

***Rusophycus* y *Cruziana*, galerías y rastros de trilobites del Terreneuviano (Cámbrico inferior) de la Formación Puerto Blanco, Noroeste de Sonora, México. Implicaciones paleoambientales**

Alina Marcela Hernández-Barbosa^a, Francisco Sour-Tovar^{a,*}

^aMuseo de Paleontología, Departamento de Biología Evolutiva, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, 04510, Ciudad de México, México.

* fcosour@ciencias.unam.mx

Resumen

Se describen cinco galerías asignadas al icnogénero *Rusophycus* y un rastro que se asigna a *Cruziana*. El material se encontró en la unidad 4 de la Formación Puerto Blanco, Cámbrico inferior (Terreneuviano) de la región de Caborca-Pitiquito, en el noroeste de Sonora; entre las galerías se reconoce la presencia de *Rusophycus marginatus*. Se atribuye el origen de los icnofósiles descritos a actividades de descanso y desplazamiento de trilobites. La asociación caracteriza una icnofacies *Cruziana* que se desarrolló en un paleoambiente con cambios de condiciones de meso a infralitorales.

Palabras clave: *Rusophycus*, Icnofacies *Cruziana*, Cámbrico inferior, Sonora, México.

Abstract

Five burrows of the ichnogenus *Rusophycus* and a *Cruziana* type trace are described. The material was found at unit 4 of the Lower Cambrian (Terreneuvian), Puerto Blanco Formation from the Caborca-Pitiquito region in northwestern Sonora. The occurrence of *Rusophycus marginatus* is recognized among the burrows. The origin of these ichnofossils is attributed to resting and locomotion activities of trilobites. The assemblage characterizes a *Cruziana* ichnofacies which developed in a paleoenvironment with changes from meso to infralitoral conditions.

Keywords: *Rusophycus*, *Cruziana* Ichnofacies, Lower Cambrian, Sonora, Mexico.

1. Introducción

En la región de Caborca-Pitiquito, al noroeste de Sonora, se han encontrado las rocas fosilíferas más antiguas del territorio mexicano con edades que abarcan del Proterozoico al Cámbrico medio. El primer reporte de las localidades de la región fue realizado por Stoyanow (1942), y posteriormente Cooper y Arellano (1946) describieron y nombraron seis formaciones de edad cámbrica que sobreyacen de manera concordante a la Formación La Ciénega, unidad que contiene rocas ígneas y sedimentarias del Ediacareense (Sour-Tovar *et al.*, 2007). De la más antigua a la más reciente, las unidades del Cámbrico inferior son

las formaciones Puerto Blanco y Cuarcita Proveedora y del Cámbrico inferior-medio las formaciones Buelna, Cerro Prieto, Arrojos y El Tren. A finales de los años cuarenta y durante la década de los cincuenta del siglo XX, Lochman en 1948, 1952 (en Cooper *et al.*, 1952), 1953 y 1956 realizó las primeras descripciones y asignaciones taxonómicas de los trilobites del Cámbrico inferior-medio de la región y una de las primeras correlaciones entre las rocas precámbrico-cámbricas de la región de Caborca y las del suroeste de Estados Unidos. Esta correlación fue apoyada con el trabajo de Damon *et al.* (1962) quienes realizaron fechamientos radiométricos del basamento ígneo presente en Sonora y que resultó ser coetáneo a rocas

proterozoicas del suroeste de los Estados Unidos. Entre diversos trabajos posteriores destaca una síntesis de los estudios existentes hasta 1969, sobre las rocas precámbricas (de Cserna, 1970), las descripciones litoestratigráficas de las rocas proterozoicas del estado de Sonora (Anderson y Silver, 1970; Fritz, 1975), la correlación de las rocas de Sonora con rocas del suroeste de Estados Unidos (Palmer y Halley, 1979) y el reporte de una secuencia precámbrica portadora de estromatolitos, asignada informalmente a las “Capas Gamuza” (Gamper y Longoria, 1979), los cuales fueron descritos por Weber y Cevallos-Ferriz (1980). Stewart *et al.* (1984), estudiaron la secuencia sedimentaria de la región de Caborca e identificaron 14 formaciones que abarcan edades neoproterozoicas y cámbricas (Figura 2), 11 reportadas anteriormente (Stoyanow, 1942; Cooper *et al.*, 1952; Longoria *et al.*, 1978; Longoria y Pérez, 1979; Longoria, 1980, 1981) y proponen como nuevas unidades a las formaciones Clemente y La Cuarcita Tecolote del Neoproterozoico y a la Formación La Ciénega que asignan al Cámbrico inferior. Los mismos autores, de acuerdo a diferencias litológicas y contenido fósil, dividen a la Formación Puerto Blanco en cuatro unidades, hacen referencia a la presencia de trilobites, arqueociátidos, hiolítidos, gasterópodos, braquiópodos e icnofósiles, además realizaron correlaciones con unidades del suroeste de Estados Unidos. Sour-Tovar *et al.* (2007), estudiaron la distribución estratigráfica de los fósiles índice *Cloudina* y *Treptichnus pedum* con la finalidad de determinar la posición del límite Ediacareense-Cámbrico en la región y señalan para la Formación La Ciénega una edad neoproterozoica-cámbrica. Entre los últimos trabajos que se han hecho sobre los afloramientos precámbrico-cámbricos del área están los de Loyd *et al.* (2012, 2013) que señalan la presencia del registro del evento marcado globalmente como la excursión Wonoka-Shuram en estratos de la Formación Clemente, en donde analizan las concentraciones de sulfatos del océano que cubrió la región durante el Neoproterozoico, obteniendo pruebas de fuertes variaciones en la concentración de oxígeno en los océanos y discuten el papel de este fenómeno sobre la evolución de metazoarios.

En este contexto, los estratos que marcan la transición Precámbrico-Cámbrico son ubicados en la parte alta de la Formación La Ciénega y la parte basal de la Formación Puerto Blanco. Tales estratos y su contenido fósil representan el registro de una serie eventos evolutivos relacionados con el origen y diversificación temprana de metazoarios. Los estratos superiores de la Formación La Ciénega contienen restos esqueléticos entre los que se ha identificado a *Cloudina*, fósil índice para la parte terminal del Ediacareense. Estos restos se relacionan al origen de los primeros animales con partes esqueléticas. En la base de la Formación Puerto Blanco, la unidad 1, se encuentra entre otros a *Treptichnus pedum*, icnofósil que se asocia a la colonización del medio infrabentónico. En la parte media-inferior de la Formación Puerto Blanco se registra el hallazgo de fósiles corporales de trilobites y

braquiópodos, que representan el registro local de la llamada Explosión Cámbrica. En la parte media y superior de la misma formación, unidades 2 y 3, se encuentran bancos de arqueociátidos, un registro de los arrecifes fanerozoicos más antiguos que se desarrollan en la Tierra, y sobre ellos, en la parte alta de la unidad 3 y en toda la unidad 4 se tiene un registro muy abundante y diverso de icnofósiles. Una síntesis de los icnofósiles que se presentan en las diferentes unidades de la Formación Puerto fue presentada por Sour-Tovar y Hagadorn (2008). Se considera que identificar a los productores de los diferentes icnofósiles establece la presencia de tales organismos en el paleoambiente y que interpretar sus patrones conductuales permite inferir diversas condiciones bajo las que se depositaron los estratos portadores. En este contexto, el presente trabajo se enfoca al análisis de las galerías y rastros de trilobites que se han encontrado en la unidad 4 de la Formación Puerto Blanco.

