

Artículo original

Foraminíferos bentónicos como indicadores ambientales en dos entornos arrecifales de Colombia: la isla de Providencia y la bahía de Cartagena

Benthic foraminifers as bioindicators in two Colombian reef settings: Old Providence Island and Cartagena Bay

German D. Patarroyo^{1,2,*}, Gustavo A. Torres¹, José M. Torres¹, Diego F. Gómez¹,
Rafael C. Bortolin^{3†}

¹ Stratos Consultoría Geológica, Bucaramanga, Colombia

² Escuela de Geología, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia

³ Departamento de Civil y Ambiental, Universidad de la Costa, Barranquilla, Colombia

Resumen

Los ambientes arrecifales cumplen funciones ecosistémicas que son vitales en la región Caribe, pero el manejo inadecuado de sus recursos naturales y otros impactos de origen antrópico amenazan su preservación. Se evalúa aquí el uso de las asociaciones de foraminíferos como bioindicadores en dos localidades del Caribe colombiano con distintos grados de deterioro ambiental. El material analizado, perteneciente a las zonas arrecifales de la isla de Providencia (archipiélago de San Andrés) y de Varadero (bahía de Cartagena), presentó asociaciones típicas de un entorno de laguna arrecifal. Los taxones dominantes correspondieron a los géneros de algas simbiotes *Archaias*, *Asterigerina*, *Amphistegina* y *Heterostegina*, las formas porcelanáceas *Quinqueloculina*, *Triloculina* y *Spiroloculina*, y a los rotálidos *Rotorbinella*, *Cymbaloporetta* y *Eponides*. En proporciones variables, también se identificaron algunos géneros indicativos de estrés ambiental como *Ammonia*, *Clavulina* y *Cribrorhynchium*. El análisis detallado de la composición faunística en Providencia y Varadero evidenció diferencias significativas en la abundancia de algunos taxones, probablemente como reflejo de los distintos grados de impacto ambiental al que están expuestas ambas localidades. Dicho impacto fue particularmente notorio en el arrecife de Varadero, donde las estimaciones del índice FORAM (*Foraminifers in Reef Assessment and Monitoring*, IF) sugieren un estrés ambiental de moderado a alto, confirmando la persistencia de condiciones probablemente influenciadas por el alto impacto antrópico ya identificadas en estudios anteriores en la bahía de Cartagena. En contraste, las asociaciones de foraminíferos y los valores de IF en el material de Providencia sugieren condiciones de estrés moderadas a bajas, similares a las estimadas en otros cuerpos insulares del archipiélago.

Palabras clave: Ambientes arrecifales; Bioindicadores; Índice FORAM (IF); Tanatocenosis.

Abstract

Reef settings play key ecosystemic functions in the Caribbean realm, but the unrestrained exploitation of their natural resources and other anthropogenic effects threaten their preservation. Here, we explore the use of the foraminiferal assemblages as bioindicators in two Colombian Caribbean localities with different levels of environmental stress. The material studied was collected from the reef zones in Old Providence Island (San Andrés Archipelago) and Varadero (Cartagena Bay), where typical reef lagoon foraminiferal assemblages are found. The main taxa comprised the symbiont-bearing genera *Archaias*, *Asterigerina*, *Amphistegina*, and *Heterostegina*, the porcelaneous forms *Quinqueloculina*, *Triloculina*, and *Spiroloculina*, and the rotaliids *Rotorbinella*, *Cymbaloporetta*, and *Eponides*. The stress-tolerant taxa *Ammonia*, *Clavulina*, and *Cribrorhynchium* were also identified in variable abundances. The detailed analysis of the faunistic composition in Old Providence and Varadero indicated significant differences in the abundances of some taxa, likely related to specific stress conditions in both localities. These stress conditions were particularly evident in Varadero, where

