

Caracterización litológica y bioestratigráfica de la Formación Toluviejo: aportes a la reconstrucción paleoambiental de las sucesiones carbonáticas del Eoceno en el norte de Colombia

German David Patarroyo^{1,2*} ; Juan Sebastián Plata² ; Sergio Andrés Suárez² ; Gustavo Adolfo Torres¹ ; Gabriel Veloza³ ; Josué Alejandro Mora-Bohórquez³ ; Diego Fernando Gómez¹ ; José Manuel Torres⁴ 

¹Stratos Consultoría Geológica, Bucaramanga, Colombia. (*) paleo.patarroyo@gmail.com; gustshao@gmail.com; difergo86@yahoo.com

²Escuela de Geología, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. juans.pduarte@hotmail.com; sergio-suarez25@hotmail.com

³Hocol S. A., Bogotá, Colombia. gabriel.veloza@hocol.com.co; alejandro.mora@hocol.com.co

⁴Department of Earth and Environment, Florida International University, Miami, USA. jtorr416@fiu.edu

Resumen

El presente trabajo busca entender las condiciones paleoambientales de la Formación Toluviejo (Cinturón Plegado de San Jacinto, Caribe colombiano). Para eso se presentan los resultados del análisis petrográfico de muestras de la sección El Hueso (Córdoba, Colombia), así como una valoración geoquímica de algunos elementos presentes en la roca (Sr, Ba, Fe, Ca, V, Cu, Al). Los análisis petrográficos muestran que la sucesión sedimentaria se conforma principalmente por calizas bioclásticas (*grainstone*), dominadas en su composición por macroforaminíferos (familias Nummulitidae, Lepidocyclinidae, Soritiidae y Discocyclinidae) y algas calcáreas, con un grado de diagénesis moderado a bajo en algunas muestras. El tipo de asociación fósil encontrada indica una edad de Eoceno medio (Luteciano tardío a Bartoniano), lo que va en concordancia con lo propuesto para otras secciones de dicha unidad. Por medio de la definición de petrofacies, se identifican al menos 3 grupos, donde varía la proporción de los macroforaminíferos y de las algas calcáreas, lo cual sugiere un ambiente de depósito asociado a una rampa carbonatada media. Si bien litológicamente la sección de El Hueso parece ser homogénea en su composición, tanto las variaciones que se observan en sus bioclastos principales como las relaciones geoquímicas de Fe/Ca y Sr/Ba sugieren cambios leves en las condiciones de energía, aporte de material terrígeno y paleosalinidad (probablemente ligado a variaciones eustáticas) en la parte basal de la sucesión. A su vez, el tipo de preservación observada en los bioclastos, así como la distribución de elementos sensibles a variaciones en la oxigenación de los sedimentos de fondo (V/Al, Cu/Al), sugiere condiciones paleoambientales de bajo estrés.

Palabras clave: Carbonatos; Cinturón Plegado de San Jacinto; Geoquímica; Paleoambientes; Paleógeno; Petrografía.

Forma de citar: Patarroyo, G.D.; Plata, J.S.; Suárez, S.A.; Torres, G.A.; Veloza, G.; Mora-Bohórquez, J.A.; Gómez, D.F.; Torres, J.M. (2025). Caracterización litológica y bioestratigráfica de la Formación Toluviejo: aportes a la reconstrucción paleoambiental de las sucesiones carbonáticas del Eoceno en el norte de Colombia. *Boletín de Geología*, 47(1), 43-61. <https://doi.org/10.18273/revbol.v47n1-2025002>

Lithologic and biostratigraphical characterization of the Toluviejo Formation: Contributions about the paleoenvironments of the Eocene carbonate platforms from northern Colombia

Abstract

This study aims to understand the paleoenvironmental conditions of the Toluviejo Formation (San Jacinto Fold Belt, Colombian Caribbean). To achieve this a petrographic analysis of the El Hueso section (Córdoba, Colombia), as well as a geochemical evaluation of some elements present in the rock (Sr, Ba, Fe, Ca, V, Cu, Al) were conducted. The petrographic analyses reveal that the sedimentary succession is mainly composed of bioclastic limestones (grainstone), dominated by large benthic foraminifers (families Nummulitidae, Lepidocyclinidae, Soritiidae, and Discocyclinidae), and calcareous algae, with a moderate to low degree of diagenesis in some samples. The foraminiferal assemblages indicate a middle Eocene (Late Lutetian to Bartonian) age, which agrees with age definitions for other sections of this unit. Petrofacial analysis identifies 3 groups based on variations in the proportions of large benthic foraminifers and calcareous algae, indicative of a middle carbonate ramp. Although the lithology and composition of the El Hueso section are generally homogeneous, the variations in its main bioclasts, as well as the Fe/Ca and Sr/Ba geochemical ratios, suggest minor changes in the energy conditions, terrigenous input, and paleosalinity (probably linked to eustatic variations) for the basal part of the succession. Furthermore, the degree of bioclast preservation and the distribution of elements sensitive to bottom water oxygenation variations (V/Al, Cu/Al) indicate low-stress paleoenvironmental conditions.

Keywords: Carbonates; San Jacinto Fold Belt; Geochemistry; Paleoenvironments; Paleogene; Petrography.

Introducción

El Cinturón Plegado de San Jacinto (CPSJ) presenta una evolución geológica que es producto de la interacción de las placas Caribe y sudamericana a lo largo del Cenozoico (Duque-Caro, 1968, 1972a, 1972b; Caro y Spratt, 2003; Cediél *et al.*, 2003; Guzmán *et al.*, 2004; Mora-Bohórquez *et al.*, 2020; González *et al.*, 2023). Por tal motivo, el marco litoestratigráfico del CPSJ, y en particular el segmento que abarca el Paleoceno tardío-Oligoceno, comprende una sucesión sedimentaria heterolítica, con significativos cambios faciales de sus unidades geológicas, y presenta controles tectónicos en algunos de sus segmentos (Guzmán *et al.*, 2004; Mora-Bohórquez *et al.*, 2020; Silva-Tamayo *et al.*, 2020). Esto ha causado que un control cronoestratigráfico por medio de la bioestratigrafía (*e. g.*, foraminíferos, palinomorfos) y la definición de modelos paleoambientales robustos en estas unidades sean recomendables para entender la distribución espacial y temporal de las sucesiones sedimentarias del Paleógeno en el CPSJ.

El marco litoestratigráfico general del CPSJ muestra que tras la sedimentación marina del Cretácico Superior (Formación Cansona), se depositó una potente secuencia sedimentaria del Cenozoico, mayoritariamente detrítica, con limitados intervalos calcáreos bioclásticos que comprenden edades entre el Eoceno, el Oligoceno-Mioceno y el Plioceno-Pleistoceno (Duque-Caro,

1972a, 1972b; GEOTEC, 2003; Guzmán *et al.*, 2004; Silva-Tamayo *et al.*, 2020; Salazar-Ortiz *et al.*, 2020a, 2020b). Dentro de estos intervalos calcáreos destacan los presentes en las unidades del Eoceno (formaciones Chengue, Toluviejo, Arroyo de Piedra), ya que al igual que en otros cuerpos sedimentarios de la región Caribe y el Golfo de México, sus componentes biogénicos mayoritarios fueron los macroforaminíferos (*large benthic foraminifera*, LBF) y las algas calcáreas, en vez de las estructuras coralinas que suelen dominar las plataformas carbonatadas tropicales desde el Mioceno (Butterlin, 1988; Silva-Tamayo *et al.*, 2020; Mitchell *et al.*, 2022). Esta particularidad ha sido relacionada con las condiciones hipercálidas que caracterizaron el Eoceno, asociadas con unas mayores tasas de meteorización continental, eutrofización de las zonas costeras y un mayor contenido de pCO₂ atmosférico (Zamagni *et al.*, 2012; Norris *et al.*, 2013).

La Formación Toluviejo, la cual aflora a lo largo de la parte central y sur del CPSJ (Figura 1), consiste principalmente de una sucesión de calizas con abundantes macroforaminíferos (géneros *Lepidocyclina*, *Nummulites*, entre otros), rodolitos de algas rojas, oncolitos y fragmentos de invertebrados (equinodermos y moluscos), depositados en condiciones de plataforma interna. En algunas secciones también se han reportado areniscas líticas de grano medio a fino, areniscas glauconíticas ricas en carbonatos, margas y lodos

grisáceos (Guzmán *et al.*, 2004). Basados en el contenido fósil (principalmente foraminíferos) se ha sugerido una edad de Eoceno medio a tardío (Luteciano-Priaboniano) para dicha unidad, que se complementa con análisis micropaleontológicos (foraminíferos planctónicos, nanofósiles calcáreos, palinomorfos) en los niveles lodosos interdigitados (Duque-Caro, 1975; Guzmán *et al.*, 2004; Alfonso *et al.*, 2009; Bermúdez *et al.*, 2009).

Teniendo en cuenta los ambientes de plataforma en los que se depositaron los sedimentos de la hoy Formación Toluviejo, y unidades coetáneas como las formaciones Chengue o Arroyo de Piedra, los estudios petrológicos permiten evaluar aspectos como: 1) el modelo deposicional de los carbonatos por medio de la definición de petrofacies y 2) la composición faunística (macroforaminíferos) de los bioclastos dominantes en la sucesión sedimentaria, teniendo en cuenta esquemas bioestratigráficos recientemente propuestos para la región Caribe (Mitchell *et al.*, 2022). Igualmente, dichas interpretaciones pueden verse robustecidas con

una valoración geoquímica de las secciones estudiadas. Relaciones entre elementos como Fe/Ca, Sr/Ba, Cu/Al, V/Al han sido propuestas para evaluar aspectos como el aporte de terrígenos, la paleosalinidad en el ambiente de depósito o las condiciones de oxigenación en el substrato (*e. g.*, Kujau *et al.*, 2010; Govin *et al.*, 2012; Wei y Algeo, 2020; Dummam *et al.*, 2021; Yelwa *et al.*, 2022).

El presente trabajo busca aportar al conocimiento de 1) la bioestratigrafía de la Formación Toluviejo, tomando como base el registro de los macroforaminíferos presentes en la sección estudiada (cantera El Hueso, Córdoba; Figura 1), y 2) mejorar el conocimiento de los ambientes deposicionales del Eoceno en el CPSJ, mediante la definición de petrofacies, la caracterización geoquímica de las rocas estudiadas en nuestra sección y su comparación con estudios previos en otras secciones de la Formación Toluviejo y de unidades coetáneas en el área (*e. g.*, Guzmán *et al.*, 2004; Salazar-Ortiz *et al.*, 2020a, 2020b).

