Thinkinella measpis* (T); y tuberitínidos ? (tu). Muestra SLB19; e, *Thinkinella measpis* (T), ?*Trochiliscus* sp. (tk) y tuberitínidos ? (tu). Muestra SLB19; f, *Thinkinella measpis*; 2 secciones subaxiales. Muestra SLB19; g, *Thinkinella measpis*; 2 secciones axiales. Muestra SLB19; h, *Thinkinella measpis*; sección subaxial. Muestra SLB19; i, ?*Sygidium* sp.; sección oblicua. Muestra SLB19; j, *Eogeinitzina devonica*; sección oblicua. Muestra SLB19; k, *Thinkinella measpis*; sección axial. Muestra SLB20; l, *Laxoendothyra* ex. *Gr parakosvensis*; sección axial. Muestra SLB31.

caliza gris-rojiza fuertemente oxidada en estratos masivos, conteniendo abundantes corales solitarios y fragmentos de placas columnares de crinoideos. En el microscopio se observa una caliza oolítica con presencia de *E. ex gr. elegans*. Hacia la cima aflora caliza con nódulos de pedernal, clasificada como grainstone bioclástico con presencia de *S. tenuis* (Petryk y Mamet, 1972) y esponjas hexactinélidas. Posteriormente aflora un wackestone con *Endothyra* sp. y corales zafréntidos. Esta unidad se caracteriza por la abundancia de foraminíferos como *E. ex gr. elegans* y corales como *Amplexizaphrentis* sp.

Edad de la secuencia

En la sección estudiada están representados el Devónico Superior (Frasniano y Famenniano) y el Misisípico (Tournaisiano y Viséano). Los datos obtenidos a partir del estudio de microfacies de un wackestone bioclástico ubicado en la parte inferior de la secuencia demuestran la presencia de abundantes placas columnares de crinoideos asociados a *N. gallowayi* (figs. 3g, j, 4a, e), *E. devonica* (figs. 3h-i, 5j), *Kettnerammina* sp. (fig. 4b, d, e, j), *T. measpis* (figs. 4g, h, 5d, h), lo cual indica la parte superior del Frasniano; mientras que la presencia de *Vicinesphaera*