Citación: Patarroyo GD, *et al.* Foraminíferos bentónicos como indicadores ambientales en dos entornos arrecifales de Colombia: la isla de Providencia y la bahía de Cartagena. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 49(193):728-747, octubre-diciembre de 2025. doi: <https://doi.org/10.18257/racefyn.3145>

Editor: Camilo Montes

***Correspondencia:**

German D. Patarroyo;
paleo.patarroyo@gmail.com

Recibido: 18 de marzo de 2025

Aceptado: 15 de agosto de 2025

Publicado en línea: 7 de octubre de 2025



Este artículo está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

the FORAM (Foraminifers in Reef Assessment and Monitoring) index (FI) estimations suggest moderate to highly stressed reef settings, similar to those found in preliminary surveys in this area and probably influenced by the higher anthropogenic impact at the Cartagena Bay. In contrast, the foraminiferal assemblages and the FI estimations of Old Providence suggest low to moderate stress conditions, as previously reported in other insular bodies of the archipelago.

Keywords: Benthic foraminifera; Bioindicadores; FORAM Index (FI); Thanatocoenosis.

Introducción

Los foraminíferos (Infrarreino Rhizaria, filo Foraminifera) son un grupo de organismos unicelulares con una amplia distribución en los océanos (zonas intermareales a abisales). Constituyen un importante elemento en el plancton y en las comunidades meiobentónicas y macrobentónicas (Murray, 1991, 2006; Sen Gupta, 1999). Una de sus particularidades es el desarrollo de conchillas con un gran potencial de preservación en el registro geológico, por lo cual se usan como herramienta bioestratigráfica y en la elaboración de reconstrucciones paleoambientales. Además de su relevancia ecológica actual, los foraminíferos también poseen características que los hacen valiosos en el estudio del pasado geológico. En el Caribe colombiano los foraminíferos vienen utilizándose ampliamente en el estudio de las sucesiones sedimentarias del Cenozoico (Petters & Sarmiento, 1956; Duque-Caro *et al.*, 1975, 1990; Fiorini & Jaramillo, 2007; Rincón-Martínez *et al.*, 2007; Molinares *et al.*, 2012; Salazar-Ortiz *et al.*, 2020; Barragán-Montilla & Sánchez-Quiñónez, 2021; Torres *et al.*, 2022; Duque-Castaño *et al.*, 2023; Trejos-Tamayo *et al.*, 2024, 2025). Sin embargo, los estudios de estos organismos en ecosistemas recientes siguen siendo limitados (Parada-Ruffinatti & Londoño de Hoyos, 1983; Parada-Ruffinatti & Pinto, 1986; Triffleman *et al.*, 1991; Parada-Ruffinatti, 1996; Ortiz-Moreno & Acosta, 2003; Bernal *et al.*, 2005; 2008; Fiorini, 2015; Barragán & Bernal, 2024), lo que podría dar lugar a sesgos en las interpretaciones paleoambientales que se adelantan en el norte de Colombia.

Los foraminíferos, en particular los de hábito de vida bentónico, presentan asociaciones que en los mares tropicales pueden llegar a ser muy diversas y son muy sensibles al impacto ambiental de origen antrópico (Hallock *et al.*, 2003; 2012; Doo *et al.*, 2014; Prazeres *et al.*, 2020). Variaciones significativas en parámetros ambientales como la temperatura, la incidencia de la luz y el pH, o la presencia abundante de materia orgánica e, incluso, de compuestos asociados a bloqueadores solares pueden afectar mucho a grupos selectos de foraminíferos bentónicos (*large benthic foraminifera*, LBF), asociados con algas simbiotas (Hallock *et al.*, 2003; Nobes *et al.*, 2008; Prazeres *et al.*, 2020; Litner *et al.*, 2022). Por tal motivo, en otras regiones tropicales los foraminíferos bentónicos se utilizan como bioindicadores ambientales en entornos arrecifales potencialmente amenazados (Culver & Buzas, 1995; Schueth & Frank, 2008; Barbosa *et al.*, 2009; Dimiza *et al.*, 2016).