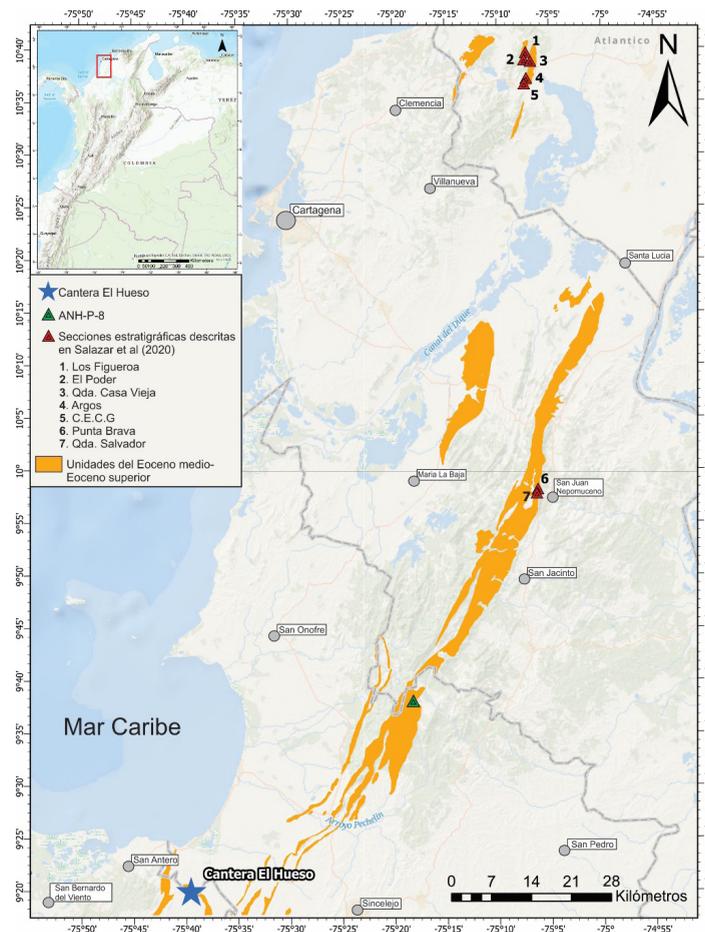


Figura 1. Localización del área de estudio y distribución de la sucesión del Paleógeno tardío (Formación Toluviejo y unidades coetáneas) en el Cinturón Plegado de San Jacinto. Secciones con reportes recientes de macroforaminíferos (Bermúdez *et al.*, 2009; Salazar-Ortiz *et al.*, 2020a).

Geología regional y sección de estudio

La sucesión sedimentaria del CPSJ fue depositada sobre el basamento oceánico del Cretáceo, asociado a la placa del Caribe (Duque-Caro, 1984; Cardona *et al.*, 2012). Posteriormente, el CPSJ se configuró como un antiguo prisma de acreción asociado a la convergencia de las placas Caribe y Sudamericana desde el Cretácico Superior (Mora-Bohórquez *et al.*, 2017), y fue exhumado en diferentes episodios de contracción, que dio lugar al cinturón plegado actual. El Eoceno en el CPSJ está integrado por las unidades San Cayetano (Eoceno inferior), Chengue-Toluviejo y unidades equivalentes (Eoceno medio) y San Jacinto (Eoceno superior, Figura 2).

La sección de El Hueso se encuentra en la cantera del mismo nombre, en inmediaciones del municipio de San Antero (Córdoba; 9°19.58'N, 75°39.33'W), al sur del CPSJ (Figura 1). La cantera, descrita previamente por Raigosa (2018), comprende una sucesión sedimentaria de unos 150 m de roca expuesta, donde fueron descritos como parte de la Formación Toluviejo los primeros 68 m de la sección. Sin embargo, aunque Raigosa (2018) menciona que la sección de la Formación Toluviejo descansa en un contacto disconforme sobre la Formación San Cayetano (Paleoceno-Eoceno) y es paraconforme con la Formación El Floral (Oligoceno), la columna descrita por dicho autor no describe esas unidades.

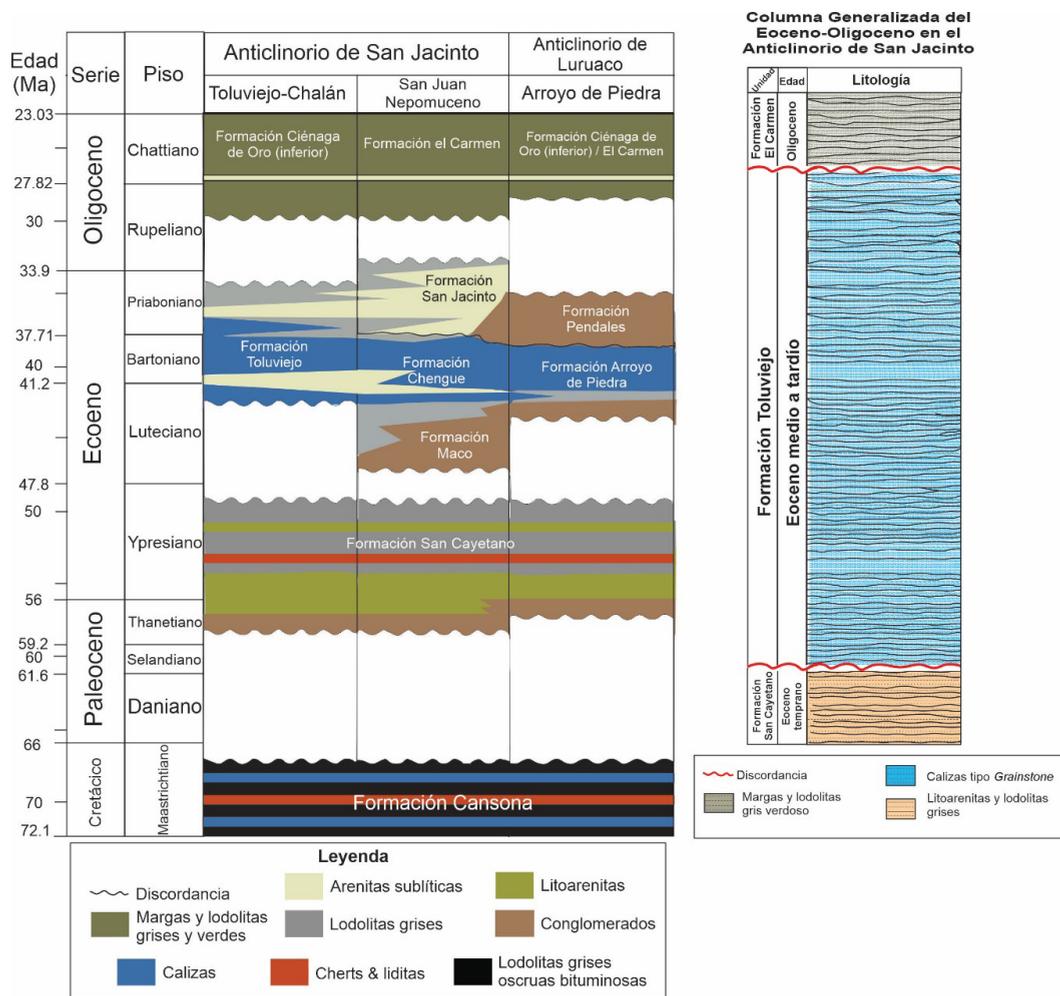


Figura 2. Esquema estratigráfico del Paleógeno en área de estudio mostrando las variaciones litológicas y de nomenclatura en el centro y norte del Cinturón Plegado de San Jacinto. Modificado de Salazar-Ortiz *et al.* (2020a). Columna estratigráfica generalizada del área de estudio. Información basada en los reportes de Guzmán *et al.* (2004) y Raigosa (2018).

Regionalmente, aunque la Formación Toluviejo no presenta aún una sección tipo, se ha propuesto que la unidad reposa de forma discordante sobre la Formación San Cayetano, mientras que su contacto superior es

paraconforme con la Formación Maco (Anticlinal de Chalán) y la Formación El Carmen (Guzmán *et al.*, 2004). La Figura 2 ilustra una columna generalizada de la Formación Toluviejo para la zona de estudio.

La Formación Toluviejo suele ser correlacionada estratigráfica y ambientalmente con la Formación Chengue, y con parte de la Formación San Jacinto. En el norte del CPSJ, se relaciona en cambio con la Formación Pendales, la cual es predominantemente clástica, y la Formación Arroyo de Piedra, composicional y texturalmente similar a la Formación Toluviejo (Guzmán *et al.*, 2004; Salazar-Ortiz *et al.*, 2020a, 2020b; Silva-Tamayo *et al.*, 2020).

Métodos

Para este trabajo se analizaron 13 secciones delgadas proporcionadas por la empresa HOCOL S. A., (intervalo 3-90 m), que abarcan una mayor sucesión sedimentaria que la descrita por Raigosa (2018; 68 m). De igual forma, se dispuso de material adicional (n = 18; intervalo 0,7-94,6 m) del mismo segmento para efectuar una valoración geoquímica de la sección (Tabla 1). La caracterización petrográfica se llevó a cabo en el Laboratorio de Petrografía Avanzada de la Escuela de Geología - UIS.

Esta comprendió la identificación y medición de los componentes de la muestra siguiendo los criterios utilizados por Adams y Mackenzie (1998) y Scholle y Ulmer-Scholle (2003), al igual que el conteo de 300 puntos para cada sección delgada, mediante la metodología de *Gazzi Dickinson* (Ingersoll *et al.*, 1984). La clasificación textural del material siguió lo propuesto por Dunham (1962). Para la identificación de los principales grupos de bioclastos presentes (*e. g.*, foraminíferos bentónicos, algas calcáreas), se diferenció entre categorías taxonómicas generales como son las familias Nummulitidae, Lepidocyclinidae, Discocyclinidae y Soritidae en el caso de los foraminíferos. Dicha clasificación taxonómica siguió lo observado en Boudagher-Fadel (2018), al igual que lo propuesto por Mitchell *et al.* (2022) para la región Caribe. Para describir las algas calcáreas se consideró lo referido por Salazar-Ortiz *et al.* (2020a) en la Formación Chengue.

Tabla 1. Relación de muestras analizadas en la sección El Hueso.

Muestra	Altura estratigráfica (m)	Litología	Petrografía	Paleontología	Geoquímica
EH-63	94,6	Grainstone			x
EH-60	90	Grainstone	x	x	
EH-57	85,5	Grainstone			x
EH-56	84	Grainstone	x	x	
EH-53	79	Grainstone			x
EH-50	75	Grainstone	x	x	x
EH-47	73,3	Grainstone			x
EH-44	66	Grainstone	x	x	
EH-42	63	Grainstone			x
EH-40	60	Grainstone			x
EH-37	55,5	Grainstone	x	x	x
EH-35	52,5	Grainstone			x
EH-33	49,5	Grainstone	x	x	
EH-29	43,5	Grainstone			x
EH-25	37,5	Grainstone	x	x	
EH-23	34,5	Grainstone			x
EH-19	28,5	Grainstone	x	x	x
EH-16	24	Grainstone	x	x	x
EH-12	18	Grainstone	x	x	x
EH-9	13,5	Grainstone	x	x	x
EH-5	7,5	Grainstone	x	x	x
EH-2	3	Grainstone	x	x	x
EH-0	0,5	Grainstone			x

Los análisis de fluorescencia de rayos X (FrX) se realizaron en 5-10 g de roca molida, con concentraciones elementales tomadas como conteos por segundo (cps) y relaciones logarítmicas en algunos casos para evitar valores extremos. Las muestras se midieron a 10 kV (150 μ A, sin filtro) para las intensidades de Al, Mg, Si; 12 kV (400 μ A, filtro Al-50) para intensidades Ca, K, Ti y V; 20 kV (250 μ A, filtro Al-200) para intensidades de Co, Cr, Fe y Mn; y 50 kV (100 μ A, filtro Ti) para intensidades Ba y Rb. Los análisis de FrX se realizaron con un espectrómetro PanAlytical Epsilon 1 XRF, en el Instituto Tecnológico de Paleoceanografía e Mudanças Climáticas (itt Oceaneon, Unisinos, Brasil). Para hacer inferencias paleoambientales, fueron tenidas en cuenta diversas relaciones elementales. Por ejemplo, las fluctuaciones en la relación log (Fe/Ca) se utilizan como un indicador de aporte de material terrígeno (Kujau *et al.*, 2010; Govin *et al.*, 2012). La relación Sr/Ba puede

ser utilizada como un indicador de paleosalinidad (Wei y Algeo, 2020; Yelwa *et al.*, 2022), mientras que las condiciones de paleoxigenación en las aguas de fondo son evaluadas por medio de la relación de elementos traza sensitivos a las condiciones redox (V, Cu), respecto a los valores hallados de aluminio (Dummann *et al.*, 2021).