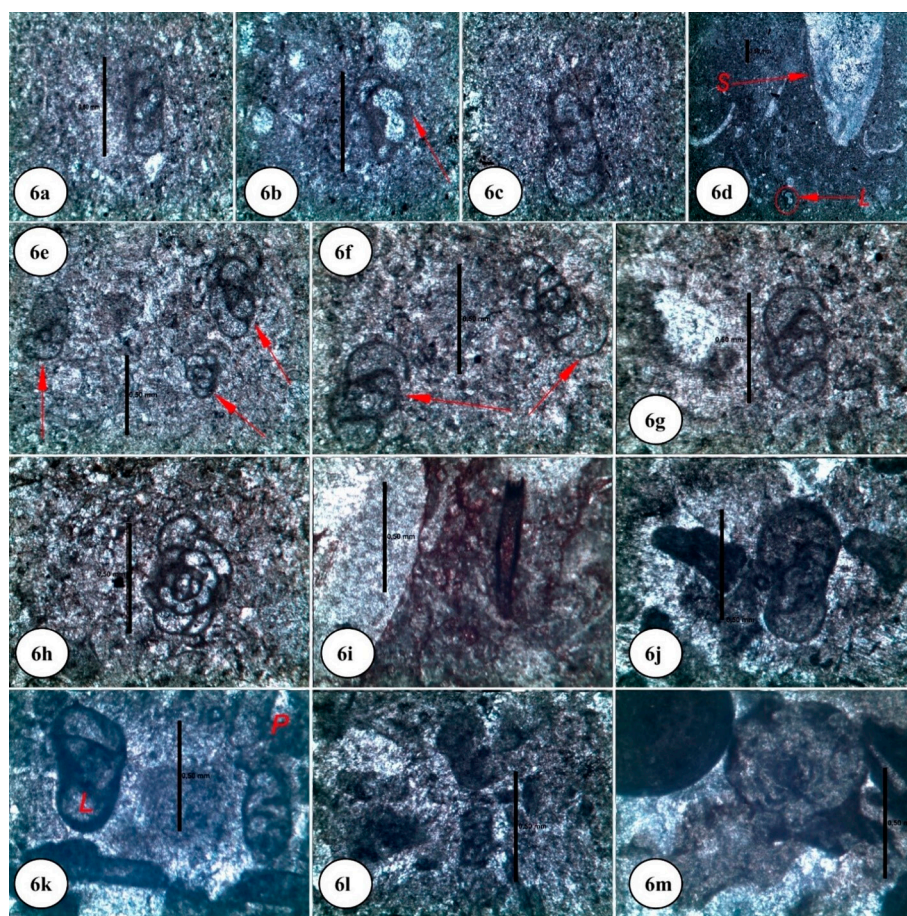


Figura 6. Biota Devónico-Misisípico del cerro El Yugo (Sonora, México). a, *Laxoendothyra* ex. gr *parakosvensis*; sección axial. Muestra SLB31; b, *Laxoendothyra* ex. gr *parakosvensis*; subtransversal sección. Muestra SLB33; c, *Laxoendothyra* ex. gr *parakosvensis*; sección oblicua. Muestra SLB33; d, *Laxoendothyra* ex. gr *parakosvensis* (L) *Syringopora* sp. (S). Muestra SLB33; e, *Laxoendothyra* ex. gr *parakosvensis*; 2 secciones. Muestra SLB36; f, *Laxoendothyra* ex. gr *parakosvensis*; 2 secciones. Muestra SLB36; g, *Laxoendothyra* ex. gr *parakosvensis*; sección oblicua. Muestra SLB36; h, *Laxoendothyra* ex. gr *parakosvensis*; sección transversal. Muestra SLB36; i, *Earlandia* ex gr. *elegans*; sección axial. Muestra SLB42; j, *Laxoendothyra* ex. gr *parakosvensis*; sección oblicua. Muestra SLB43; k, *Laxoendothyra* ex. gr *parakosvensis* (L) (izquierda) y *Palaeospiroplectamina* sp. (P) (derecha). Muestra SLB43; l, *Septabrunsiina* sp. Muestra SLB44; m, *Stacheoides tenuis*. Muestra SLB45.

sp. a los 342 m de la sección permiten identificar el Famenniano (Borjas, 2021). En la parte superior de la secuencia se tiene la presencia de *Palaeospiroplectamina* sp., *Septabrunsiina* sp. y *L.* ex gr. *parakosvensis*, indicadores estratigráficos del Tournaisiano medio-superior. Finalmente, el Viséano está representado por las especies *S. tenuis*, *Endothyra* sp., *Amplexizaphrentis* sp. y *Earlandia* sp.

En un estudio de bioestratigráfico realizado por Borjas (2021), se identificaron en la parte media de la secuencia, conodontos de las especies *Palmatolepis rhenana* (Bischoff, 1956), *P. hassi* (Müller y Müller, 1957), *P.*

subrecta (Miller y Youngquist, 1947) y *P. jamieae* (Ziegler y Sandberg, 1990), indicadoras de la Zona de *rhenana* del Frasniano superior (figs. 7, 8). También estas especies permiten inferir oscilaciones regresivas y transgresivas en el nivel del mar (Palafox-Reyes, 2011).

Óxidos mayores

Los óxidos mayores analizados en este estudio coinciden con la litología representada en la columna estratigráfica, principalmente para calizas y calizas arenosas (tabla 1). Las concentraciones en porcentaje para los óxidos mayores varían de la siguiente manera:

Tabla 1

Resultados analíticos de óxidos mayores (cifras dadas en %) de cincuenta muestras de la secuencia del cerro El Yugo, Sonora, México.