2. Localidad

La sección tipo de la Formación Puerto Blanco se encuentra en los afloramientos del flanco oeste de los Cerros de la Proveedora, a 11 km al oeste del municipio de Caborca en Sonora, México (Figura 1). Fue descrita originalmente por Cooper *et al.* (1952), con un espesor de 293 m, compuesta de esquistos verde, arenisca y caliza con fósiles de diferentes invertebrados índice del Cámbrico inferior. En esta sección no está expuesta la base de la formación, pero ésta se puede observar en afloramientos que se encuentran en los Cerros Aquituni, Calaveras, Clemente, Rajón, de La Ciénega y en la Sierra del Viejo. El afloramiento en que se colectaron las muestras de estudio se encuentra entre las coordenadas 30°32'37" latitud norte y 111°53'48" longitud oeste, en el flanco noreste del Cerro Rajón localizado al sureste del poblado de Pitiquito, en el noroeste del estado de Sonora (Figura 1). Los icnofósiles que se describen se recolectaron en estratos de la unidad 4 de la Formación Puerto Blanco.

3. Estratigrafía de la Formación Puerto Blanco

Para la Formación Puerto Blanco se ha estimado un espesor de más de 700 metros y fue dividida en cuatro unidades caracterizadas por su litología y contenido fósil (Cooper y Arellano, 1946; Longoria, 1981; Stewart *et al.*, 1984) (Figura 2). Para la unidad 1 se ha medido un espesor de alrededor de 285 metros, está compuesta por una alternancia de estratos de diorita, volcaniclastos arenosos y conglomeráticos, dolomita, cuarcita, limolita y dolomita limosa. La unidad 2, con un espesor total de aproximadamente 180 metros, está constituida principalmente por estratos de arenisca y lutita en los que se han encontrado restos de los trilobites *Fallotaspis* y *Nevadella?* que marcan una edad del Montezumano, la base de la Serie 2 del Cámbrico

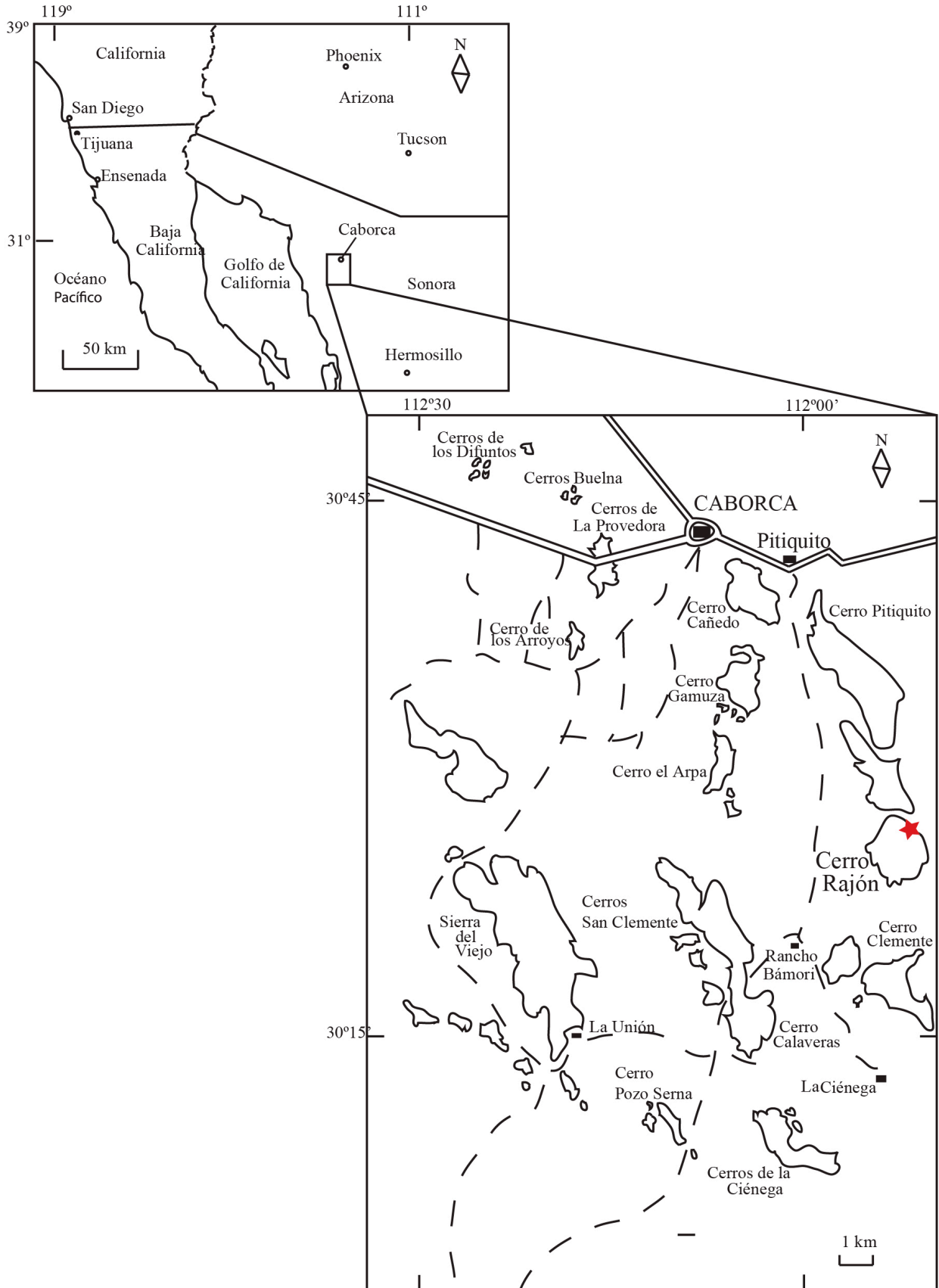


Figura 1. Mapa de ubicación de la localidad “Cerro Rajón”. La estrella señala el flanco noreste de Cerro Rajón donde se recolectó el material que se describe en el presente trabajo (modificado de Stewart *et al.*, 1984).