Resultados

Las muestras estudiadas correspondieron a una sucesión de calizas bioclásticas (*grainstone*), de armazón clasto-soportado, autóctono y cementado por calcita, la cual está compuesta predominantemente de macroforaminíferos bentónicos. Otros elementos correspondieron a nódulos de algas rojas, restos de equinodermos y fragmentos de bivalvos, los cuales presentan una variación en su abundancia a lo largo de la sucesión (Figura 3).

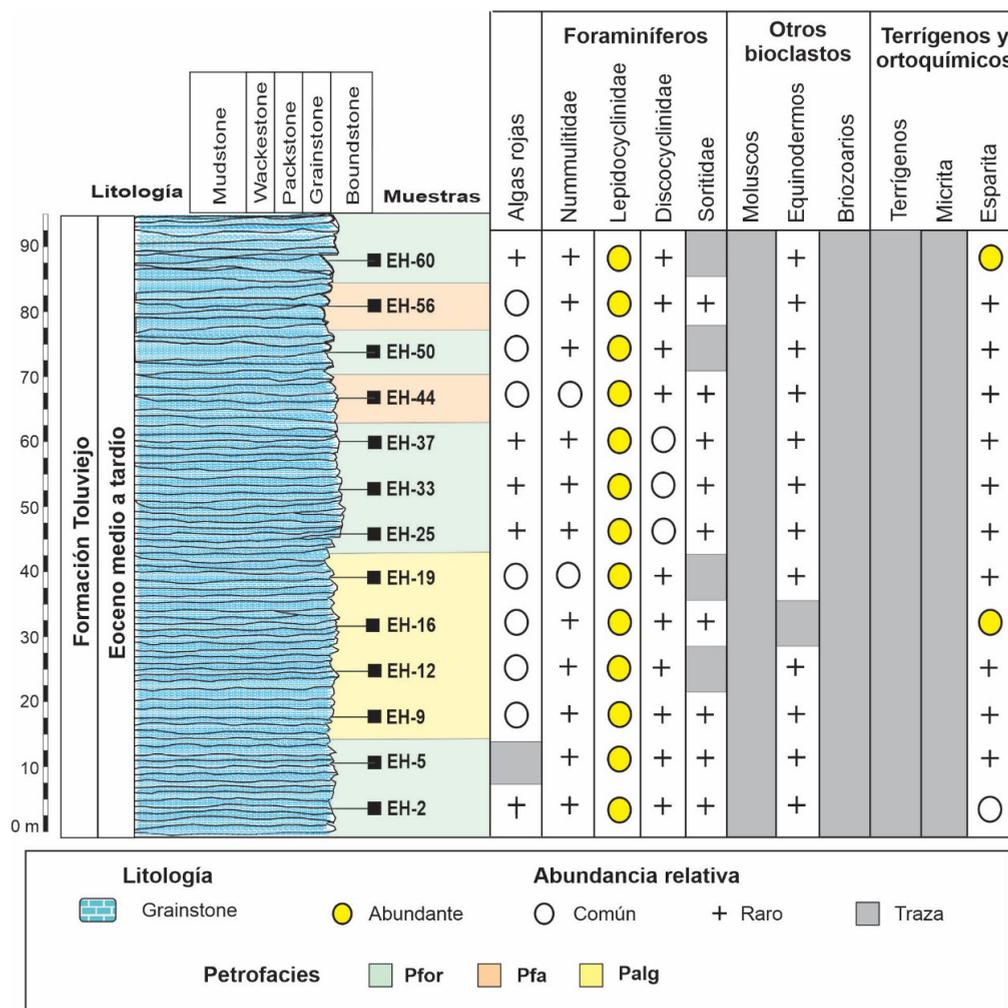


Figura 3. Registro estratigráfico de la cantera de El Huevo y abundancias cualitativas de los principales componentes en las muestras. Ver Tabla 1 para la posición exacta de las muestras en la columna.

De base a tope, los macroforaminíferos bentónicos son muy abundantes (77 %), distribuidos homogéneamente a lo largo de las secciones (Tabla 2).

En menor medida, varía la proporción del resto de los componentes (algas, restos de equinodermos, fragmentos de bivalvos y cemento), como sucede por ejemplo en las muestras EH-2 y EH-5 (Figura 3).

Tabla 2. Conteo de componentes a lo largo de la sección de El Hueso.

Componentes	EH-2	EH-5	EH-9	EH-12	EH-16	EH-19	EH-25	EH-33	EH-37	EH-44	EH-50	EH-56	EH-60	Total
Nummulitidae	17	0	18	4	10	47	4	11	13	29	16	16	3	150
Lepidocyclinadae	180	222	187	169	109	106	151	159	157	101	126	150	152	1693
Discocyclinadae	11	2	5	4	11	10	48	55	57	17	21	28	6	226
Foram. enrollados	4	2	2	0	2	0	2	1	1	2	0	2	0	16
Algas rojas	21	21	59	93	69	76	21	20	21	72	75	45	11	484
Equinodermos	3	8	2	12	0	14	12	8	11	20	29	20	4	94
Cemento (calcita)	44	32	14	6	73	3	14	32	21	30	23	17	96	365
Porosidad	11	2	2	2	4	0	1	0	0	5	2	0	4	31
Bivalvos (frags.)	1	0	0	0	7	5	5	1	2	5	5	3	4	30
Glauconita	6	3	7	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	19

Un aspecto que destaca en la sección de El Hueso es la variación inversa entre los macroforaminíferos y las algas rojas en algunas de las muestras analizadas hacia la base de la sección (EH-9, EH-12, EH-16, EH-19). Estas muestras presentan mayor aparición de nódulos con bioperturbaciones denominados rodolitos, y una menor cantidad de macroforaminíferos (Figuras 3, 4). Para las secciones EH-25, EH-33, EH-37 hay un predominio de macroforaminíferos, en comparación con las proporciones de las algas rojas, restos de equinodermos y fragmentos de bivalvos (Figura 3).

Hacia el tope de la sección (muestras EH-44, EH-50), se observa de nuevo una leve disminución de los macroforaminíferos, acompañado de un aumento de las algas rojas, y, en menores proporciones, la presencia de equinodermos, conchillas de bivalvos y cemento calcáreo. Adicionalmente, hacia el tope hay un aumento progresivo en la presencia de los foraminíferos bentónicos, con una disminución gradual de las algas rojas y equinodermos (Figura 3).

La porosidad a lo largo de la sección es baja (1-5 %, de tipo secundario), y su forma se asemeja a la de los bioclastos. En las muestras EH-9, EH-12, EH-16, EH-16, EH-44, EH-50 y EH-56, hay un alto nivel de

recristalización, mientras que en las demás muestras esta tiende a ser moderada. En las muestras EH-2, EH-5, EH-9, EH-12 y EH-25, algunos bioclastos han sido reemplazados por glauconita diseminada, con presencia de óxidos, mientras que las muestras EH-9 y EH-44 presentan venaciones de calcita que cortan la laminación.

Paleontología

Teniendo en cuenta el predominio de los macroforaminíferos presentes en la sección, se quiso profundizar en su clasificación taxonómica y su valoración como herramienta bioestratigráfica. Para esto se contó con la asesoría del profesor Simon Mitchell (University of West Indies, Jamaica).

En general, el género *Orbitoina* (= *Lepidocyclina* según distintas publicaciones) es el taxón más representativo en las asociaciones de macroforaminíferos, y, de acuerdo con las características morfológicas de su prolóculo, probablemente corresponde a la especie *Orbitoina rdouvillei*. Sin embargo, teniendo en cuenta su grado de preservación y la imposibilidad de obtener ejemplares aislados, se considerará dicha especie como comparable (*Orbitoina cf. rdouvillei*; Figura 4).

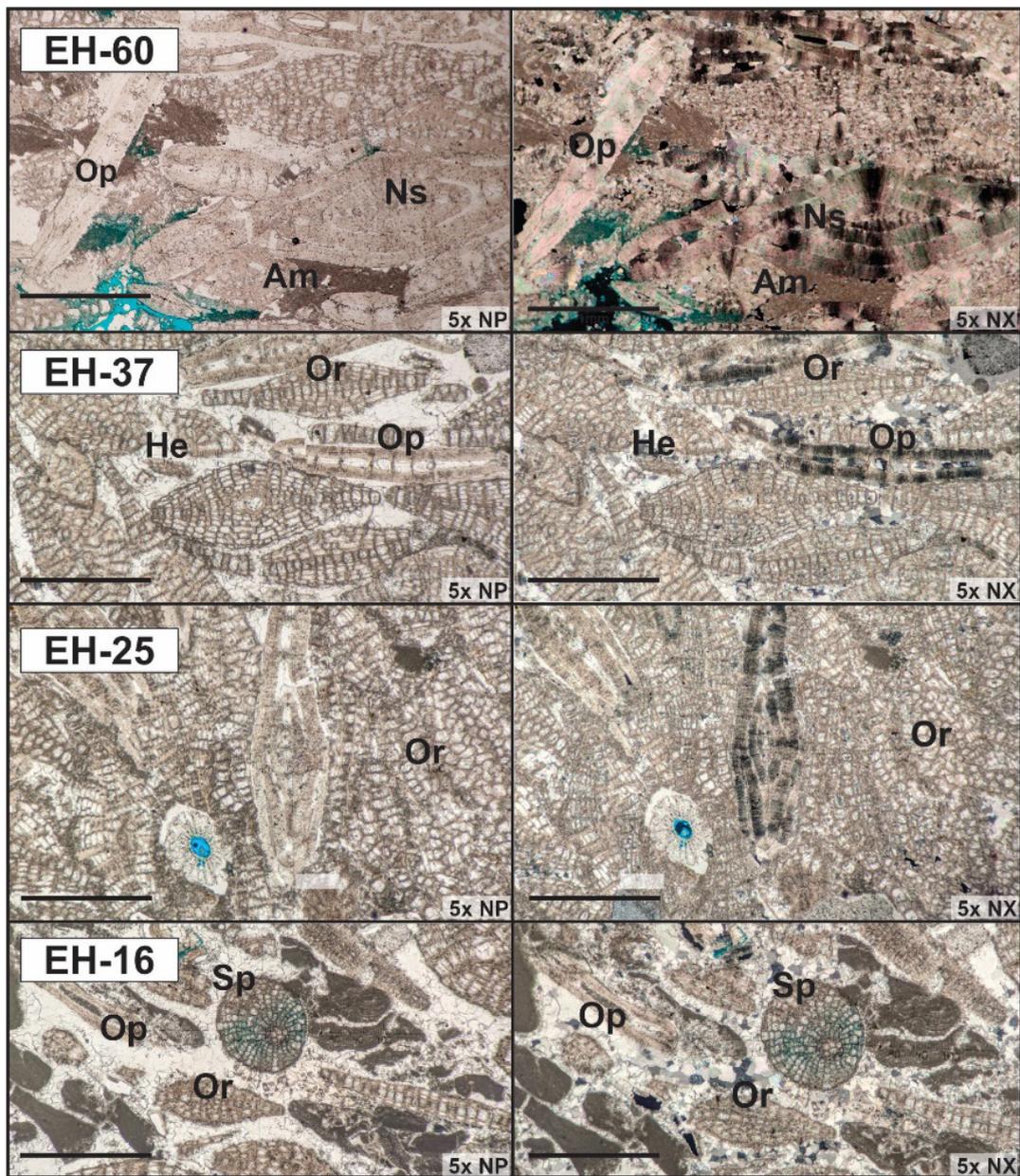


Figura 4. Macroforaminíferos de la sección El Huevo (Formación Toluvejo). Se indican imágenes representativas de algunas de las muestras analizadas. Ns: *Nummulites striatoreticulatus*, Or: *Orbitoina* cf. *rdouvillei*, Op: *Operculinoides* sp., Am: *Amphistegina* sp., He: *Helicolepidina* sp., Sp: *Sphaerogypsina* sp. NP Nicoles Paralelos, NX Nicoles Cruzados. La escala indica 1 mm.