Muestra	CaO (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O
SLB1	22.52	72.53	1.67	0.23	0.69
SLB2	78.79	7.77	1.68	8.21	0.45
SLB3	57.15	28.29	3.58	3.78	0.40
SLB4	82.75	12.68	1.76	0.56	0.23
SLB5	79.82	14.14	1.93	1.22	0.45
SLB6	93.30	2.43	0.76	1.38	0.44
SLB7	84.64	9.56	1.74	1.39	0.63
SLB8	74.65	13.91	0.93	8.36	0.37
SLB9	84.10	4.67	2.93	5.26	0.44
SLB10	83.77	8.46	1.19	3.35	0.75
SLB11	86.54	2.78	2.21	6.87	0.21
SLB12	95.33	1.64	0.28	0.70	0.70
SLB13	94.33	1.54	0.85	0.51	0.92
SLB14	81.88	11.53	0.84	1.29	2.03
SLB15	86.55	8.69	0.96	1.06	0.50
SLB16	83.94	7.78	2.12	2.27	0.47
SLB17	81.05	13.02	1.55	0.59	0.45
SLB18	78.13	16.23	1.62	0.67	0.46
SLB19	75.21	19.44	1.69	0.74	0.46
SLB20	78.48	14.35	2.25	0.80	0.74
SLB21	2.28	86.84	4.41	0.35	1.20
SLB22	45.58	27.89	4.02	17.84	0.25
SLB23	33.15	46.50	2.94	14.22	0.44
SLB24	63.40	4.34	1.20	28.34	0.28
SLB25	86.23	9.49	2.13	0.37	0.39
SLB26	63.62	33.61	0.92	0.27	0.32
SLB27	2.42	91.85	2.08	0.66	0.48
SLB28	39.55	34.06	5.14	16.14	0.24
SLB29	48.08	36.55	3.25	8.64	0.42
SLB30	56.61	39.03	1.36	1.13	0.59
SLB31	77.04	17.78	1.38	1.33	0.33
SLB32	81.16	13.59	1.29	1.37	0.46
SLB33	83.09	12.63	1.12	1.10	0.40
SLB34	83.41	11.20	1.40	1.66	0.47
SLB35	60.20	30.20	1.98	3.22	0.68
SLB36	85.26	8.06	2.08	1.55	0.70
SLB37	92.93	3.62	0.49	0.62	0.48

Tabla 1. Continúa

Muestra	CaO (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O
SLB38	90.24	3.74	1.20	0.55	0.38
SLB39	71.73	19.79	1.80	3.83	0.38
SLB40	96.69	1.16	0.46	0.41	0.40
SLB41	94.45	2.07	0.77	0.43	0.70
SLB42	60.74	8.16	0.78	21.19	0.41
SLB43	97.07	0.79	0.33	0.44	0.54
SLB44	92.84	4.02	0.64	0.53	0.60
SLB45	94.18	3.23	0.72	0.66	0.30
SLB46	93.17	3.25	0.46	0.53	0.37
SLB47	90.15	5.23	0.78	1.31	0.34
SLB48	87.13	7.20	1.10	2.09	0.30
SLB49	92.56	4.66	0.29	0.33	0.61
SLB50	95.35	2.26	0.66	0.50	0.31

CaO 2.28 a 97.07, SiO₂ 1.16 a 91.85, Al₂O₃ 0.28 a 5.14, MgO 0.23 a 28.34 y Na₂O 0.21 a 1.21. En la columna estratigráfica en los niveles SLB21-SLB27 (fig. 9), se observa una marcada disminución de CaO y un aumento de SiO₂, mientras que en el nivel SLB23 hay un aumento de carbonatos, lo cual puede ser debido a precipitación o dolomitización. Las concentraciones de SiO₂, Al₂O₃ y MgO se correlacionan estrechamente (fig. 9); mientras que las concentraciones de Al₂O₃ y MgO aumentan de forma considerable al aumentar los elementos detríticos del tamaño de arenas, lo que confirma que se llevó a cabo un evento transgresivo-regresivo.