Esta misma aproximación se ha probada en años recientes en el litoral Caribe colombiano y en el archipiélago de San Andrés con resultados promisorios (Velásquez *et al.*, 2011; Sánchez *et al.*, 2019; Rodríguez *et al.*, 2023; Patarroyo *et al.*, 2024). El uso de las asociaciones de foraminíferos como bioindicadores en los ambientes arrecifales de la mayoría de estos estudios se basó en la estimación del denominado índice FORAM (*Foraminifera in Reef Assessment and Monitoring*); (Hallock *et al.*, 2003). Dicho índice se basa en la relación entre la proporción de especies de foraminíferos y de algas simbiotas y las asociaciones consideradas como oportunistas. El índice FORAM (IF) no solo ha servido para las valoraciones del estrés ambiental en un momento de muestreo específico, sino para comprobar su variabilidad en los registros sedimentarios en las últimas décadas (Schueth & Frank, 2008; Barbosa *et al.*, 2009; Uthicke *et al.*, 2010; Carvajal-Chitty & Navarro, 2011; Stephenson *et al.*, 2015; Pisapia *et al.*, 2017; Humphreys *et al.*, 2018). A pesar de los avances recientes, sigue siendo necesaria una evaluación sistemática de herramientas como el IF en regiones del Caribe colombiano sujetas a impactos ambientales contrastantes, con el fin de ampliar su aplicabilidad regional.

Se presentan aquí los resultados del estudio de dos campañas de investigación en las que se recolectaron asociaciones recientes de foraminíferos bentónicos en dos regiones del Caribe colombiano: la isla de Providencia (archipiélago de San Andrés) y el arrecife de Varadero (bahía de Cartagena). Las dos regiones presentan afectaciones disímiles de origen antrópico (polución marina, sobrepesca), por lo que se buscó entender primero el tipo de asociaciones presentes y, posteriormente, su aplicación tentativa como bioindicadores del impacto ecológico en estas zonas.

Área de estudio

La isla de Providencia hace parte del archipiélago de San Andrés (Caribe colombiano), un conjunto de islas oceánicas, bancos y atolones ubicados a unos 300 km de Centroamérica y a 720 km del noroeste de la costa colombiana (CORALINA-Invemar, 2012; Geister & Díaz, 2007). En el 2000 la UNESCO reconoció mediante una resolución un área marina protegida en el archipiélago denominada Reserva de la Biosfera Seaflower, la cual alberga uno de los complejos arrecifales más extensos del Atlántico tropical (Díaz *et al.*, 2000; Taylor *et al.*, 2013; Ramírez, 2016). La isla de Providencia, ubicada al norte de la reserva, comprende un área de 20 km², en tanto que el complejo arrecifal abarca un área total de 285 km² y se extiende hacia el norte a lo largo de una barrera arrecifal de 32 km de longitud (Díaz *et al.*, 2000; Geister & Díaz, 2007). Como todos los cuerpos insulares del archipiélago, la isla de Providencia tuvo su origen en un edificio volcánico durante el Paleógeno; una reactivación del volcanismo durante el Mioceno configuró la geomorfología de la isla y provocó que el registro sedimentario miocénico quedara fragmentado y se ubicara hacia la parte sur de la isla (Geister, 1992; Geister & Díaz, 2007; Durán-Gómez *et al.*, 2023). Actualmente los ecosistemas coralinos en la barrera y los pináculos distribuidos en la laguna arrecifal están dominadas por corales masivos (géneros *Siderastrea*, *Diploria* y *Montastrea*) y ramificados (*Porites*), así como por octocorales y macroalgas en el sector occidental de la isla (Sánchez *et al.*, 1998; Díaz *et al.*, 2000; Geister & Díaz, 2007). Las muestras recolectadas provienen de dos sectores: el sector norte de la laguna arrecifal (PS1 a PS11) y el litoral costero de la isla (PS12 a PS19) (Figura 1).