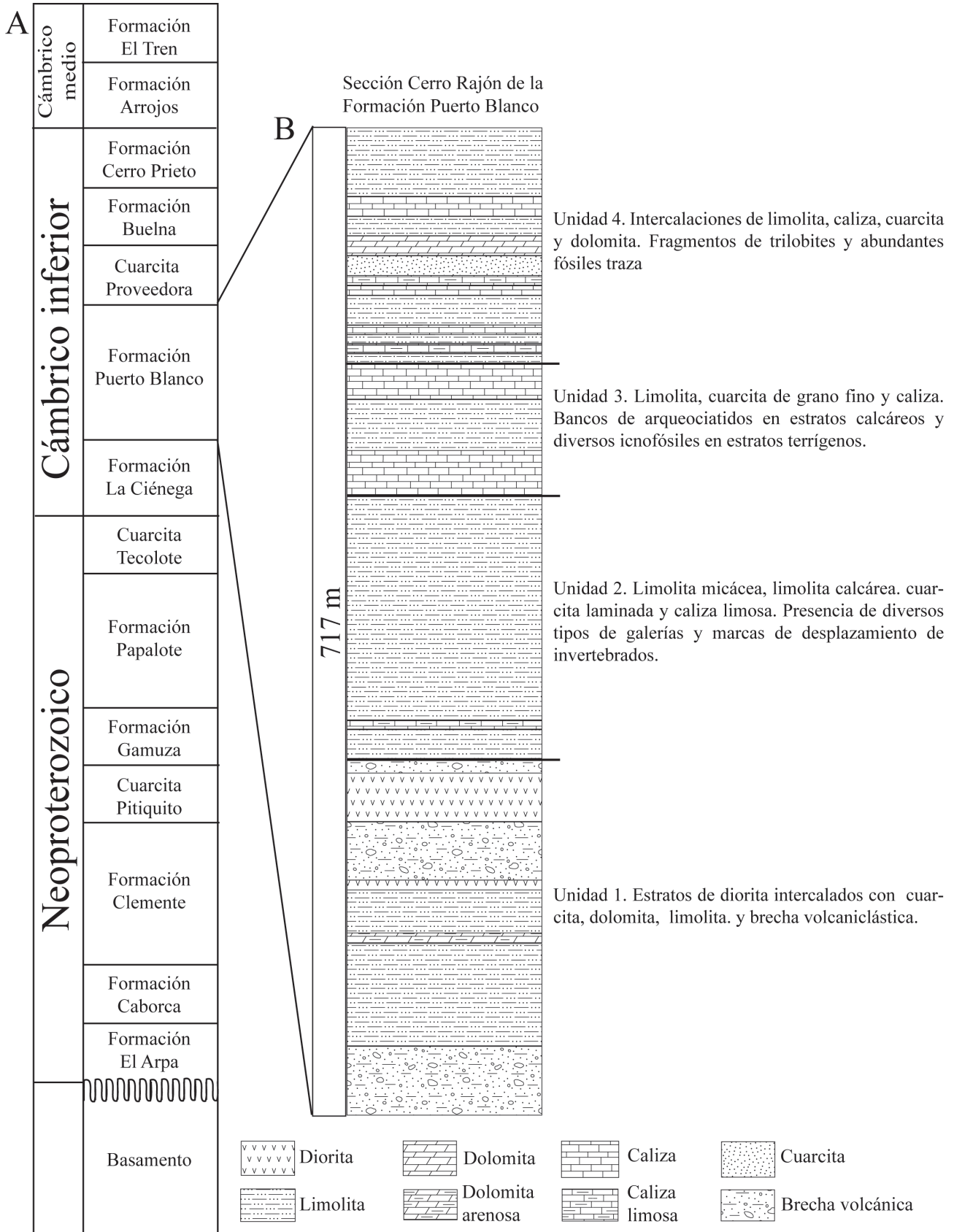


Figura 2. Derecha (B), Sección estratigráfica de la Formación Puerto Blanco en la localidad de Cerro Rajón y su correlación con la columna general (A) de la secuencia Precámbrico-Cámbrico de la región de Caborca-Pitiquito elaborada por Stewart *et al.* (1984).

(Hollingsworth y Stewart, 2003). La unidad 3 posee un espesor de cerca de 120 metros, presenta principalmente estratos de caliza con algunas intercalaciones de lutita. En esta unidad domina la presencia de bancos arrecifales formados por arqueociátidos con espesores de hasta 6 metros. En la parte alta de esta unidad, en estratos areno-limosos, se encuentran diferentes tipos de icnofósiles, incluyendo a *Rusophycus*, *Scolicia* y *Bergaueria*. La unidad 4, con 140 metros de espesor, se caracteriza por intercalaciones de caliza, dolomita, cuarcita y limolita; en estratos de rocas calcáreas es común la presencia de *Skolithos* y en algunos estratos de dolomita se han encontrado restos de los trilobites *Laudonia* y *Wanneria* que indican una edad del Dyerano, en la Serie 2 del Cámbrico. En la parte alta de esta unidad, en estratos de limolita, se encuentra una asociación con abundantes y diversos tipos de icnofósiles, en su mayoría aún no descritos. Entre ellos, sobresalen los especímenes de *Rusophycus* y *Cruziana* que se describen en el presente trabajo.

La Formación Puerto Blanco sobreyace de manera concordante a la Formación La Ciénega, de edad ediacariana-cámbrica, y subyace a la Formación Proveedora cuya edad se ubica entre los Pisos 2 y 3 del Cámbrico.

4. Icnología Sistemática

Los ejemplares descritos se encuentran depositados en el Museo de Paleontología de la Facultad de Ciencias cuyo acrónimo es FCMP.

Icnogénero *Rusophycus* Hall, 1852

Icnoespecie tipo: *Fucoides biloba* Vanuxem, 1842.

Diagnosis: Galerías cortas, bilobuladas, raramente multilobuladas. Lóbulos con simetría bilateral predominante. Formas convexas (hypichnia) con un surco medio distintivo; formas cóncavas (epichnia) con una cresta media. El contorno varía de ovalado a una forma de grano de café, los rastros presentan rasguños que van de oblicuos a transversales o longitudinales en diferentes arreglos; en algunos casos son lisos (Stachacz, 2012).

Rusophycus marginatus Bergström y Peel, 1988
Figura 3a–3d

Diagnosis: Madriguera (cubichnia) de artrópodo con rasguños de extremidades con forma de peine; ocasionalmente se presentan rasguños transversales acomodados irregularmente; impresión del escudo cefálico con arco anterior; comúnmente presenta forma de *Rusophycus*, pero también puede presentar forma de *Cruziana* [sic] (Bergström y Peel, 1988).

Material: Ejemplares FCMP-1235, FCMP-1236, FCMP-1237, FCMP-1238, FCMP-1239, FCMP-1244,

FCMP-1245, FCMP-1248, FCMP-1251, FCMP-1254, FCMP-1255.

Descripción: Madrigueras de descanso (cubichnia) bilobuladas; su longitud varía de 43.45 mm a 103.61 mm, el ancho va desde los 31.05 a los 79.72 mm; la mayoría son madrigueras superficiales sobre el plano de sedimentación, en algunos casos en ligeras depresiones. Las impresiones de los rasguños de las espinas terminales divergen hacia el margen posterior y la mayoría de las veces son interceptadas por impresiones perpendiculares de los endopoditos; la intensidad de los rasguños de las espinas terminales y de las marcas de los endopoditos permiten inferir periodos de enterramiento muy variables. Se observa la impresión del escudo cefálico, asociado a remoción del sustrato, y la unión con los lóbulos; en la parte posterior la separación de los lóbulos es marcadamente mayor.

Discusión: La asignación del material descrito a *R. marginatus* se basa principalmente en la presencia de las impresiones del escudo cefálico con falta de espinas genales. El material se distingue de *Cruziana rugosa* reportada para el Ordovícico de América del Sur (d'Orbigny, 1842), por las impresiones del escudo cefálico; *C. furcifera* (d'Orbigny, 1842), y *C. goldfussi* (Roult, 1850) son icnoespecies similares, sin embargo, carecen de los rasguños de espinas terminales y solo se han reportado para el Tremadociano (Ordovícico Inferior) de América del Sur y Silúrico del Reino Unido. Las madrigueras descritas para Sonora se asocian a eventos de enterramiento durante los cuales el movimiento del cefalón provoca la remoción del sedimento.

Rusophycus isp. A
Figura 4a

Material: Ejemplares FCMP-1241, FCMP -1243, FCMP-1249.

Descripción: Madrigueras de descanso (cubichnia) bilobuladas, su longitud varía entre 24.48 mm y 77.47 mm, el ancho de 26.71 mm a 43.41 mm; y la profundidad entre 12.04 y 33.79 mm. Los lóbulos se encuentran unidos en la parte anterior y divergen hacia la parte posterior en ángulos que van de los 15° a los 36°. En los ejemplares se observan las marcas de endopoditos y en los especímenes FCMP-1241 y FCMP-1243 se encuentran marcas de espinas terminales en posición perpendicular a los endopoditos. No se observa la impresión del escudo cefálico.