Evento de extinción Kellwasser Inferior (LKW)

Desde el punto de vista geológico, la biodiversidad global es permanente y controlada con la aparición de nuevas especies, mientras que otras se extinguen debido a que no se adaptan a los cambios paleoecológicos (Palafox-Reyes, 2011). En la historia de la biosfera se han presentado diversas crisis o extinciones masivas (Bambach et al., 2004; Sepkoski, 1996). Entre estas extinciones masivas, se encuentran el evento de extinción Kellwasser, el cual se desarrolló durante el Devónico Tardío (Frasniano-Famenniano) y el Hangenberg, que representa el límite Devónico-Carbonífero. Estos eventos han sido comparados en magnitud con las 5 grandes extinciones del Fanerozoico (Kaiser et al., 2016).

La litoestratigrafía del cerro El Yugo de edad Devónico Tardío (Frasniano Superior-Famenniano), está conformada principalmente de caliza y arenisca con presencia de

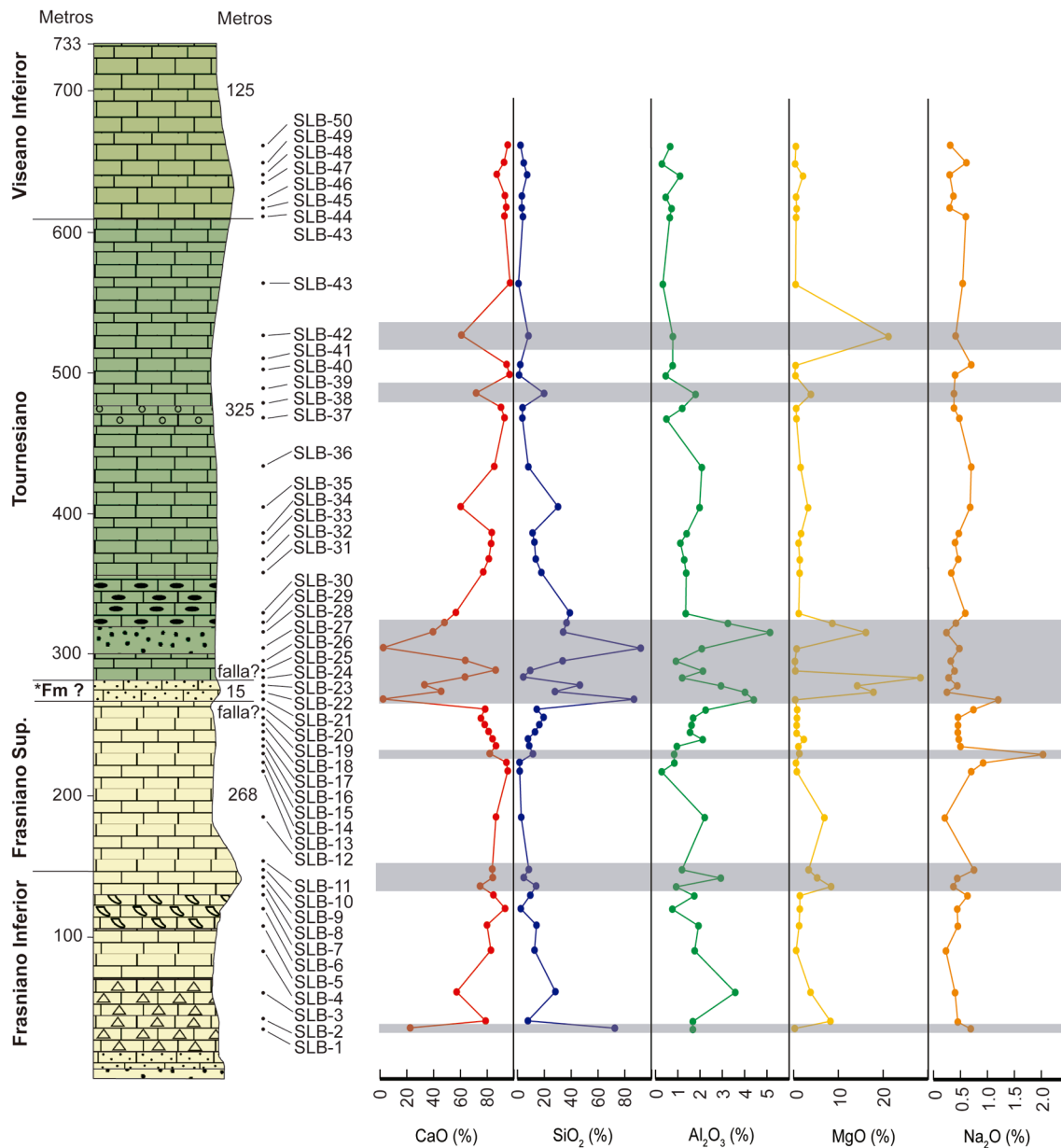


Figura 7. Correlaciones de óxidos mayores con la litoestratigrafía.