El arrecife de Varadero, ubicado en la bahía de Cartagena (Caribe colombiano), se encuentra en una zona costera estratégica entre el canal de Bocachica y la isla de Barú. En general, el arrecife comprende una estructura alargada de dirección sudoeste-noreste (SO-NE) con un área de 1,12 km²; está conformado por una terraza dominada por corales escleractínidos (*Orbicella*, *Agaricia* y *Porites*) y otra plataforma carbonatada menos desarrollada con presencia de colonias de corales (*Madracis*), octocorales (*Eunicea* y *Briareum*) y segmentos de pastos marinos (Pizarro *et al.*, 2017; Manrique-Rodríguez *et al.*, 2019). El descubrimiento de este arrecife en el 2013 fue inesperado, ya que la bahía de Cartagena es una zona históricamente contaminada por el manejo inadecuado de los residuos sólidos, los numerosos dragados realizados en el área y la descarga fluvial asociada al canal del Dique (Restrepo *et al.*, 2006; Pizarro *et al.*, 2017; Romero-Murillo *et al.*, 2023). Las muestras recolectadas hacen parte de la zona con mejor desarrollo de comunidades coralinas (Figura 1).

Métodos

El material de la laguna arrecifal de Providencia se recolectó durante las actividades anuales de las expediciones Seaflower (septiembre de 2019) en colaboración con otros grupos de investigación que estudiaron las comunidades coralinas y evaluaron el contenido de metales traza en los sedimentos. Se estudiaron 19 muestras en Providencia, en profundidades que oscilaban entre los 1,5 y 11,8 metros (Figura 1). El material del arrecife de Varadero (8 muestras; 4-5 metros de profundidad) fue facilitado por Rafael Bortolin[†] (Universidad de la Costa, CUC) durante las actividades del Cartagena Reef Check (agosto de 2019). En ambos casos, los muestreos se hicieron de forma manual mediante buceo asistido.