Otros taxones, aunque en menor proporción en comparación con *Orbitoina* cf. *rdouvillei*, correspondieron a *Nummulites striatoreticulatus*, los géneros *Helicolepidina*, *Nummulites*, *Operculinoides*, *Sphaerogypsina*, al igual que probables especímenes de los géneros *Amphistegina* y *Helicostegina* (Figura 5).

Para efectos de mayor simplificación de la información paleontológica, se referirán las asociaciones dentro de categorías taxonómicas más amplias (familias Nummulitidae, Lepidocyclinidae, Discocyclinidae y Soritidae).

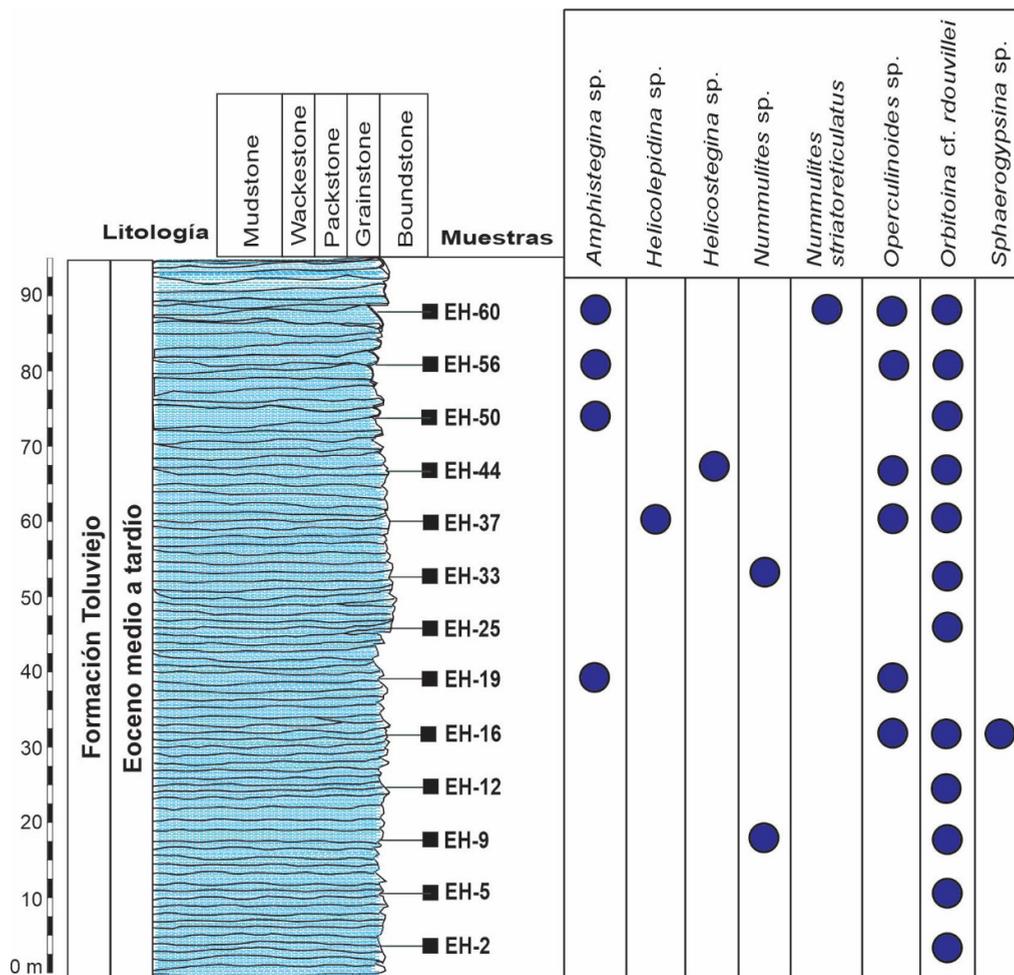


Figura 5. Distribución estratigráfica de los macroforaminíferos presentes en la sección de El Huevo. Ver [Tabla 1](#) para la posición exacta de las muestras en la columna.

Finalmente, en las algas calcáreas no se pudo profundizar mucho en su taxonomía, si bien las formas halladas comparten similitudes con los taxones *Lithotaminium* y *Sporolithon*, descritos previamente para la Formación Chengue ([Salazar-Ortiz et al., 2020a](#)).

Petrografía

El componente más dominante entre los bioclastos corresponde a los foraminíferos bentónicos, dentro de los cuales destaca por su abundancia la familia Lepidocyclinae. Como componente común se encuentra la familia Discocyclinidae en el intervalo estratigráfico 37,5 a 55,5 m (muestras EH-25 a EH-3), y la familia Nummulitidae en las muestras EH-19 y EH-44. Los especímenes de menor abundancia entre los foraminíferos corresponden a formas de la familia Soritiidae ([Figura 6](#)). El segundo componente más

abundante a lo largo de la sección son las algas rojas, con una mayor cantidad de ejemplares, particularmente en el intervalo de 13,5 a 28,5 m (muestras EH-9 a EH-19), y en las muestras EH 44, EH-50 y EH 56 ([Figura 6](#)).

Un total de 3 petrofacies se definen en la sección de El Huevo (Pfor, Palg, Pfa), teniendo en cuenta las variaciones en abundancia de los 2 bioclastos más comunes: macroforaminíferos y algas rojas ([Figuras 3, 6](#)). Para la primera petrofacies (Pfor), el principal componente corresponde a los macroforaminíferos, principalmente ejemplares de las familias Lepidocyclinidae (dominante), Discocyclinidae, Nummulitidae y Soritiidae. Esta facies presenta una menor proporción de bioclastos asociados a algas rojas, equinodermos y fragmentos de bivalvos ([Figura 6](#)).

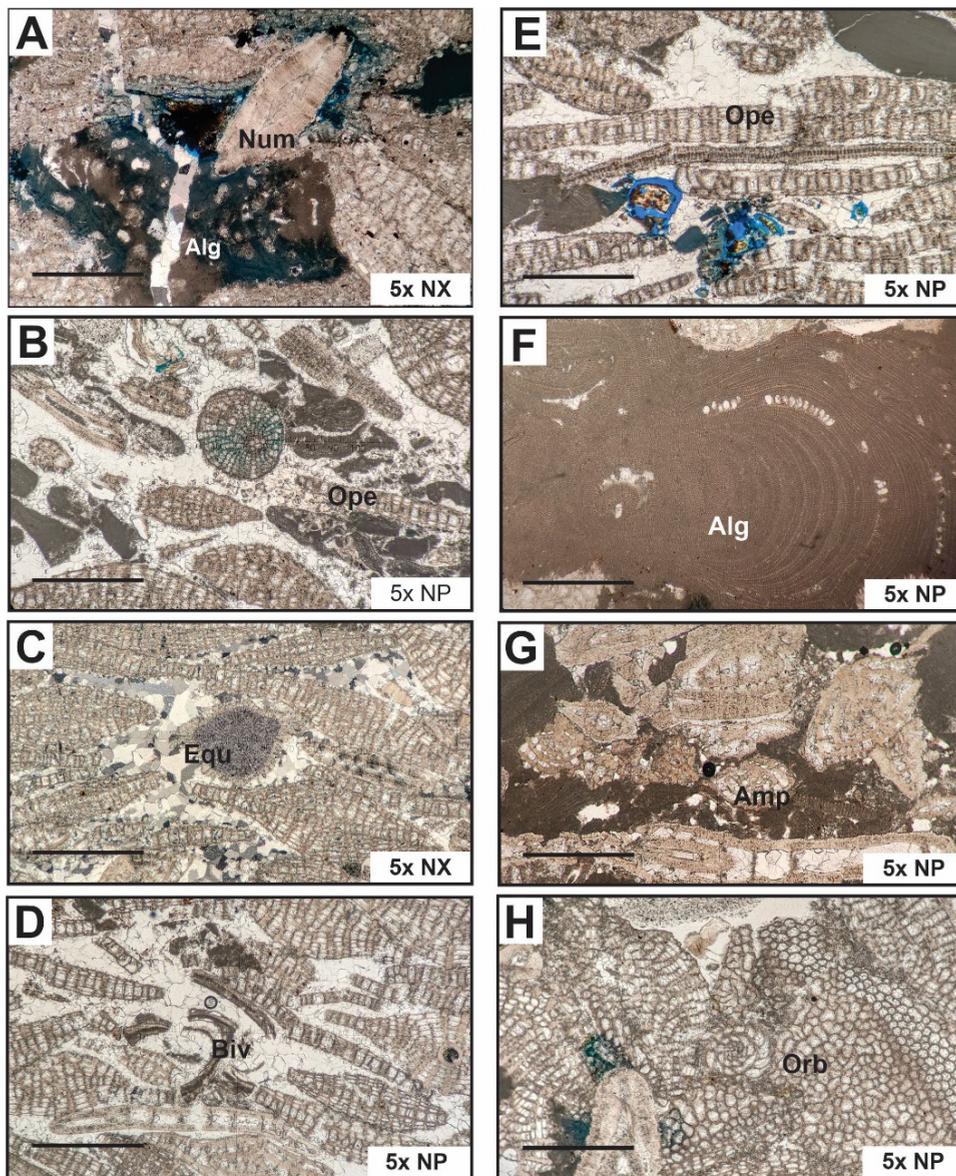


Figura 6. Bioclastos característicos de la sección de El Hueso. **A.** Alga roja cortada por venilla de calcita (Alg), *Nummulites* spp. (Num; EH-9; Palg). **B.** *Operculinoides* spp. (Ope; EH-16; Palg). **C.** Resto de equinodermo (Equ; EH-37; Pfor). **D.** Fragmentos de bivalvos (Biv; EH-37; Pfor). **E.** *Operculinoides* spp. (Ope; EH-2; Pfor). **F.** Nódulo de algas rojas con bioperturbaciones (Alg; EH-12; Palg). **G.** *Amphistegina* spp. (Amp; EH-19; Palg). **H.** *Orbitoina* cf. *rdouvillei* (Orb; EH-25; Pfor). NP; Nícoles Paralelo. NX; Nícoles Cruzados. La escala indica 1 mm.