estromatoporoides, foraminíferos, moravaminideos y conodontos, que permiten caracterizar la biozona Rhenana, la cual tiene un espesor aproximado 35 m, posteriormente se observa un periodo de desaparición o extinción regional en el límite F-F.

La sedimentación, en su mayoría de facies carbonatadas, la composición taxonómica y la sucesión de biozonas de conodontos en el límite del Frasniano-Famenniano y la correlación de los óxidos mayores, refleja un rápido y constante cambio de paleoambientes,

lo que manifiesta un evento de extinción tipo LKW. El Famenniano es muy pobre en microfauna calcárea a causa del periodo de recuperación y, por otro lado, por la litología poco favorable como es el cuarzo y dolomía.

Discusión

El Devónico-Misisípico del cerro El Yugo está representado por una litología predominante de carbonatos,

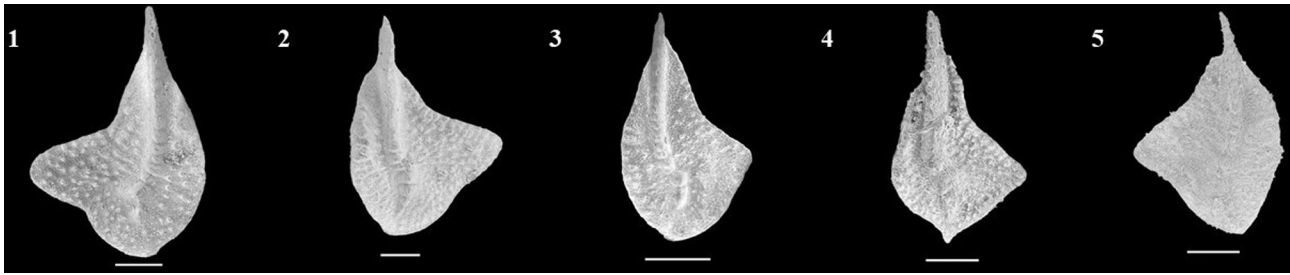


Figura 8. Micrografías con las asociaciones faunísticas de conodontes. Género *Palmatolepis* y las especies encontradas en la sección del cerro El Yugo, Sonora, México. Todas las escalas representan 200 μm. Tomada de Borjas (2021).