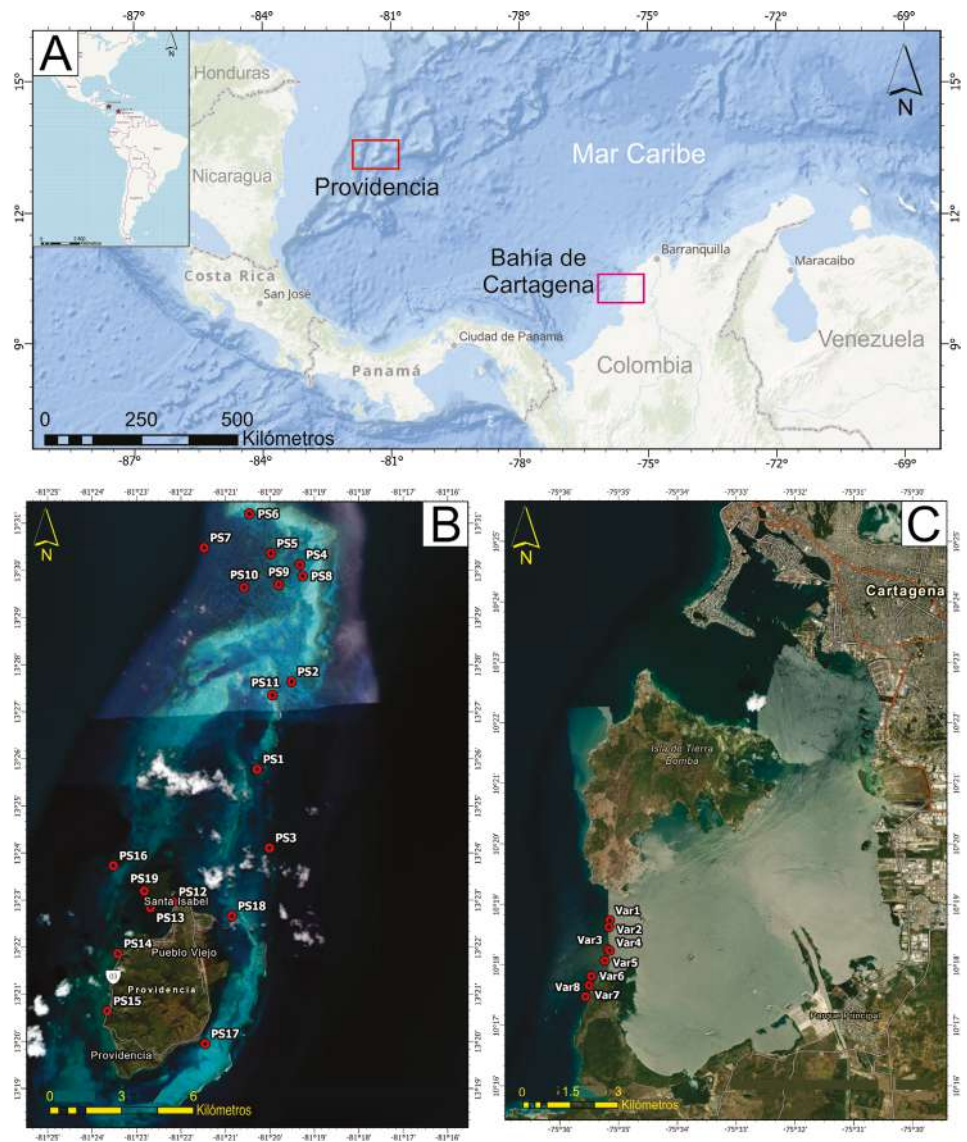


Figura 1. (A) Localización de las áreas estudiadas. Muestras recolectadas para el estudio de las asociaciones de foraminíferos en la isla de Providencia (B) y el arrecife de Varadero (C)

Dadas las dificultades para utilizar el tinte rosa de Bengala en los dos grupos de muestras, el reconocimiento de las asociaciones de foraminíferos vivos (biocenosis) no fue posible en campo y se trabajó con asociaciones muertas (tanatocenosis). Sin embargo, las muestras de Providencia se secaron al sol inmediatamente después de su recolección, lo que permitió el reconocimiento de foraminíferos con algas simbiotas que, por su estado de conservación y coloración, probablemente estaban vivos en el momento del muestreo (Prazeres *et al.*, 2020). Por el contrario, las muestras tomadas en el arrecife de Varadero se fijaron en alcohol al 70 %, lo que favoreció el reconocimiento de géneros con algas simbiotas como *Amphistegina*.

Las muestras de Providencia tuvieron un peso entre los 10 y los 25 gramos y las de Varadero, entre 4 y 15 gramos. Para efectos de un mayor control de las asociaciones encontradas en ambos grupos de muestras, se hizo una valoración de la composición y la granulometría de los sedimentos en los que estaban embebidos los foraminíferos. Asimismo, se contabilizó el total de conchillas de foraminíferos fragmentados (fragmentación >30 %) como un indicador

indirecto del efecto del oleaje. Tras lavar las muestras con agua y eliminar la fracción más fina (<230 μm) en el laboratorio, los foraminíferos se asignaron a una morfoespecie hasta donde fue posible. Se identificaron entre 100 y 300 ejemplares para poder analizar poblaciones estadísticamente significativas (Fatela & Taborda, 2002; Forcino, 2012). La taxonomía de las formas encontradas siguió lo propuesto en la literatura especializada en la región Caribe (Parada-Ruffinatti & Pinto, 1986; Bolli *et al.*, 1994; Havach & Collins, 1997; Triffleman *et al.*, 1991; Peebles *et al.*, 1997; Gudnitz & Collins, 2024). Se consideraron también las observaciones ecológicas de los géneros asociados a ambientes arrecifales (Murray, 1991; 2006). Dado que *Archaias angulatus*, *Amphistegina gibbosa* y *Asterigerina carinata* son especies comunes en los ambientes arrecifales del Caribe, abreviamos sus nombres genéricos como Ar., Am. y As., respectivamente. Se estimaron la diversidad (Shannon-Wiener H) y la equidad (E) y se definieron los parámetros composicionales (tipo de conchilla) utilizando el programa PAST (Hammer *et al.*, 2001). Para determinar la similitud entre las asociaciones de foraminíferos de las dos localidades, se hizo un análisis de varianza multivariado no paramétrico (PERMANOVA, mil permutaciones), usando la disimilitud de Bray-Curtis como método de estimación.