La petrofacies Pfor conforma las muestras EH-2, EH-5, EH-25, EH-33, EH-37, EH-60, cuyas profundidades estratigráficas son 3 m, 7,5 m, 37,5 m, 49,5 m, 55,5 m y 90 m, respectivamente (Figura 6).

La segunda petrofacies (Palg) se encuentra representada por las muestras EH-9, EH-12, EH-19, EH-50, cuyas alturas estratigráficas son 13 m, 18 m, 28,5 m y 75 m, respectivamente. La característica principal de esta petrofacies es la aparición de rodolitos junto con la alta abundancia de algas rojas. Esto, en comparación con la baja abundancia relativa de los foraminíferos bentónicos

y otros bioclastos, como fragmentos de equinodermos y bivalvos (Figura 6).

Finalmente, la tercera petrofacies (Pfa) se caracterizó por una menor presencia de algas rojas en comparación con la petrofacies Palg, manteniendo aún las estructuras de nódulos de algas con bioperturbaciones (Figura 6). Esta petrofacies se caracteriza por su similitud en el porcentaje de foraminíferos y algas rojas presentes, y por ende se consideró de composición mixta. Los bioclastos presentes en baja proporción corresponden a restos de equinodermos y bivalvos. Esta petrofacies se

encuentra representada por las muestras EH-44 y EH-56 (66 m y 84 m, respectivamente).

Geoquímica

Para la valoración geoquímica de la sección se tuvieron en cuenta las relaciones Fe/Ca, Sr/Ba, Cu/Al y V/Al.

Los valores de la relación $\log(\text{Fe}/\text{Ca})$ presentan un rango entre 3,11 y 48, con variaciones significativas en 3 grupos representativos: 0,5-18 m, 24-55,5 m y 60-94,6 m, donde el grupo basal presenta las mayores estimaciones (Figura 7). El valor más alto de la relación $\log(\text{Fe}/\text{Ca})$ está a los 3 m (muestra EH-2), y el más bajo, a los 52,5 m (muestra EH-35). La relación Sr/Ba presenta un rango de valores entre 69,62-193, con al menos 2 tendencias de crecimiento hacia la parte media y superior, igual que variaciones divididas en 0,5-28,5 m, 34,5-52,5 m, 55,5-75 m y 79-94,6 m. El valor más alto está en la muestra EH-35 (52,5 m; Figura 7).

Al analizar el comportamiento de los elementos traza V y Cu, sensitivos a las condiciones redox, se observa que la relación Cu/Al presenta un rango de valores entre los $1,2 \times 10^{-2}$ y $3,68 \times 10^{-2}$, en los que se pueden observar variaciones en 4 grupos representativos: 0,5-28,5 m, 34,5-60 m, 63-73,3 m, y 75-94,6 m. Los mayores y menores valores de la relación Cu/Al se encuentran en 85,5 m (muestra EH-57) y 3 m (muestra EH-2), respectivamente (Figura 7). Los valores de la relación V/Al presentan un rango de $3,88 \times 10^{-2}$ a $33,5 \times 10^{-2}$, con leves variaciones agrupadas en los intervalos 0,5-18 m, 24-79 m y 85,5-94,6 m. El valor con mayor concentración está a los 3 m de la base de la sección (muestra EH-2), y el más bajo está a los 63 m (muestra EH-42).

Discusión

Modelo de edad de la sección de El Hueso

De acuerdo con la asociación de foraminíferos identificada, y en particular la presencia de *Orbitoina cf. rdouvillei*, la columna de El Hueso tiene una edad de Eoceno medio alto a Eoceno tardío (Luteciano-Bartoniano). En la región Caribe y zonas cercanas, *Orbitoina rdouvillei* ha sido reportada en secciones de Perú, Jamaica y La Florida, con edades que oscilan entre el Luteciano y el Bartoniano (39,4 a 43,5 Ma según Gradstein et al., 2020). De acuerdo con la zonación de macroforaminíferos regional de Mitchell et al. (2022), *O. cf. rdouvillei* forma parte de la biozona ABZ11 (zona de *Polylepidina chiapensis*; transición Luteciano-Bartoniano). Una comparación de dicha biozona regional con los esquemas bioestratigráficos estándar del Tetis (Serra-Kiel et al., 1998; Speijer et al., 2020) la haría equivalente a la transición entre las biozonas 16 y 17. La biozonación propuesta por Mitchell et al. (2022) ha sido calibrada con eventos bioestratigráficos de foraminíferos planctónicos y nanofósiles calcáreos en diferentes secciones de Jamaica. Por tal motivo, la asignación de la biozona ABZ11 propuesta en la sección de El Hueso correspondería a las biozonas de foraminíferos planctónicos E11 (Wade et al., 2011) y NP16 de nanofósiles calcáreos (Martini, 1971), respectivamente (Figura 8). Otros géneros descritos en la sección de El Hueso indican una edad comprendida entre la parte media del Luteciano y el final del Bartoniano (Figura 8). Tal es el caso de los rangos bioestratigráficos propuestos por Mitchell et al. (2022) para la especie *N. striatiformis* y el género *Operculinoides*. En contraste, la presencia del género *Orbitoina* restringiría la sección de El Hueso a una edad no más antigua que el Luteciano más tardío (Figura 8).

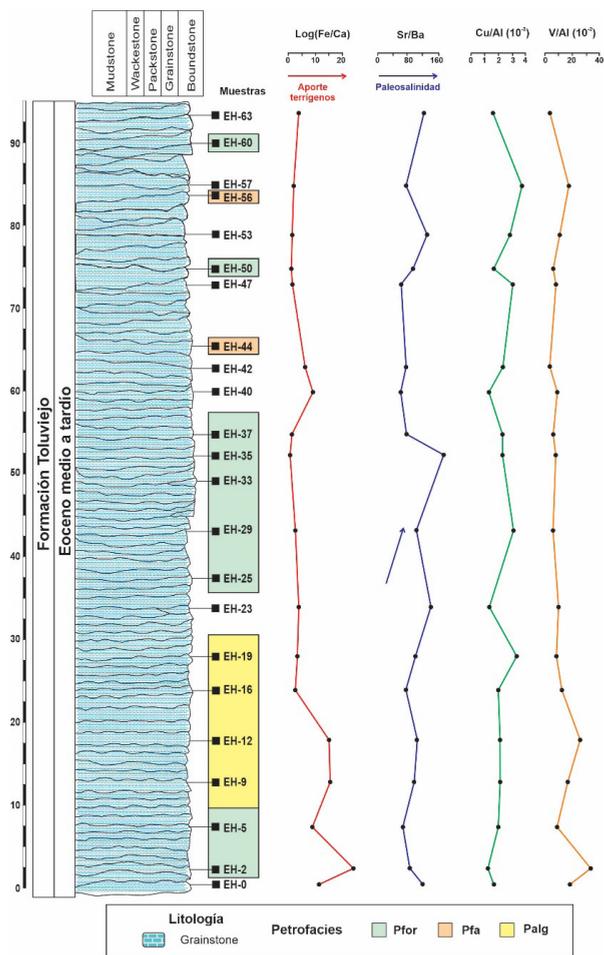


Figura 7. Distribución estratigráfica de los proxies geoquímicos utilizados en la sección El Hueso. $\log(\text{Fe}/\text{Ca})$ como indicador de aporte terrígeno. Sr/Ba como indicador de variaciones en la paleosalinidad. Relaciones Cu/Al y V/Al como indicadores de variaciones en las condiciones de oxigenación de fondo.

Estudios regionales (Duque-Caro 1967, 1968, 1975; GEOTEC, 2003; Guzmán *et al.*, 2004) también apoyan una edad entre Eoceno medio y tardío (biozonas de foraminíferos planctónicos E8-E16 según Wade *et al.*, 2011), basados en la presencia de foraminíferos planctónicos y bentónicos diagnósticos (*Pseudoglobigerinella bolivariana*, *Clavigerinella colombiana*, *Bulimina jacksonensis*, entre otros). En trabajos recientes la identificación de macroforaminíferos ha sido relacionada con edades que van entre el Eoceno temprano (Ypresiano) y el Eoceno medio alto (Bartoniano) para las formaciones Chengue y Arroyo de Piedra en secciones de superficie, e incluso el Oligoceno temprano en pozos estratigráficos (Bermúdez *et al.*, 2009; Salazar-Ortiz *et al.*, 2020a). La definición de dichas edades se basa principalmente en la presencia de foraminíferos planctónicos (géneros *Acarinina*, *Clavigerinella*, *Pseudoglobigerinella*, entre otros) y nanofósiles calcáreos (*Chiasmolithus solitus*, *Nannotetrina* spp., entre otros), dada la baja proporción de macroforaminíferos en las secciones estudiadas por estos autores (Figuras 1, 8). Por ende, las definiciones de edad basadas exclusivamente en la presencia de macroforaminíferos siguen siendo escasas tanto para la Formación Toluvejo como en unidades coetáneas. El reporte de Werenfels (1926) constituye una excepción, al proponer la presencia de *Helicolepidina spiralis*, entre otros elementos de las familias Lepidocyclinidae y Nummulitidae, como indicativos del Eoceno tardío para la Formación Toluvejo. Otro reporte en la misma unidad corresponde al trabajo de geología regional de Alfonso *et al.* (2009), el cual refiere asociaciones similares a las descritas en trabajos previos en el CPSJ. Finalmente, en un reporte interno, Baumgartner-Mora *et al.* (2015) reportan ejemplares (usualmente fragmentados) de *Discocyclina*, *Pseudophragmina* cf. *stephensoni*, *Asterocyclina* cf. *cruzi*, *Sphaerogypsina globulus*, *Linderina*, entre otros, que en conjunto sugieren una edad de Eoceno medio para la sección de la Quebrada Salvador (Formación Chengue; Figura 8).

Dataciones recientes en las unidades discutidas por medio de quimioestratigrafía ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) han resultado conflictivas en algunos casos con las dataciones bioestratigráficas, probablemente debido a factores diagenéticos o a la contaminación por material detrítico. Por ejemplo, en el pozo estratigráfico ANH-P-8, donde se identificó la Formación Toluvejo, Rosero *et al.* (2014) indican valores de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ inferiores a 0,70760, los cuales no corresponden a los reportados en las plataformas carbonatadas del Eoceno en la región Caribe y a nivel global (entre 0,70772 y 0,70780; Silva-Tamayo *et al.*, 2020). En menor medida, dichas inconsistencias entre los datos bioestratigráficos y la cronoestratigrafía basada en el registro de la relación isotópica de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ han sido identificadas para la Formación Arroyo de Piedra. En secciones de dicha unidad, Salazar-Franco *et al.* (2016) sugirieron 3 segmentos estratigráficos con edades deposicionales entre el Eoceno tardío (Luteciano-Priaboniano; valores de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ entre 0,707638 y 0,707776) y el Oligoceno temprano (Rupeliano; valores de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ entre 0,707699 y 0,707834). Las edades deposicionales de los 2 primeros segmentos propuestos por Salazar-Franco *et al.* (2016) coincidirían con los rangos bioestratigráficos propuestos por Salazar-Ortiz *et al.* (2020a) en secciones vecinas, pero la edad deposicional de Oligoceno temprano para el segmento más superior de la Formación Arroyo de Piedra refuerza la necesidad de continuar con los estudios cronoestratigráficos integrados (bioestratigrafía y quimioestratigrafía) en estas unidades. Por ende, teniendo en cuenta la propuesta de edad para la sección de El Hueso, una valoración quimioestratigráfica de la relación $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ sería recomendable.