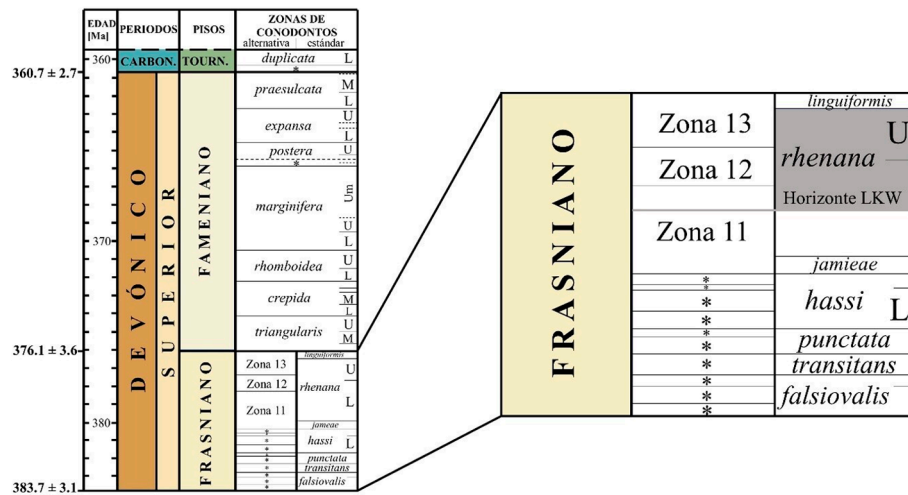


Figura 9. Biozonas de conodontes para el Frasniano (Devónico Tardío). Modificado de Borjas (2021).

la cual comprende desde el Devónico Superior hasta el Misisípico Inferior-Medio. Estas rocas son correlacionables con la Formación Martin y Escabrosa de la región de Bisbee, Arizona, EUA.

Según Bond y Wignall (2008), un análisis de facies de secciones en los EUA y Europa (Francia, Alemania, Polonia) y la comparación con secciones conocidas de la literatura en Canadá, Australia y China, revelan varios cambios relativos del nivel del mar en la extinción del Frasnian Tardío al Famenniano Temprano.

El evento finifrasniano (LKW), en el cerro El Yugo, está bien caracterizado con la desaparición de *E. devonica* y *T. measpis*, la presencia de *P. Rhenana*, los óxidos mayores invocados y la aparición de *L. parakosvensis* (Tournesiano) en la columna estratigráfica. Estos testimonios permiten proponer la presencia de dicho evento en la porción meridional de América.

Agradecimientos

El presente estudio estuvo sustentado, parcialmente, por el financiamiento del proyecto ECOS/ANUIES M13U01 “Evolución de los ecosistemas y la biodiversidad durante el Paleozoico”, con número de identificación 22949. También se contó con el apoyo del Departamento de Geología de la Universidad de Sonora y del Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México. Particularmente, se agradece a Pilar Navas-Parejo (ERNO-UNAM) y Heriberto Borjas por la caracterización de los elementos conodontales; de una manera especial se agradece a Salvador Domínguez-Bella y a Luis Miguel Rodríguez Jaren por su invaluable ayuda en la realización de los análisis de óxidos mayores en el Servicio Central de Ciencia y Tecnología de la Universidad de Cádiz, España.