Discusión: La morfología es similar a la descrita por Bergström y Peel (1988), para *Rusophycus marginatus* del Cámbrico inferior de Groenlandia, sin embargo, los ejemplares analizados difieren por presentar una mayor profundidad. El hecho de que en sólo dos ejemplares se observen marcas de espinas terminales nos indica que el tiempo de reposo de los trilobites fue diferente para cada madriguera analizada.

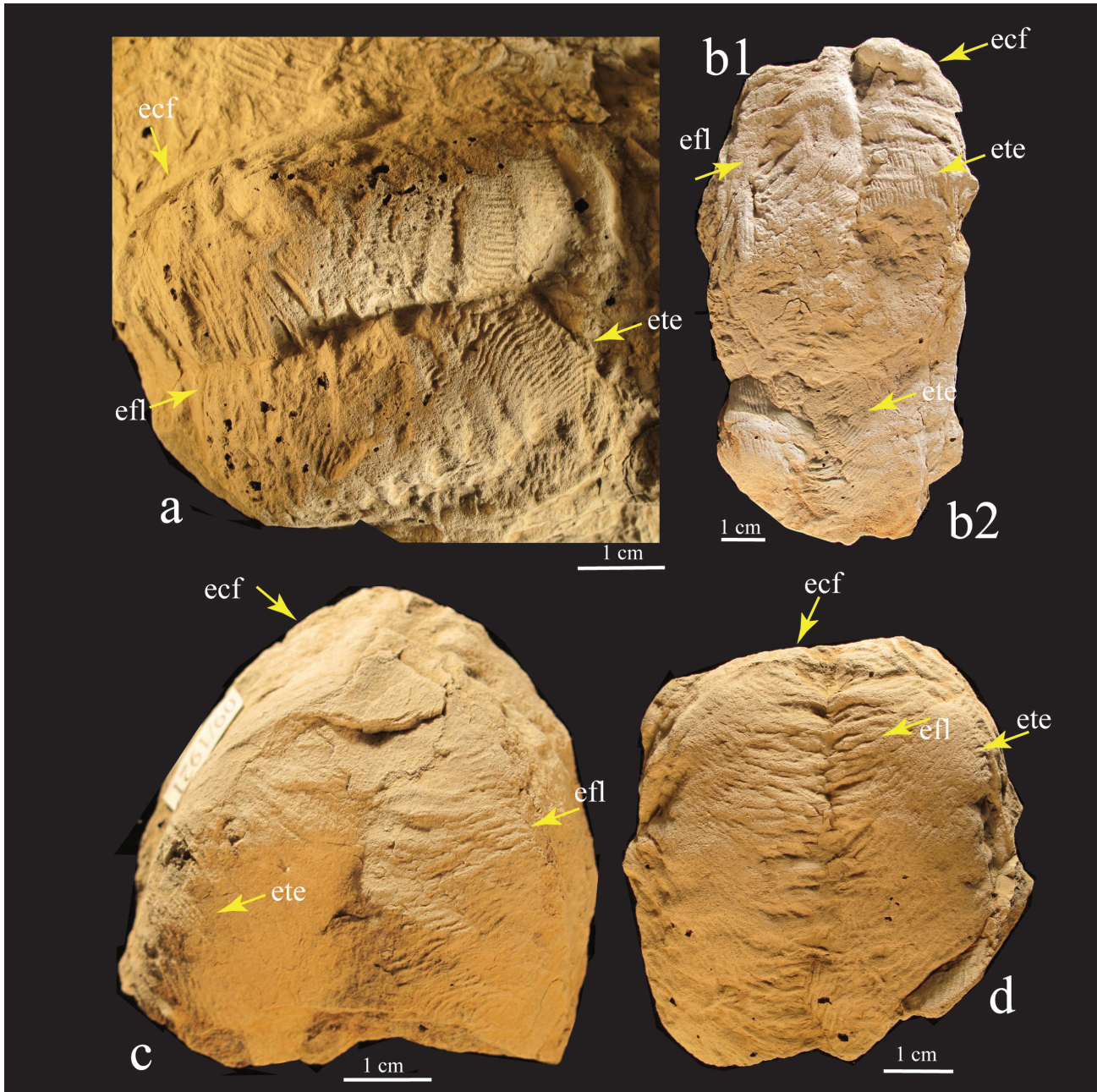


Figura 3. *Rusophycus marginatus*. a. FCMP-1244, b1. FCMP-1245, b2. FCMP-1255, c. FCMP-1238 y d. FMCP-1239. Las cuatro madrigueras muestran bilobulación, las impresiones del escudo cefálico (ecf), de los endopoditos flexionados (efl) y de las espinas terminales de los endopoditos (ete). En b, los ejemplares FCMP-1245 y FCMP-1255 son dos galerías sobrepuestas. Material colectado en la unidad 4 de Formación Puerto Blanco, Sección Cerro Rajón, área de Caborca-Pitiquito, Noroeste de Sonora.

Rusophycus isp. B.
Figura 4e

Material: FCMP-1242.

Descripción: Madriguera de forma bilobulada, con una longitud de 20.05 mm y un ancho de 36.33 mm. Sus lóbulos divergen posteriormente en un ángulo 50° y presentan tres marcas simétricas de los endopoditos en la parte posterior.

Discusión: La morfología que presenta el ejemplar FCMP-1242 es similar a la de *Cruziana salomonis*, del

Cámbrico inferior de Turquía y Cámbrico medio de Jordania (Seilacher, 1990), que también presentan rasguños en grupos de tres en la parte posterior; sin embargo *C. salomonis* presenta un ancho y largo mayores a los del ejemplar de Sonora y no presenta una divergencia de los lóbulos en la parte posterior. *Rusophycus* isp. B también presenta una morfología similar a la de *Rusophycus didymus* del Cámbrico inferior de Pakistán (Seilacher, 1955) y de las Montañas White Inyo en California (Alpert, 1976), cuyas dimensiones son menores y presentan rasgos, como las

impresiones del escudo cefálico o de las antenas, que no se han preservado con detalle en el ejemplar de Sonora.

Rusophycus isp. C
Figura 4c–d

Material: Ejemplares FCMP-1240, FCMP-1247.

Descripción: Madrigueras bilobuladas con una longitud de 65.24 mm a 97.37 mm, un ancho de 60.02 a 58.81 mm y una profundidad máxima de 22.35 mm. En el ejemplar FCMP-1247 se observan marcas muy finas de espinas terminales; en el ejemplar FCMP-1240 se observan marcas de endopoditos en cada lóbulo; el ejemplar FCMP-1240 presenta la impresión de la parte posterior del escudo cefálico, de las mejillas libres, del hipostoma y de las espinas genales.

Discusión: El material de *Rusophycus* isp. C presenta una morfología similar a la de *Rusophycus dispar*, del Cámbrico inferior de Suecia (Linnarsson, 1859), pero en los ejemplares de Sonora se observa que los rasguños de los endopoditos tienen una dirección anteroposterior, opuesta a la que se observa en *R. dispar*. *Rusophycus* cf. *dispar* del Cámbrico inferior de California (Alpert, 1976), también es parecido, pero se distingue del material de Sonora por la orientación posteroanterior de los rasguños dejados por los endopoditos, por dimensiones menores en la longitud, ancho y profundidad de la galería y por las proporciones entre esas medidas. *Rusophycus marginatus* del Cámbrico inferior de Groenlandia (Bergström y Peel, 1988), se distingue por una anchura y longitud mayores y porque los rasguños se encuentran dispuestos de manera irregular. El ejemplar FCMP-1240 tiene una mayor profundidad de la que se ha observado en ejemplares de *R. marginatus* que se describen en este trabajo y además presenta impresiones de espinas genales. Dado que estas estructuras son muy difíciles de preservar en madrigueras provisionales, el observar las marcas del escudo cefálico, de las mejillas libres, del hipostoma y de las espinas genales, indica que los trilobites productores permanecieron dentro de las madrigueras durante un periodo de tiempo prolongado.