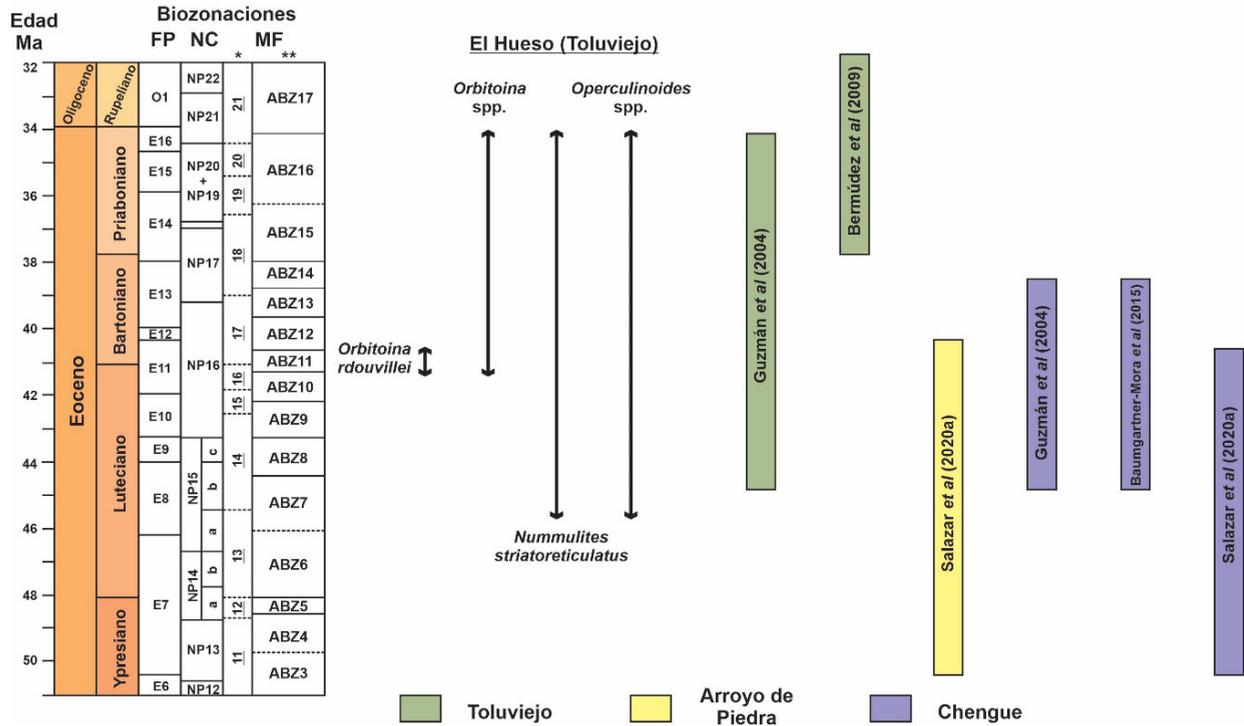


Figura 8. Relación entre el modelo de edad de la sección El Hueso (Formación Toluvejo) y los modelos de edad propuestos con bioestratigrafía para las formaciones Toluvejo, Arroyo de Piedra y Chengue (Guzmán *et al.*, 2004; Bermúdez *et al.*, 2009; Baumgartner-Mora *et al.*, 2015; Salazar-Ortiz *et al.*, 2020a). Biozonas con macroforaminíferos (MF) propuestas para el Eoceno: *Estándar para Tetis (Serra-Kiel *et al.*, 1998; Speijer *et al.*, 2020), **Región Caribe (Mitchell *et al.*, 2022). Los esquemas de biozonación referidos de los foraminíferos planctónicos (PF), nanofósiles calcáreos (NC) siguen a Martini (1971) y Wade *et al.* (2011), respectivamente. Cronoestratigrafía para el Eoceno según Gradstein *et al.* (2020).

Por el contrario, se tuvo éxito con las recientes dataciones U-Pb en carbonatos realizadas a muestras de la Formación Arroyo de Piedra (Mora-Bohórquez *et al.*, 2025), cuyos resultados arrojaron edades entre $40,8 \pm 1,1$ Ma y $40,5 \pm 1,8$ Ma, que corresponden a la parte baja del Bartoniano (Eoceno medio). De acuerdo con Mora-Bohórquez *et al.* (2025), el desarrollo de estas calizas se relaciona con el óptimo climático del Eoceno medio que se ha identificado en varias cuencas carbonáticas del mundo (Norris *et al.*, 2013). Esta nueva metodología de datación absoluta podría aplicarse también para intentar datar las calizas de la sección de El Hueso y de otras secciones del área de Toluvejo. Hasta el momento, los resultados muestran que las dataciones absolutas U-Pb están de acuerdo con las edades obtenidas con la bioestratigrafía, mientras que los resultados del método $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ deben tomarse con mayor cautela y requerirán de una valoración litológica previa.

En resumen, tanto la información bioestratigráfica propuesta para la sección de El Hueso como los trabajos

bioestratigráfico previos soportan la afirmación de que los estratos bioclásticos de la Formación Toluvejo son coetáneos con los segmentos datados de las formaciones Chengue y Arroyo de Piedra. Esta observación está en línea con los modelos estratigráficos propuestos para el CPSJ (Duque-Caro *et al.*, 1996; Guzmán *et al.*, 2004; Bermúdez *et al.*, 2009; Mora-Bohórquez *et al.*, 2020; Salazar-Ortiz *et al.*, 2020a, 2020b). Temporalmente, los estratos de la Formación Toluvejo también serían equivalentes a las formaciones San Jacinto y Pendales, unidades con un mayor componente silicoclástico (Guzmán *et al.*, 2004; Salazar-Ortiz *et al.*, 2020b). Sin embargo, para entender de forma clara el marco cronoestratigráfico de la Formación Toluvejo, es recomendable la formalización de una sección tipo para la unidad, que describa a detalle su contenido paleontológico y sus relaciones estratigráficas con las unidades que la subyacen y suprayacen.

Inferencias paleoambientales de la Formación Toluvejo (sección El Hueso)

En general, por el tipo de petrofacies descritas, al igual que los bioclastos presentes en las muestras analizadas de la sección de la cantera El Hueso, se infiere un ambiente de depósito asociado a una rampa interna a media (Figura 9). Por ejemplo, la presencia común de *grainstone* y la dominancia de macroforaminíferos de la familia *Lepidocyclinidae* han sido asociadas con ambientes de rampa media del Paleógeno de Jamaica (EB4 Biofacies; Mitchell *et al.*, 2022), de acuerdo con los modelos de petrofacies de Flügel (2004). A su vez, la presencia moderada a baja de las proporciones de algas rojas indicaría una zona oligotrófica, con profundidades que oscilarían entre los 30 m y los 100 m (Silva-Tamayo *et al.*, 2020).

Pese a la aparente uniformidad litológica a lo largo de la sección El Hueso, el hecho de que existan variaciones en las abundancias de los bioclastos presentes sugiere que la rampa carbonatada presentó algunas variaciones en sus condiciones paleoambientales. Por ejemplo, la predominancia de las algas rojas hacia la base de la sección y la aparición de rodolitos ramificados en la petrofacies Palg, podría sugerir un aumento en la energía y la turbulencia del ambiente (Canudo, 2004). Igualmente, la aparición de glauconita en la parte basal de la sección sugiere altos niveles de nutrientes y bajas tasas de acumulación de sedimentos (Scholle y Ulmer-Scholle, 2003), mientras que la relación Sr/Ba sugiere

variaciones en las condiciones de paleosalinidad en la parte media de la sección, con aumentos y descensos leves en su relación (Figura 7). Teniendo en cuenta que el estroncio tiende a ser absorbido en sedimentos de grano fino depositados bajo aguas de alta salinidad, su variación podría estar asociada a fluctuaciones en el nivel del mar o al aporte de agua dulce vía escorrentía superficial (Wei y Algeo, 2020; Yelwa *et al.*, 2022).

La información geoquímica también ofrece pistas sobre las condiciones paleoambientales de la Formación Toluvejo en la sección de El Hueso. El primer aspecto llamativo fue el comportamiento de la relación $\log(\text{Fe}/\text{Ca})$, la cual presentó un pico de abundancia hacia la base (Figura 7). En general, las concentraciones altas de hierro pueden estar asociadas a un mayor aporte de terrígenos (Kujau *et al.*, 2010; Govin *et al.*, 2012), y teniendo en cuenta que dicho pico precede de los niveles donde hubo predominio de algas, la proliferación de estos organismos podría estar explicada por aquel proceso. Finalmente, tanto la abundancia de los macroforaminíferos a lo largo de la sección como los valores de las relaciones Cu/Al y V/Al sugieren condiciones de paleoxigenación bastante estables. Esto, teniendo en cuenta que a lo largo de la sección no se observaron variaciones significativas de los elementos sensitivos a fluctuaciones en las condiciones redox en los sedimentos del fondo, como lo son el cobre y el vanadio (Dummann *et al.*, 2021).

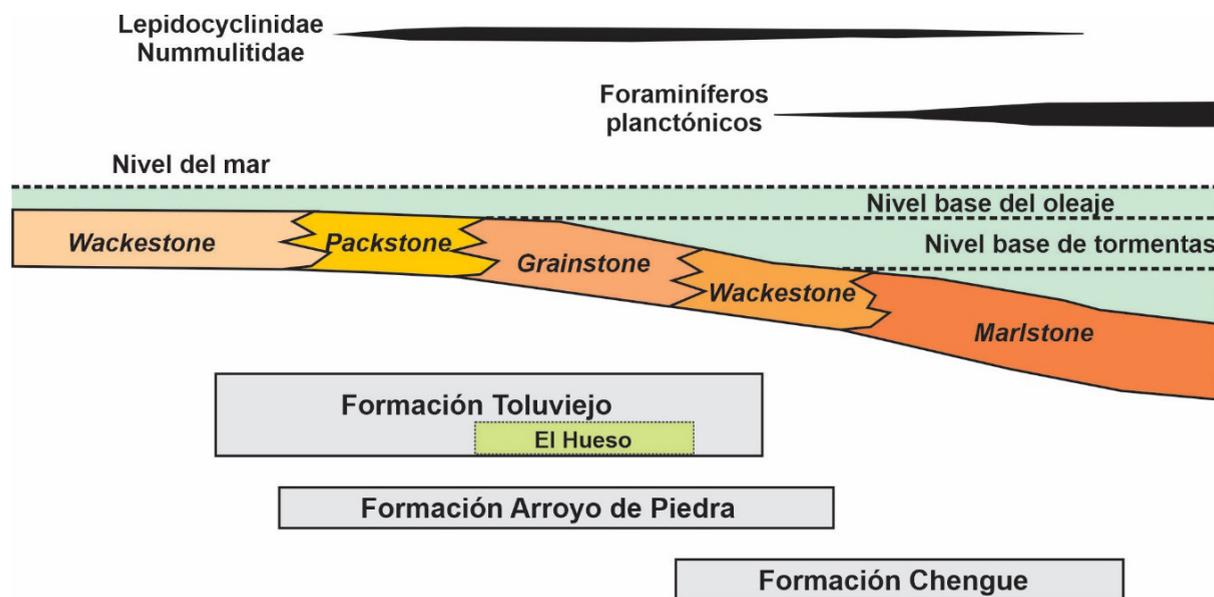


Figura 9. Ambientes de deposición de las unidades carbonatadas propuestas para el Eoceno del CPSJ. Formación Toluvejo (Guzmán *et al.*, 2004) y cantera El Hueso (este trabajo; Raigosa, 2018), formaciones Chengue y Arroyo de Piedra (Guzmán *et al.*, 2004; Salazar-Ortiz *et al.*, 2020a; Silva-Tamayo *et al.*, 2020). Modelos deposicionales basados en rampas carbonatadas del Eoceno de Jamaica (Mitchell *et al.*, 2022).