Referencias

- Antropov, I. A. (1959). Foraminifères du Dévonien de Tatarie. *Izvestiya Kazanskogo Filiala, Akademiya Nauk SSSR*, 7, 11–33.
- Bambach, R., Knoll, A. y Wang, S. (2004). Origination, extinction, and mass depletions of marine diversity. *Paleobiology*, 30, 522–542. <https://doi.org/10.1666/0094-8373>.
- Benton, M. J. (2003). *When life nearly died: the greatest mass extinction of all time*. London: Thames & Hudson.
- Bischoff, G. (1956). Oberdevonische Conodonten (toId) aus dem Rheinischen Schiefergebirge, Notizblatt der hessischen Landesamt der Bodenforschung/ *Conodontes del Devónico Superior (toId) de las montañas Rhenish Slate, hoja de notas de la Oficina Estatal de Hesse para la Investigación del Suelo*, 84-S. Harxheim, Alemania: ConchBooks.
- Bond, D. y Wignall, P. (2008). The role of sea-level change y marine anoxia in the Frasnian-Famennian (Late Devonian) mass extinction. *Paleogeography, Paleoclimatology, Palaeoecology*, 263, 107–118. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2008.02.015>.
- Borjas, H. (2021). Bioestratigrafía de las secuencias del cerro El Guayacán y el cerro El Yugo, Sonora, México (*Tesis de Maestría en Ciencias-Geología*), Universidad de Sonora, Hermosillo, México.
- Bykova, E. V. (1952). Foraminifery Devona Russkoi Platformy i Priuralya (Foraminifères dévoniens de la Plate-forme Russe et du Pré-oural). *Trudy VNIGRI. Microfauna USSR*, 5, 5–64.
- Caplan, M. y Bustin, R. (1999). Devonian-Carboniferous Hangenberg mass extinction event, widespread organic-rich mudrock and anoxia: causes and consequences. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 148, 187–207. [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(98\)00218-1](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(98)00218-1).
- Cooper, G. A. y Arellano, A. (1946). Stratigraphy near Caborca, northwestern Sonora, Mexico, *American Association of Petroleum Geologists*, 30, 6006–611.
- Cuen-Romero, F. J., Valdez-Holguín, J. E., Buitrón-Sánchez, B. E., Monreal, R., Enriquez- Ocaña, L. F., Aguirre-Hinojosa, E. et al. (2018). Trilobite-based biostratigraphy (arthropoda-trilobita) and related faunas of the Cambrian from Sonora, Mexico. *Journal of South American Earth Sciences*, 8, 227–236.
- Cuen-Romero, F. J., Reyes-Montoya, D. R. y Noriega-Ruiz, H. A. (2020). El Paleozoico inferior de Sonora, México: 120 años de investigación paleontológica. *Paleontología Mexicana*, 9, 1–15.
- Flügel, E. (2004). *Microfacies of carbonate rocks, analysis, interpretation and application*. Berlín, Heidelberg, New York: Springer Verlag.
- Hallam, A. y Wignall, P. B. (1997). *Mass extinctions y their aftermath*. Oxford, New York, Tokyo: Oxford University Press.
- Jeppsson, L. y Anehus, R. (1995). A buffered formic acid technique for conodont extraction. *Journal of Paleontology*, 69, 790–794.
- Kaiser, S., Aretz, M. y Becker, R. (2016). The global Hangenberg Crisis (Devonian- Carboniferous transition): Review of a first-order mass extinction, *Geological Society, London, Special Publications Home*, 423, 387–437. <https://doi.org/10.1144/SP423.9>.
- Ketner, K. B. y Noll, J. H., Jr. (1987). Preliminary geologic map of the cerro Cobachi area, Sonora, Mexico. U.S. Geological Survey Miscellaneous Field Studies Map MF- 1980.scale 1: 20,000.
- King, R. (1939). Geological reconnaissance in northern Sierra Madre Occidental of México. *Bulletin Geological Society of America*, 50, 1625–172.
- Lipina, O. A. (1950). Foraminifery verkhnego devona Russkoi platformy (Foraminifères du Dévonien supérieur de la Plateforme Russe). *Akademiya Nauk SSSR, Trudy Instituta Geologologii*, 119, *Geologicheskaya Seriya*, 43, 110–133.
- Lipina, O. A. (1955). Foraminifery turneiskogo yarusa i verkhnei chasti devona Volgo- Uralskoi oblasti i zapadnogo sklona Srednego Urala (Foraminifères de l'étage tournaisien et de la partie supérieure du Dévonien de la région Volga-Oural et du versant occidental de l'Oural central). *Akademiya Nauk SSSR, Trudy Instituta. Geologii*, 163, *Geologicheskaya Seriya*, 70, 1–96 (en ruso; traducción al francés: Bureau de Recherches Géologiques et Minières n° 1640).
- McGhee, G. R. (1996). *The Late Devonian Mass Extinction. The Frasnian-Famennian Crisis*. New York: Columbia University Press.
- Minjarez, I., Palafox, J. J., Torres, Y., Martínez, J. A., Rodriguez, B. y Villalobos, R. (1985). Consideraciones respecto a la estratigrafía y estructura del área de Sahuaripa- Arivechi, *Boletín Departamento Geología. Universidad de Sonora*, 2, 90–105.
- Miller, A. K. y Youngquist, W. (1947). Conodonts from the type section of the Sweetland Creek shale in Iowa. *Journal of Paleontology*, 21, 501–517.
- Müller, K. J. y Müller, E. M. (1957). Early Upper Devonian (Independence) conodonts from Iowa, part I. *Journal of Paleontology*, 31, 1069–1108.
- Myrow, P., Ramezani, J., Hanson, A., Bowring, S., Racki, G. y Rakociński, M. (2014). High-precision U–Pb age y duration of the latest Devonian (Famennian) Hangenberg event, and its implications. *Terra Nova*, 26, 222–229.
- Noll, J. (1981). Geology of the Picacho Colorado area, northern Sierra de Cobachi, central Sonora, Mexico (*Tesis de maestría*). Flagstaff, Ariz., Northern Arizona University.
- Noll, J. H., Dutro, J. T., Jr. y Beus, S. S. (1984). A new species of the Late Devonian (Famennian) brachiopod *Dzieduszyckia* from Sonora, Mexico. *Journal of Paleontology*, 58, 1412–1421.
- Ochoa, J. y Sosa, J. (1993). Geología y estratigrafía de la Sierra Agua Verde con énfasis en el Paleozoico (*Tesis*). Universidad de Sonora. Hermosillo, México.
- Palafox-Reyes, J. (2011). Du cratón au Rheique: Le nord et le centre de l'état de Sonora (Mexique) au Paleozoïque Supérieur (Devonian-Pensylvanien), lithostratigraphy,