Rusophycus isp. D
Figura 4b

Material: Ejemplar FCMP-1250.

Descripción: Madriguera bilobulada con una longitud de 92.65 mm y un ancho de 60.92 mm. En el lóbulo derecho se observan las impresiones de ocho endopoditos y de siete en el izquierdo. Las marcas de los endopoditos se encuentran flexionadas hacia la parte central del icnofósil, se bifurcan en el extremo en que se presentan las espinas terminales y presentan estrías finas a todo lo largo.

Discusión: El ejemplar presenta similitudes con *Rusophycus avalonensis* del Cámbrico inferior del sureste

de Canadá (Crimes y Anderson, 1985), como son la poca profundidad y encontrar rasguños en grupos de 5 o más, sin embargo, el ejemplar descrito tiene un tamaño mayor que el reportado para *R. avalonensis*. El ejemplar también muestra similitudes con *Rusophycus burjensis* del Cámbrico medio de Jordania (Hofmann *et al.*, 2012), como lo son un largo y ancho dentro del promedio de la icnoespecie, la parte anterior más ancha que la posterior y grupos de espinas terminales al final de los endopoditos. No se da una asignación icnoespecífica por la carencia de más ejemplares. La fina conservación de las estrías y bifurcación de los endopoditos se ha interpretado como evidencia de un lapso de reposo prolongado posterior al proceso de excavación que realizó el trilobite.

ICNOGÉNERO *Cruziana* d'Orbigny, 1842

ICNOESPECIE TIPO: *Cruziana rugosa* d'Orbigny, 1842.

Diagnóstico: Madrigueras de interfaz o rastros alargados (relación longitud/ancho 2:1), por lo general en forma de cinta bilobulada (raramente unilobulada) preservados como surcos con cresta media cuando se conserva como epirelieve cóncavo, como senderos bilobulados con surco medio cuando se conservan en hiporelieves convexos o como surcos que están en estrecha proximidad con menos del ancho de un surco de separación. Rastros cubiertos por rasguños en forma de espinas o transversales, con o sin zonas lisas o rasguños longitudinales periféricos a los rasguños internos, con o sin crestas laterales o con marcas difusas si es un hiporelieve (Keighley y Pickerill, 1996).

Cruziana isp. A
Figura 4f

Material: Ejemplares FCMP-1246, FCMP-1252, FCMP-1253.

Descripción: Rastros de desplazamiento (repchnia) con un largo que varía de 17.78 a 75.36 mm y un ancho de 6.01 a 24.11 mm. En general se presenta una mala preservación por lo cual solo se pueden observar impresiones muy tenues de las espinas terminales. El ejemplar FCMP-1253 (Figura 4f), presenta un surco central bien definido con depresiones de 2.41 mm de largo y se intercepta, en un ángulo de 55°, con un rastro de 47.87 mm de largo por 21.03 mm de ancho.

Discusión: La mala preservación de los rastros no permite observar características que permitan asignar el material a alguna icnoespecie de *Cruziana*. Debido a que los rasguños de las espinas terminales se encuentran alargados, se puede inferir que la velocidad del desplazamiento de los organismos que generaron el rastro era moderada. En el ejemplar FCMP-1253 se observa la transición de madriguera a rastro y puede inferirse que se trata del rastro que dejó el trilobite al abandonar la madriguera.