Al comparar la interpretación paleoambiental de la Formación Toluvejo para la columna levantada en la cantera de El Hueso con la efectuada por otros autores en la misma sección y unidad, se encuentran algunas similitudes. Por ejemplo, Raigosa (2018) propone que la sección de El Hueso se desarrolló en una plataforma carbonatada somera, en regiones de alta energía, con condiciones estables de salinidad, óptimas condiciones de temperatura y entrada de luz (Figura 9). Dicha interpretación fue basada en análisis petrológicos puntuales, el reporte parcial de los macroforaminíferos y la definición de 7 microfacies, en las que predominan desde la base *grainstone* con porosidades no mayores al 5 % hasta llegar al tope donde la litología presente es de tipo *wackestone*, con porosidades de hasta el 15 %.

De acuerdo con lo observado en nuestro trabajo, hay una mayor similitud con las microfacies más basales que proponen dichos autores: 1) *Grainstone - Lepidocyclina, Nummulites*, algas rojas, glauconita; 2) *Grainstone – Rodolitos, Lepidocyclina*, y 3) *Grainstone – Lepidocyclina* (Raigosa, 2018). La resolución de muestreo de nuestro trabajo impide el reconocimiento de las petrofacies superiores (microfacies 5-7) propuestas para la sección. Sin embargo, los elementos utilizados por Raigosa (2018) para su definición (algas rojas, peloides, *Nummulites*) fueron identificados en nuestro material. Una sucesión sedimentaria y un ambiente de depositación similares fueron propuestos para el pozo estratigráfico ANH-P-8, basados en la presencia común de *packstone* y *wackestone* fosilíferos (algas calcáreas y macroforaminíferos como elementos principales), y restos de oncoides, moluscos y equinodermos como elementos accesorios (Bermúdez *et al.*, 2009; Rosero *et al.*, 2014).

En contraste a los paleoambientes propuestos para la sección de El Hueso y el núcleo estratigráfico ANH-P-8, en cercanías de la Loma Porvenir (sur del CPSJ), la Formación Toluvejo ha sido descrita como una unidad heterogénea en su ambiente deposicional (Figura 9). Esto por presentar una sucesión que varía en su composición bioclástica, con concentraciones de macroforaminíferos (familias Discocyclinidae y Nummulitidae) y rodolitos que, si bien son similares a los observados en la sección de El Hueso, también presenta elementos diagnósticos como madrigueras (*Thallasinoides*), restos de corales (*Acropora*), esponjas y microfósiles calcáreos como ostrácodos y foraminíferos bentónicos calcáreos (Ortiz *et al.*, 1998; Guzmán *et al.*, 2004; Silva-Tamayo *et al.*, 2020).

El estudio de Salazar-Ortiz *et al.* (2020a), que abarcó secciones de las formaciones Chengue y Arroyo de Piedra, también sugiere condiciones paleoambientales diferentes (Figura 9). Una mayor recurrencia de calizas tipo *packstone*, *rudstone* y *mudstone*, al igual que las asociaciones de foraminíferos (principalmente planctónicos en la Formación Chengue) y las algas rojas, soportan un entorno que va de condiciones de plataforma interna a externa. Dichos autores describen varios grupos de algas, que en su conjunto superan la contribución de los foraminíferos bentónicos incrustantes. A su vez, concluyeron que los lechos de rodolitos de rampa media se extendieron principalmente sobre las áreas neríticas de esa antigua plataforma carbonatada (Salazar-Ortiz *et al.*, 2020a). Teniendo en cuenta que las secciones descritas por estos autores se encuentran en la parte central y norte del CPSJ, las diferencias en los paleoambientes respecto a lo propuesto para la sección de El Hueso prueban la heterogeneidad que debió tener el litoral costero del Caribe colombiano durante el Eoceno.

Esta heterogeneidad estuvo también influenciada por la convergencia oblicua entre la placa Caribe y la Sudamericana (Mora-Bohórquez *et al.*, 2020; González *et al.*, 2023), la cual generó bloques extensionales sobre los cuales se habrían desarrollado los carbonatos del Eoceno medio. Es posible que la limitada extensión de dichos bloques no permitió un desarrollo de plataformas amplias de carbonatos, sino que su desarrollo habría sido relativamente limitado espacialmente. Otro factor relacionado es el alto aporte de clásticos debido a la actividad de las fallas que limitan los bloques extensionales (Mora-Bohórquez *et al.*, 2025), lo cual probablemente también limitó un mayor desarrollo y extensión de los carbonatos.

Por ende, los contrastes observados tanto en la sección de El Hueso como en otras secciones del Eoceno refuerzan la necesidad de definir formalmente una sección tipo para la Formación Toluvejo, y de continuar haciendo caracterizaciones petrográficas y paleontológicas de otras secciones de esta unidad, así como de secciones de otras unidades coetáneas en el CPSJ.

Conclusiones

La evaluación petrográfica, paleontológica y geoquímica de la Formación Toluvejo (sección El Hueso, Cinturón Plegado de San Jacinto) permitió llegar a las siguientes conclusiones:

La litología principal de la sucesión es de tipo *grainstone*, en la que predominan los foraminíferos bentónicos de la familia Lepidocyclinidae, así como las algas rojas y los rodolitos. Basados en la composición de los bioclastos, se definieron 3 petrofacies: Pfor (alta presencia de macroforaminíferos), Palg (predominio de algas rojas y rodolitos) y Pfa (composición mixta de macroforaminíferos y algas rojas).

Teniendo en cuenta las asociaciones de macroforaminíferos presentes, en particular el taxón *Orbitoina cf. rdouvillei*, los estratos de la sección de El Hueso comprenderían una edad de Eoceno medio (límite Luteciano-Bartoniano), en concordancia con recientes dataciones U-Pb en carbonatos realizadas en el norte del CPSJ (Formación Arroyo de Piedra).

Tanto la información petrológica como los resultados de diferentes relaciones de varios elementos (Sr/Ba, log(Fe/Ca), V/Al, Cu/Al) sugieren un ambiente de depósito asociado a una plataforma carbonatada de rampa interna a media (zona fótica intermedia), de alta energía, con condiciones de salinidad y oxigenación estables. Hacia la base, fluctuaciones en las relaciones log(Fe/Ca) y Sr/Ba, así como en la proporción de las algas rojas sugieren un probable aumento en el aporte de materia orgánica, posiblemente de origen fluvial, o variaciones moderadas en el nivel del mar.

Finalmente, si bien la Formación Toluviejo es coetánea con la edad propuesta para las formaciones Chengue y Arroyo de Piedra, se observan diferencias litológicas tanto textural como composicionalmente, que refuerza propuestas de una alta heterogeneidad de las plataformas carbonatadas del Eoceno en el Caribe colombiano. A futuro, se recomienda la definición formal de una sección tipo para la Formación Toluviejo.

Agradecimientos

Los autores agradecen a HOCOL S. A. por la autorización para analizar las secciones delgadas de la sección de la cantera El Hueso y por compartir los resultados de los análisis bioestratigráficos que se vienen adelantando en el Cinturón Plegado de Sinú-San Jacinto desde 2017. Igualmente, se agradece al profesor Simon Mitchell (University of the West Indies, Jamaica) por sus valiosos comentarios sobre la taxonomía de los macroforaminíferos identificados en la sección. G.D.P. agradece al personal del laboratorio de itt-Oceaneon (Unisinos, Brasil) por su apoyo en la realización de los análisis geoquímicos. Dos revisores contribuyeron con valiosos aportes en el mejoramiento de una primera versión de este manuscrito.

Referencias

- Adams, A.; Mackenzie, W. (1998). *A colour atlas of carbonate sediments and rocks under the microscope*. Manson Publishing.
- Alfonso, M.; Herrera, J.M.; Navarrete, R.E.; Bermúdez, H.D.; Calderón, J.E.; Parra, F.E.; Sarmiento, G.; Vega, F.; Perrilliat, M. (2009). Cartografía geológica, levantamiento de columnas estratigráficas, toma de muestras y análisis bioestratigráficos. Sector de Chalán, Cuenca Sinú-San Jacinto. ANH-ATG, Bogotá.
- Baumgartner-Mora, C.; Baumgartner, P.O.; Salazar, E.A.; Rincón-Martínez, D. (2015). Larger benthic foraminifera of Paleogene carbonate banks, Caribbean Colombia – Ages and paleoenvironmental implications. *20th Caribbean Geological Conference*, Trinidad y Tobago.
- Bermúdez, H.D.; Grajales, J.A.; Restrepo, L.C.; Rosero, J.S. (2009). Estudio integrado de los núcleos y registros obtenidos de los pozos someros tipo “slim holes” en la cuenca del Sinú. Tomo 1, Anexo 1. Bogotá. ANH – Universidad de Caldas.
- BouDagher-Fadel, M. (2018). *Evolution and geological significance of larger Benthic Foraminifera*. 2nd Edition. UCL Press. <https://doi.org/10.14324/111.9781911576938>
- Butterlin, J. (1988). A reexamination of the stratigraphic distribution of the larger Foraminifera in the Caribbean region during the Paleogene and Miocene periods and the implications on the geodynamic history of this region. *11th Caribbean Geological Conference*, Bridgetown, Barbados.
- Canudo, J. (2004). Algas Calcáreas. In: E. Molina (ed). *Micropaleontología* (pp. 365-384). Prensas Universitarias de Zaragoza.
- Cardona, A.; Montes, C.; Ayala, C.; Bustamante, C.; Hoyos, N.; Montenegro, O.; Ojeda, C.; Niño, H.; Ramírez, V.; Valencia, V.; Rincón, D.; Vervoort, J.; Zapata, S. (2012). From arc-continent collision to continuous convergence, clues from Paleogene conglomerates along the southern Caribbean-South America plate boundary. *Tectonophysics*, 580, 58-87. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.08.039>