- biostratigraphy, aproche geochimique et implications géologiques (*Tesis doctoral*). Université de Lille. Francia.
- Peiffer-Rangin, F. (1987). Biostratigraphic study of Paleozoic rocks of northeastern y central Sonora (*Tesis*). Université de Paris. Francia.
- Petryk, A. y Mamet, B. (1972). Lower Carboniferous algal microflora, southwestern Alberta. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 9, 767–802.
- Phillips, J. (1841). *Figures and description of the Paleozoic fossils, Devon, and West- Somerset*. London: Longman, Brown, Green and Longmans.
- Racki, G. (2005). Towards understying Late Devonian global events: fewanswers, many questions. En D. J. Over, J. R. Morrow y P. B. Wignall (Eds.), *Understying Late Devonian y Permian-Triassic biotic y climatic events: towards an integrated approach, developments in Palaeontology and Stratigraphy* (pp. 5–36). Amsterdam: Elsevier.
- Ransome, F. L. (1904). The geology and ore deposits of the Bisbee Quadrangle, Arizona. *U.S. Geological Survey, Professional Paper*, 21, 1–163.
- Rauzer-Chernousova, D. M. y Fursenko, A. V. (1937). *Opredelitel' foraminifer neftenosnykh rayonov SSSR (Manuel des foraminifères des régions pétrolifères de l'URSS)*. Leningrado: Glavnaya Redaktsya Gorno-Toplivnoi Literaturny.
- Syberg, C. (1976). Conodont biofacies of Late Devonian *Polygnathus Styriacus* Zone in Western United States. *The Geological Association of Canada Special Paper*, 15, 171–186.
- Sepkoski, J. (1996). Patterns of Phanerozoic extinction: a perspective from global data bases. En O. H. Walliser (Ed.), *Global events and event stratigraphy* (pp. 35–51). Berlin: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-79634-0_4.
- Thomas, N. L. (1931). New early fusulinids from Texas. *University of Texas Bulletin*, 3101, 27–33.
- Vega-Granillo, R. y Araux-Sánchez, E. (1985). *Estudio geológico de la Sierra La Campaneria y sus yacimientos minerales, Vol. 2*. Departamento de Geología, Universidad de Sonora.
- Walliser, O. H. (1996). *Global events in the Devonian and Carboniferous*. Berlin, Heidelberg: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-79634-0_11.
- Ziegler, W. y Sandberg, C.A. (1990). The Late Devonian standard conodont zonation. *Courier Forschungsinstitut Senckenberg*, 121, 1–115.