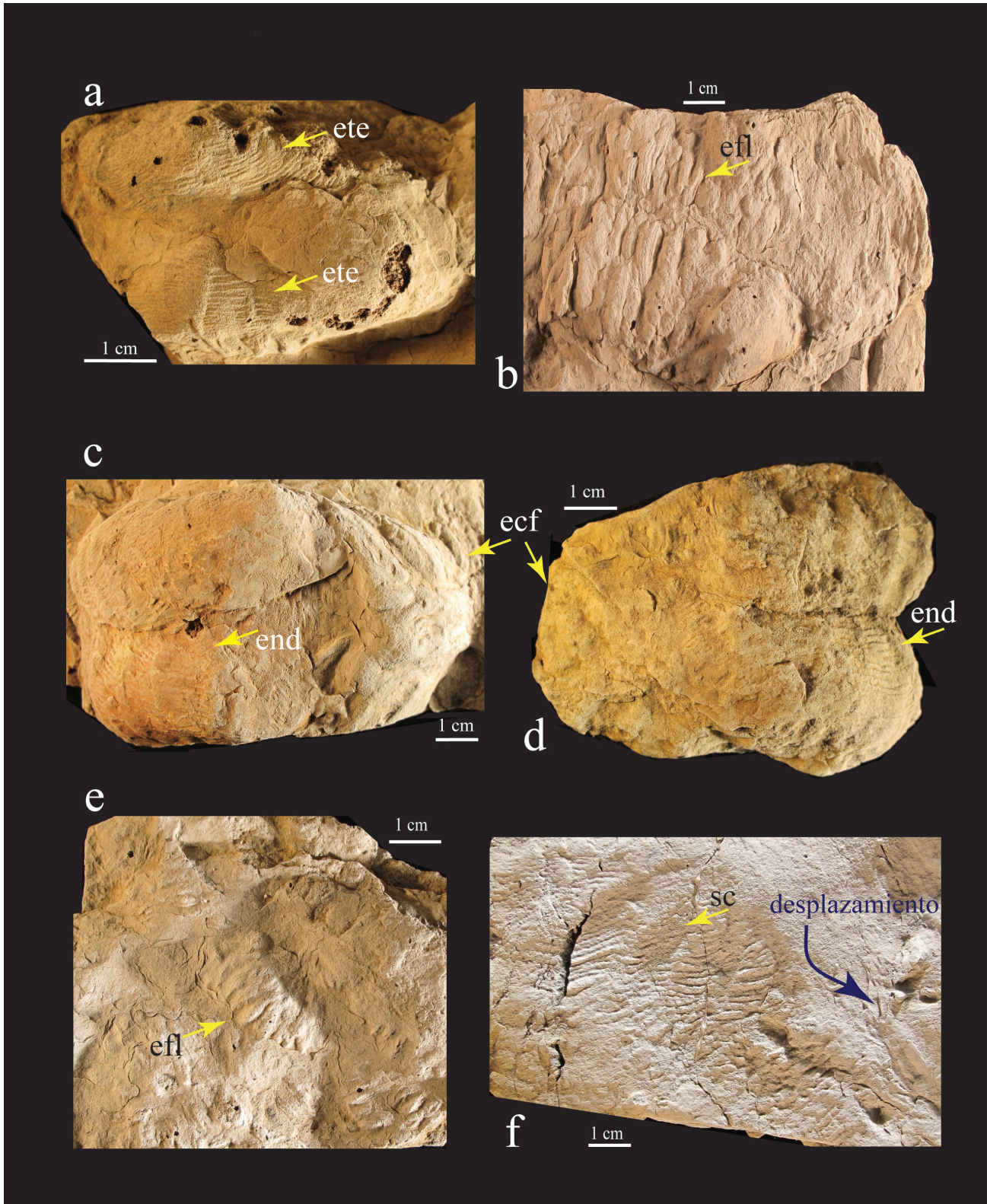


Figura 4. a. *Rusophycus* isp. A, ejemplar FCMP-1243, madriguera bilobulada donde se señalan las marcas de las espinas terminales de los endopoditos (ete); b. *Rusophycus* isp. D, ejemplar FCMP-1250, madriguera bilobulada, se observan las marcas flexionadas de los endopoditos (efl); c y d. *Rusophycus* isp. C, c. ejemplar FCMP-1240, d. ejemplar FCMP-1247, madrigueras bilobuladas que presentan la impresión del escudo cefálico (ecf) y de los endopoditos (end); e. *Rusophycus* isp. B, ejemplar FCMP-1242, madriguera bilobulada con marcas flexionadas de los endopoditos (efl); f. *Cruziana* isp. A, ejemplar FCMP-1253, rastro de desplazamiento que inicia a partir de una galería con surco central (sc) bien definido; la flecha señala la dirección de desplazamiento. Material colectado en la unidad 4 de Formación Puerto Blanco, Sección Cerro Rajón, área de Caborca-Pitiquito, Noroeste de Sonora.

5. Discusión y conclusiones

5.1. Icnotaxonomía

En el presente trabajo se describieron 6 morfotipos de icnofósiles. La presencia de impresiones del escudo cefálico y la ausencia de las de espinas genales permitió que un primer morfotipo se asignara a la icnoespecie *Rusophycus marginatus* (Bergström y Peel, 1988). En cuatro morfotipos la morfología típica de una madriguera bilobulada permite asignarlos al icnogénero *Rusophycus*, sin lograr una asignación específica. Un sexto morfotipo, que se caracteriza como un rastro bilobulado, con un largo de cerca de 7.5 centímetros se asigna al icnogénero *Cruziana*. Los dos icnogéneros determinados tienen una distribución temporal que va desde el Cámbrico inferior hasta el Presente (Osgood, 1970).

5.2. Organismos productores

Rusophycus, *Cruziana* y *Diplichnites* representan los tres tipos de icnofósiles que tradicionalmente se asocian a trilobites como organismos productores, pero también se han asociado a otros artrópodos, como crustáceos y miriápodos (Arbizu *et al.*, 2009). Para las formas cámbricas, los trilobites, son los invertebrados bentónicos más abundantes y comunes, y con la morfología correspondiente, son el grupo generalmente considerado como el principal productor de este tipo de trazas. En particular para la Formación Puerto Blanco, cuya edad se ha asignado al Cámbrico inferior (Dyerano, Serie 2 del Cámbrico), se han reportados diversos tipos de trilobites entre los que se encuentra a *Fallotaspis*, presente en la parte media de la unidad 2; *Judomia* y *Nevadia* se encuentran en la unidad 3; *Wanneria* en la unidad 4 (McMenamin, 1987) y *Laudonia* en la parte alta de la unidad 4 (Stewart *et al.*, 1984). Todos los géneros mencionados pertenecen al Orden Redlichiida, Suborden Olenellina que son considerados por Lieberman (1998) a partir de análisis filogenéticos, y por Fortey y Owens (1999) por su morfología, como los trilobites más primitivos. El suborden Olenellina se caracteriza por presentar una convexidad dorsoventral moderada, un caparazón con contorno oval, puntas genales, un tórax compuesto por numerosos segmentos, un pigidio pequeño, un cuerpo que se puede arquear considerablemente, ojos grandes y un hipostoma conectado (Rábano, 1999). Los trilobites del género *Laudonia* poseen un cefalón de subcuadrado a subpentagonal en el contorno; espinas genales que se originan opuestas o anteriores al lóbulo 3; espinas procraniales no desarrolladas en adultos; un surco intergenal definido; el área preglabellar no existe o es más corta que el borde, la parte posterior de los lóbulos oculares es opuesta o anterior al lóbulo 1, y el tórax presenta alrededor de 20 segmentos (Palmer y Repina, 1993). Las especies conocidas de *Wanneria* tienen el margen posterior

del cefalón recto o curvado hacia la base de la espina genal, carecen de espinas intergenales, el preglabellar está ausente, la parte posterior de los lóbulos oculares es opuesta o anterior al surco occipital y el tórax posee 17 segmentos en los que el quinceavo presenta una espina genal larga. El pigidio es pequeño, subcuadrado con una muesca media prominente. En especímenes bien preservados, el perímetro de los polígonos está marcado por filas de perforaciones en la parte inferior del exoesqueleto (Palmer y Repina, 1993). La morfología de ambos géneros, *Laudonia* y *Wanneria*, es consistente con los rasgos visibles en las galerías de *Rusophycus* que se describen en este trabajo, como su contorno ovalado y las impresiones de las espinas genales, y en las dimensiones de los rastros de *Cruziana* analizados. La presencia de ejemplares, de ambos géneros de trilobites, en la unidad 4 de la Formación Puerto Blanco corrobora su papel de organismos productores.

5.3. Etología

Siguiendo la propuesta de Seilacher (1953) *Rusophycus* y *Cruziana* son estructuras que se clasifican como *Cubichnia* y *Repichnia* respectivamente. El primer tipo son estructuras de descanso que reflejan el tamaño y la morfología lateroventral del organismo que la produce; el segundo tipo agrupa estructuras superficiales que se asocian a un comportamiento de locomoción. Además de estas interpretaciones, Fortey y Owens (1999) han asociado a *Rusophycus* y *Cruziana* a hábitos depredadores, carroñeros y detritívoros presentados por trilobites olenidos. Por su parte Seilacher y Gishlick (2015) mencionan que algunas madrigueras de *Rusophycus* están asociadas al proceso de muda del exoesqueleto que presentaban los trilobites. Los icnofósiles de *Rusophycus* encontrados en la unidad 4 de la Formación Puerto Blanco, se interpretan principalmente como madrigueras de descanso porque no se observan los nódulos mencionados por Seilacher y Gishlick (2015) que se asocian al proceso de muda del exoesqueleto. Se interpreta que el tiempo que pasaron los trilobites dentro de las madrigueras fue variable, en particular, para los ejemplares FCMP-1240 (*Rusophycus* isp. C) y FCMP-1250 (*Rusophycus* isp. D) (Figura 4b y 4c) se infiere que son madrigueras en donde el trilobite estuvo enterrado por un tiempo prolongado permitiendo la conservación de detalles del hipostoma y la impresión de las espinas terminales de los endopoditos. En el resto de las madrigueras analizadas el tiempo que pasó el trilobite fue menor, rasgo que se interpreta dado que solamente se observan rasguños dejados por los endopoditos. En los ejemplares de *Cruziana* que se han analizado solo se pueden ver marcas alargadas que dejaron los endopoditos, pero la disposición que se observa, en cuanto a la separación corta y homogénea que existe entre cada marca, indica que el trilobite se estaba desplazando a una velocidad moderada. En el ejemplar FCMP-1253 se observa que el trilobite inicia su movimiento a partir de una galería (Figura 4f).