- Caro, M.; Spratt, D. (2003). Tectonic evolution of the San Jacinto Fold Belt, NW Colombia. *CSEG*, 2(2), 36-43.
- Cediel, F.; Shaw, R.P.; Cáceres, C. (2003). Tectonic assembly of the northern Andean Block. In: C. Bartolini, R.T. Buffler, J. Blickwede (ed). *The circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon habitats, basin formation, and plate tectonics* (pp 815-848). AAPG, Memoir 79.
- Dummann, W.; Hofmann, P.; Herrle, J.O.; Wennrich, V.; Wagner, T. (2021). A refined model of Early Cretaceous South Atlantic–Southern Ocean gateway evolution based on high-resolution data from DSDP Site 511 (Falkland Plateau). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 562, 110113. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2020.110113>
- Dunham, R.I. (1962). Classification of carbonate rocks according to depositional texture. In: W.E. Ham (ed.). *Classification of carbonate rocks* (pp. 108-121). Memoir I. AAPG.
- Duque-Caro, H. (1967). Informe Bioestratigráfico preliminar de los cuadrángulos D-8 y E-8. Informe 1522. Servicio Geológico Nacional. Bogotá.
- Duque-Caro, H. (1968). Observaciones generales a la bioestratigrafía y geología regional en los departamentos de Bolívar y Córdoba. *Boletín de Geología*, 24, 71-87.
- Duque-Caro, H. (1972a). Ciclos tectónicos y sedimentarios de Colombia y sus relaciones con la paleoecología. *Boletín Geológico*, 19(3), 1-23.
- Duque-Caro, H. (1972b). Relaciones entre la bioestratigrafía y la cronoestratigrafía en el llamado Geosinclinal de Bolívar. *Boletín Geológico*, 19(3), 25-68.
- Duque-Caro, H. (1975). Los foraminíferos planctónicos y el Terciario de Colombia. *Revista Española de Micropaleontología*, 7(3), 403-427.
- Duque-Caro, H. (1984). Estilo estructural, diapirismo y episodios de acrecimiento del terreno Sinú - San Jacinto en el Noroccidente de Colombia. *Boletín Geológico*, 27(2), 1-29.
- Duque-Caro, H.; Guzmán, G.; Hernández, O. (1996). Geología de la plancha 38: Informe No. 2188. INGEOMINAS, Bogotá, Colombia.
- Flügel, E. (2004). *Microfacies of carbonate rocks*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- GEOTEC (2003). Geología de los cinturones Sinú - San Jacinto, planchas 50 Puerto Escondido, 51 Loricá, 59 Mulatos, 60 Canalete, 61 Montería, 69 Necoclí, 70 San Pedro de Urabá, 71 Planeta Rica, 79 Turbo, 80 Tierralta. Escala 1:100.000 Memoria Explicativa. Ingeominas. Bogotá.
- González, R.; Oncken, O.; Faccenna, C.; Le Breton, E.; Bezada, M.; Mora, A. (2023). Kinematics and convergent tectonics of the Northwestern South American plate during the Cenozoic. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 24(7), 1-32. <https://doi.org/10.1029/2022GC010827>
- Govin, A.; Holzwarth, U.; Heslop, D.; Ford-Keeling, L.; Zabel, M.; Mulitza, S.; Collins, J.A.; Chiessi, C.M. (2012). Distribution of major elements in Atlantic surface sediments (36°N-49°S): Imprint of terrigenous input and continental weathering. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 13(1), Q01013. <https://doi.org/10.1029/2011gc003785>
- Gradstein, F.; Ogg, J.G.; Schmitz, M.; Ogg, G. (2020). Geologic Time Scale 2020. 2 volume book. Elsevier BV.
- Guzmán, G.; Gómez, E.; Serrano, B. (2004). Geología de los cinturones del Sinú, San Jacinto y borde occidental del Valle Inferior del Magdalena Caribe Colombiano. Escala 1:300.000. Informe. INGEOMINAS.
- Ingersoll, R.; Bullard, T.; Ford, R.; Grimm, J.; Pickle, J.; Sares, S. (1984). The effect of grain size on detrital modes: A test of the Gazzi-Dickinson point-counting method. *Journal of Sedimentary Research*, 54(1), 103-116. <https://doi.org/10.1306/212f83b9-2b24-11d7-8648000102c1865d>
- Kujau, A.; Nürnberg, D.; Zielhofer, C.; Bahr, A.; Röhl, U. (2010). Mississippi River discharge over the last ~560,000 years — Indications from X-ray fluorescence core-scanning. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 298(3-4), 311-318. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2010.10.005>
- Martini, E. (1971). Standard tertiary and quaternary calcareous nannoplankton zonation. *II Planktonic Conference*, Roma, Italia.

- Mitchell, S.; Robinson, E.; Özcan, E.; Jiang, M.; Robinson, N. (2022). A larger benthic foraminiferal zonation for the Eocene of the Caribbean and central American region. *Carnets de Géologie (Notebooks on Geology)*, 22(11), 409-565. <https://doi.org/10.2110/carnets.2022.2211>
- Mora-Bohórquez, J.A.; Oncken, O.; Le Breton, E.; Ibáñez-Mejía, M.; Faccena, C.; Veloza, G.; Vélez, V.; De Freitas, M.; Mesa, A. (2017). Linking Late Cretaceous to Eocene Tectono-stratigraphy of the San Jacinto fold belt of NW Colombia with Caribbean plateau collision and flat subduction. *Tectonics*, 36(11), 2599-2629. <https://doi.org/10.1002/2017TC004612>
- Mora-Bohórquez, J.A.; Oncken, O.; Le Breton, E.; Ibáñez-Mejía, M.; Veloza, G.; Mora, A.; Vélez, V.; De Freitas, M. (2020). Formation and evolution of the Lower Magdalena Valley Basin and San Jacinto fold belt of northwestern Colombia: Insights from Upper Cretaceous to recent tectono-stratigraphy. In: J. Gómez, D. Mateus-Zabala (ed). *The Geology of Colombia* (pp. 21-66). Volume 3. Servicio Geológico Colombiano. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.37.2019.02>
- Mora-Bohórquez, J.A.; Moreno, F.; Ibáñez, M.; Santamaría, L.; Ramírez, R.; Barbosa, J.C.; Góngora, J.D.; Sierra, D.; Veloza, G. (2025). Dating the Chengue/Arroyo de Piedra formation of the northern San Jacinto fold belt: Results of the application of In-Situ U-Pb carbonate geochronology. *Journal of South American Earth Sciences*, 153, 105355. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2025.105355>
- Norris, R.; Turner, S.; Hull, P.; Ridgwell, A. (2013). Marine ecosystem responses to Cenozoic global change. *Science*, 341(6145), 492-498. <https://doi.org/10.1126/science.1240543>
- Ortiz, A.; Blanco, A.; Corredor, G. (1998). Calidad de reservorio de las calizas de las formaciones Toluviejo y Ciénaga de Oro, Subcuenca Sinú-San Jacinto, Cuenca Caribe Colombiana. Instituto Colombiano del Petróleo - Ecopetrol.
- Raigosa, M. (2018). Caracterización estratigráfica, microfacial y diagenética de las formaciones Toluviejo y El Floral en la región onshore del Cinturón Plegado Sinú-San Jacinto. Servicio Geológico Colombiano.
- Rosero, S.; Silva, J.C.; Sial, A.N.; Borrero, C.; Pardo, A. (2014). Quimioestratigrafía de isótopos de estroncio de algunas sucesiones del Eoceno-Mioceno del cinturón de San Jacinto y el Valle Inferior del Magdalena. *Boletín de Geología*, 36(1), 15-27.
- Salazar-Franco, A.M.; Silva-Tamayo, J.C.; Bayona, G.; Méndez-Duque, J.; Lara, M. (2016). Chemostratigraphy of upper Eocene – lower Oligocene carbonate successions in the Southern Caribbean Margin (San Jacinto deformed belt of Colombia). *XII Simposio de Exploración Petrolera en Cuencas Subandinas*, Bogotá.
- Salazar-Ortiz, E.A.; Rincón-Martínez, D.; Páez, L.A.; Restrepo, S.M.; Barragán, S. (2020a). Middle Eocene mixed carbonate-siliciclastic systems in the southern Caribbean (NW Colombian margin). *Journal of South American Earth Sciences*, 99, 102507. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102507>
- Salazar-Ortiz, E.; Numpaque, J.; Bernal, L.; Ocampo, E.; Matajira, A.; Villabona, J.; Gómez, D.; García, G.; Méndez, S.; Martínez, E.; Sánchez, D.; Sotelo, A.P.; Aguirre, L. (2020b). Geología del área Sinú – San Jacinto, Planchas 23, 24, 30, 31 y parte de las planchas 37 y 38 a escala 1:50.000. Servicio Geológico Colombiano.
- Scholle, P.; Ulmer-Scholle, D. (2003). *A color guide to the petrography of carbonate rocks*. AAPG Memoir. <https://doi.org/10.1306/M77973>
- Serra-Kiel, J.; Hottinger, L.; Caus, E.; Drobne, K.; Ferrández, C.; Kumar-Jauhri, A.; Less, G.; Pavlovec, R.; Pignatti, J.; Samsó, J.M.; Schaub, H.; Sirel, E.; Strougo, A.; Tambareau, Y.; Tosquella, J.; Zakrevskaya, E. (1998). Larger foraminiferal biostratigraphy of the Tethyan Paleocene and Eocene. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 169(2), 281-299.
- Silva-Tamayo, J.C.; Rincón-Martínez, D.; Barrios, L.M.; Torres-Lasso, J.C.; Osorio-Arango, C. (2020). Cenozoic marine carbonate systems of Colombia. In: J. Gómez-Tapias, D. Mateus-Zabala (ed). *The Geology of Colombia* (pp. 249-282). Volume 3, Chapter 9. Servicio Geológico Colombiano. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.37.2019.09>
- Speijer, R.P.; Pälke, H.; Hollis, C.J.; Hooker, J.J.; Ogg, J.G.G. (2020). The Paleogene Period. In: F.M. Gradstein, J.G. Ogg, M. Schmitz, G. Ogg (ed.). *The Geologic Time Scale 2020* (pp. 1087-1140). Elsevier.

- Wade, B.S.; Pearson, P.N.; Berggren, W.A.; Pälike, H. (2011). Review and revision of Cenozoic tropical planktonic biostratigraphy and calibration to the geomagnetic polarity and astronomical time scale. *Earth-Science Reviews*, 104(1-3), 111-142. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2010.09.003>
- Wei, W.; Algeo, T.J. (2020). Elemental proxies for paleosalinity analysis of ancient shales and mudrocks. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 287, 341-366. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2019.06.034>
- Werenfels, A. (1926). A stratigraphical section through the Tertiary Toluviejo, Colombia. *Ecloga Geologicae Helvetiae*, 20(1), 79-83.
- Yelwa, N.A.; Mustapha, K.A.; Opuwari, M.; Aziz, A.A. (2022). Biomarkers, stable carbon isotope, and trace element distribution of source rocks in the Orange Basin, South Africa: implications for paleoenvironmental reconstruction, provenance, and tectonic setting. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 12, 307-339. <https://doi.org/10.1007/s13202-021-01317-9>
- Zamagni, J.; Mutti, M.; Košir, A. (2012). The evolution of mid Paleocene-early Eocene coral communities: How to survive during rapid global warming. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 317-318, 48-65. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2011.12.010>

Fecha de recibido: 19 de junio de 2024

Fecha de aceptado: 23 de octubre de 2024