5.4. Icnofacies y Paleoambiente

Además de los icnofósiles *Cruziana* y *Rusophycus*, en la unidad 4 de la Formación Puerto Blanco se han encontrado a los icnogéneros *Bergaueria*, *Paleophycus* y *Skolithos* (Sour-Tovar y Hagadorn, 2008), que en conjunto permiten interpretar la asociación como típica de una icnofacies *Cruziana*. Esta icnofacies es característica de ambientes marinos submareales que presentan una alta diversidad biológica, una salinidad constante, energía moderada y sustratos poco consolidados (MacEachern *et al.*, 2007). Se puede observar en costas, frentes deltaicos y bahías donde los recursos alimenticios van a consistir de partículas suspendidas o depositadas por lo cual la mayoría de los organismos van a presentar hábitos detritívoros y suspensívoros, aunque también van a estar presentes organismos carnívoros y carroñeros (MacEachern *et al.*, 2007). Los organismos productores de los fósiles traza en esta icnofacies prefieren construir madrigueras horizontales, como es el caso de *Rusophycus*, principalmente por el depósito de gran cantidad de partículas orgánicas; los bajos niveles de energía y los sustratos poco consolidados son factores que también influyen en la construcción de este tipo de madrigueras.

Aunada a la información paleoambiental que aportan las galerías estudiadas, también es de importancia mencionar que la presencia de parches arrecifales de arqueociátidos en la unidad 3 de la Formación Puerto Blanco, permite inferir que en el paleoambiente se desarrollaron facies que representan condiciones de aguas cálidas, con buena oxigenación, poca turbidez, buena iluminación y una profundidad entre los 30 y 40 metros. El hallazgo de galerías del icnogénero *Skolithos*, en los mismos niveles en que se encuentra a *Rusophycus* y *Cruziana*, indica la existencia de organismos con hábitos suspensívoros. *Skolithos*, galería típicamente vertical y de dimensiones relativamente grandes, es característico de ambientes de alta energía, con un sustrato libre de partículas orgánicas y en donde se van a presentar cambios bruscos en la velocidad de sedimentación, erosión y retrabajo físico de los sedimentos (MacEachern *et al.*, 2007). Al encontrar a *Skolithos* en una icnofacies *Cruziana* y asociado a icnofósiles como *Rusophycus* y *Cruziana* podemos inferir que en el depósito de sedimentos de la unidad 4 se presentaban condiciones estacionales con un aumento en la energía y en la erosión de los sedimentos superficiales, condiciones que son comunes en ambientes cercanos a la costa. Estos cambios podrían haberse dado en caso de que se presentaran regresiones y transgresiones del océano o por cambios en la afluencia de una posible desembocadura fluvial. Integrando la información, se puede postular que los sedimentos en que se encuentran los icnofósiles descritos, *Rusophycus* y *Cruziana*, se acumularon en una facies de tipo lagunar que formó parte de un ambiente litoral con zonas arrecifales, registradas por los parches de arqueociátidos, y partes sujetas esporádicamente

a exposiciones subáreas o de aumento en el oleaje, marcadas por la presencia de *Skolithos*. La extensión geográfica que abarcaron los diferentes ambientes en que se dio el depósito de la Formación Puerto Blanco es difícil de calcular; sin embargo, la distancia máxima que se tiene entre dos localidades, la de Cerro Rajón y Cerros de la Proveedora es de 20 km. Esta distancia nos da el mínimo que pudo existir entre dos subambientes.

Agradecimientos

A los árbitros R. Guerrero-Arenas y M.A. Torres-Martínez, por la revisión crítica del manuscrito original y sus acertadas observaciones y sugerencias. J.S. Hollingsworth aportó importante ayuda en la determinación taxonómica de los trilobites presentes en la Formación Puerto Blanco. L. Martín-Medrano y D. Navarro-Santillán apoyaron en las actividades curatoriales y al lado de J.W. Hagadorn, E. Smith, K. Castillo-Espinoza y I. de la Mora colaboraron de manera entusiasta durante el trabajo de campo.

Referencias

- Alpert, S.P., 1976, Trilobite and star-like trace fossils from the White-Inyo Mountains: California: *Journal of Paleontology*, 50(2), 226–239. Disponible en <<http://www.jstor.org/stable/1303490>>.
- Anderson T.H., Silver L.T., 1970, Reconnaissance survey of Precambrian rocks, northwestern Sonora, Mexico: *Geological Society of America Abstracts with Programs*, 2(7), 484.
- Arbizu, M., Liñan, E., Rábano, I., 2009, Trilobita, en Martínez-Chacón, M.L., Rivas, P. (eds.), *Paleontología de Invertebrados*: Gijón, Sociedad Española de Paleontología, Instituto Geológico y Minero de España, Universidad de Oviedo, Universidad de Granada, 119–153.
- Bergström, J., Peel, J.S., 1988, Lower Cambrian trace fossils from northern Greenland: *Grønlands Geologiske Undersøgelse Rapport*, 137, 43–53.
- Cooper, G.A., Arellano, A., 1946, Stratigraphy near Caborca, northwest Sonora, Mexico: *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 30(4), 606–611.
- Cooper, G.A., Arellano, A.R.V., Johnson, J.H., Okulitch, V.J., Stoyanow, A., Lochman, C., 1952, Cambrian stratigraphy and paleontology near Caborca, northwest Sonora, Mexico: *Smithsonian Miscellaneous Collections*, 119(1), 184.
- Crimes, T.P., Anderson, M.M., 1985, Trace Fossils from Late Precambrian–Early Cambrian Strata of Southeastern Newfoundland (Canada): *Temporal and Environmental Implications: Palaeontology*, 59(2), 310–343. Disponible en <<http://www.jstor.org/stable/1305031>>.
- De Cserna, Z., 1970, The Precambrian of Mexico, en Rankam, K. (Ed.), *The Precambrian IV*: New York, John Wiley and Sons, 253–270.
- Damon, P.E., Livingston, D.E., Mauger, R.L., Giletti, B.J., Pantoja-Alor, J., 1962, Edad del Precámbrico Anterior y de otras rocas del Zócalo de la región de Caborca–Altar de la parte noroccidental del Estado de Sonora: *Boletín del Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México*, 64, 11–44.
- Fortey, R.A., Owens, R.M., 1999, Feeding habits in trilobites: *Palaeontology*, 42(3), 429–465. <https://doi.wiley.com/10.1111/1475-4983.00080>.
- Fritz, W.H., 1975, Broad correlations of some Lower and Middle Cambrian strata in the North America Cordillera: *Geological Survey of Canada Paper*, 75(1), 533–540.

- Gamper, M.A., Longoria, J.F., 1979, Sobre la ocurrencia de estromatolitos en la secuencia precámbrica del Cuadrángulo Pitiquito-La Primavera, NW de Sonora: Boletín del Departamento de Geología, Universidad de Sonora, 1, 95–104.
- Hollingsworth, J.S., Stewart, J., 2003, Biostratigraphy of the early Cambrian Montezuman stage in western North America: Geological Society of America 55th Annual Meeting, Durango California, Abstracts, Paper 10-1.
- Hofmann, R., Mángano, M.G., Elicki, O., Shinaq, R., 2012, Paleoecologic and biostratigraphic significance of trace fossils from shallow-to marginal-marine environments from the Middle Cambrian (Stage 5) of Jordan: Journal of Paleontology, 86(6), 931–955. <https://doi.org/10.1666/11-129R1.1>.
- Keighley, D.G., Pickerill, R.K., 1996, Small *Cruziana*, *Rusophycus*, and related ichnotaxa from eastern Canada: The nomenclatural debate and systematic ichnology: Ichnos, 4(4), 261–285. <https://doi.org/10.1080/10420949609380136>.
- Lieberman, B.S., 1998, Cladistic analysis of the Early Cambrian Olenelloid trilobites: Journal of Paleontology, 72(1), 59–78. <https://doi.org/10.1017/S002233600024021>.
- Linnarsson, J.G., 1859, On some Fossils found in the Eophyton Sandstone, at Lugnäs, in Sweden: Geological Magazine, 6(63), 393–406. <https://doi.org/10.1017/S0016756800162910>.
- Lochman, C., 1948, New Cambrian Trilobite Genera from Northwest Sonora, Mexico: Journal of Paleontology, 22(4), 451–464. *Disponible en* <<http://www.jstor.org/stable/1299515>>.
- Lochman, C., 1953, Corrections to Trilobites in Cambrian Stratigraphy and Paleontology near Caborca, Northwestern Sonora, Mexico: Journal of Paleontology, 27(3), 486–488. *Disponible en* <<http://www.jstor.org/stable/1300007>>.
- Lochman, C., 1956, The Cambrian of the Rocky Mountains and southwest desert of the United States and adjoining Sonora province, Mexico, *en* Rogers, J. (ed.), El Sistema Cámbrico, su paleogeografía y el problema de su base: México, 20th International Geological Congress Book, 529–661.
- Longoria, J.F., 1980, Estudios y trabajos geológicos en las áreas del Estado de Sonora, donde afloran las rocas del Precámbrico: Boletín del Departamento de Geología Universidad de Sonora, 158 pp.
- Longoria, J.F., 1981, Geologic features of northwest Sonora, *en* Longoria, J.F. (ed.), Regional geology of northwest Sonora: Hermosillo Geological Society of America, Cordilleran Section Annual Meeting Proceedings, 1–48.
- Longoria, J.F., González, M.A., Mendoza, J.J., Perez, V.A., 1978, Consideraciones estructurales en el cuadrángulo Pitiquito-La Primavera, NW de Sonora: Boletín del Departamento de Geología Universidad de Sonora, 1(1), 19–34.
- Longoria, J.F., Pérez, V.A., 1979, Bosquejo geológico de los Cerros Chino y Rajón, cuadrángulo Pitiquito-La Primavera (NW de Sonora): Boletín del Departamento de Geología Universidad de Sonora, 1(2), 119–144.
- Loyd, S.J., Marengo, P.J., Hagadorn, J.W., Lyons, T.W., Kaufman, A.J., Sour-Tovar, F., Corsetti, F.A., 2012, Sustained low marine sulfate concentrations from the Neoproterozoic to the Cambrian: Insights from carbonates of northwestern Mexico and eastern California: Earth and Planetary Science Letters, 339–340, 79–94. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2012.05.032>.
- Loyd, S.J., Marengo, P.J., Hagadorn, J.W., Lyons, T.W., Kaufman, A.J., Sour-Tovar, F., Corsetti, F.A., 2013, Local $\delta^{34}\text{S}$ variability in 580 Ma carbonates of northwestern Mexico and the Neoproterozoic marine sulfate reservoir: Precambrian Research, 224, 551–569. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2012.10.007>.
- MacEachern, J.A., Pemberton, G.S., Gingras, M.K., Bann, K., 2007, The Ichnofacies Paradigm: A fifty-year retrospective, *en* Miller, W. (ed.), Trace Fossils: Concepts, Problems, Prospects: New York, Elsevier Science & Technology Books, 52–77. <https://doi.org/10.1016/B978-044452949-7/50130-3>.
- McMenamin, M.A.S., 1987, Lower Cambrian trilobites, zonation, and correlation of the Puerto Blanco Formation, Sonora, Mexico: Journal of Paleontology, 61(4), 738–749. *Disponible en* <<http://www.jstor.org/stable/1305285>>.
- Orbigny, A.D.d', 1842, Voyage dans l'Amérique méridionale (le Brésil, la République Argentine, le Patagonia, le République de Chile, le République de Bolivie, le République de Perou) executé pendant les années 1826, 1827, 1828, 1829, 1830, 1831, 1832 et 1833: Chez P. Bertrand, Paris. 672 pp.
- Osgood, R.G., 1970, Trace fossils of the Cincinnati area: Palaeontographica Americana, 41, 301–305.
- Palmer, A.R., Halley, R.B., 1979, Physical stratigraphy and trilobite biostratigraphy of the Carrara Formation (Lower and Middle Cambrian) in the southern Great Basin: U.S. Geological Survey Professional Paper, 1047, 1–131.
- Palmer, A.R., Repina, L.N., 1993, Through a glass darkly: taxonomy, phylogeny, and biostratigraphy of the *Olenellina*: The University of Kansas Paleontological Contributions, 3, 1–35. <https://doi.org/10.17161/PCNS.1808.3760>.
- Rábano, I., 1999, Historia Evolutiva de los Trilobites, *en* Melic, A., De Haro, J.J., Mendez, M., Ribera, I. (eds.), Evolución y Filogenia de Artrópodos: Boletín de la Sociedad Entomológica Aragonesa, 26, 225–233.
- Roult, M., 1850, Note préliminaire sur une nouvelle formation découverte dans le terrain silurien inferior de la Bretagne: Bulletin de la Société Géologique de France, 2(7), 724–744.
- Seilacher, A., 1953, Studien zur Palichnologie. I. Über die Methoden der Palichnologie: Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie, 96, 421–452.
- Seilacher, A., 1955, Spuren und Fazies im Unterkambrium, *en* Schindewolf O.H. and Seilacher, A. (eds.), Beiträge zur Kenntnis des Kambriums in der Salt Range (Pakistan): Akademie der Wissenschaften und der Literatur in Mainz, 373–399.
- Seilacher, A., 1990, Paleozoic trace fossils, *en* Said, R. (Ed.), The Geology of Egypt: Rotterdam, Brookfield A.A Balkema, 649–722.
- Seilacher, A., Gishlick, A.D., 2015, Trilobites, *en* Press, C. (ed.), Morphodynamics: Londres, CRC Press, 359–379.
- Sour-Tovar, F., Hagadorn, J.W., Huitrón-Rubio, T., 2007, Ediacaran and Cambrian index fossils from Sonora, Mexico: Palaeontology, 50(1), 169–175. <https://doi.org/10.1111/j.1475-4983.2006.00619.x>.
- Sour-Tovar, F., Hagadorn, J.W., 2008, Early Cambrian trace fossils from Sonora, northern Mexico, *en* Uchman, A. (ed.), The Second International Congress on Ichnology: Cracovia, Polish Geological Institute, 118–119.
- Stachacz, M., 2012, New finds of *Rusophycus* from the Lower Cambrian Ociesęki Sandstone Formation (Holy Cross Mountains, Poland): Geological Quarterly, 56(2), 237–248. <https://doi.org/10.7306/gq.1018>.
- Stewart, J., McMenamin, M., Morales-Ramirez, J., 1984, Upper Proterozoic and Cambrian rocks in the Caborca region, Sonora, Mexico. Physical stratigraphy, biostratigraphy, paleocurrent studies, and regional relations: United States Geological Survey Professional Paper, 1309, 1–36.
- Stoyanow, A., 1942, Paleozoic paleogeography of Arizona: Geological Society of America Bulletin, 53(9), 1255–1282. <https://doi.org/10.1130/GSAB-53-1255>.
- Vanuxem, L., 1842, Geology of New-York Part III. Comprising the survey of the third geological district: New York Geological Survey, 306 pp.
- Weber, R., Cevallos-Ferriz, S., 1980, El significado bioestratigráfico de los estromatolitos del Precámbrico sedimentario de la región de Caborca, Sonora: Revista del Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, 4(2), 104–110.

Manuscrito recibido: Marzo 3, 2018.

Manuscrito corregido recibido: Mayo 18, 2018.

Manuscrito aceptado: Mayo 22, 2018.