Los valores del índice FORAM (IF), que van de 0 a 10, se interpretan de la siguiente forma: IF >6, ambientes estables o en proceso de recuperación en caso de año previo; IF 4-6, ambientes con indicios de deterioro, e IF 2-4 o IF <2, ambientes con crecimiento marginal de arrecifes y en deterioro avanzado (Hallock *et al.*, 2003; Prazeres *et al.*, 2020). Los valores obtenidos en Providencia y Varadero se contrastaron con los reportes preliminares de estudios efectuados en el litoral caribe de Colombia (Parque Tayrona, islas del Rosario) (Velásquez *et al.*, 2011; Rodríguez *et al.*, 2023), y en el archipiélago de San Andrés (Sánchez *et al.*, 2019; Patarroyo *et al.*, 2024). En el caso del material de Providencia ya se había publicado una estimación preliminar del IF (Patarroyo *et al.*, 2024), tomando como referencia una taxonomía de géneros y morfogrupos para las asociaciones.

Resultados

Asociaciones de foraminíferos de la isla de Providencia

Se reconocieron aproximadamente 4.800 ejemplares en las 19 muestras analizadas, que comprendían 27 géneros (siete géneros con algas simbiotes) y 34 especies de foraminíferos bentónicos. Algunos de los taxones más representativos se ilustran en las Figuras 2 y 3. Las especies con algas simbiotes más representativas fueron *A. angulatus* y *A. gibbosa*. También se identificaron, en menor proporción, ejemplares de *Laevipeneroplis*, *Heterostegina*, *Sorites*, *Asterigerina* y *Peneroplis*. Las muestras de la laguna arrecifal presentaron una mayor dominancia de la especie *A. gibbosa*, mientras que las muestras del litoral costero tuvieron una mayor proporción de la especie *A. angulatus*. Las formas porcelanáceas estuvieron conformadas principalmente por distintas especies de los géneros *Quinqueloculina* y *Spiroloculina*, en tanto que las formas hialinas presentaron proporciones variables de las especies *Cymbaloporeta squamosa*, *Rotorbinella rosea* (común en las muestras de la laguna arrecifal), *Planogypsina acervalis*, y de las especies indicadoras de estrés *Ammonia beccarii* (muy común en las muestras PS12 y PS15), *Eponides repandus*, *Criboelphidium poeyanum* y *Nonionella atlantica*. Las formas aglutinantes correspondieron casi exclusivamente a las especies *Textularia oviedoina* y *Clavulina angularis*. Los conteos totales de las muestras pueden consultarse en el material suplementario (Tabla 1S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3145/4596>).

En general, las asociaciones de foraminíferos encontradas en Providencia reflejan las condiciones típicas de entornos hipersalinos y de laguna arrecifal, donde las formas con algas simbiotes y las que presentan conchillas calcáreas (tipo porcelanáceo y hialinas) son dominantes (>40 % de la asociación total), mientras que las formas de tipo aglutinante son escasas (<5 % de la asociación total) (Figura 4). Hay una mayor abundancia (~60 % de la asociación total) de las formas porcelanáceas en las muestras del litoral costero de la isla (muestras PS12 a PS19).

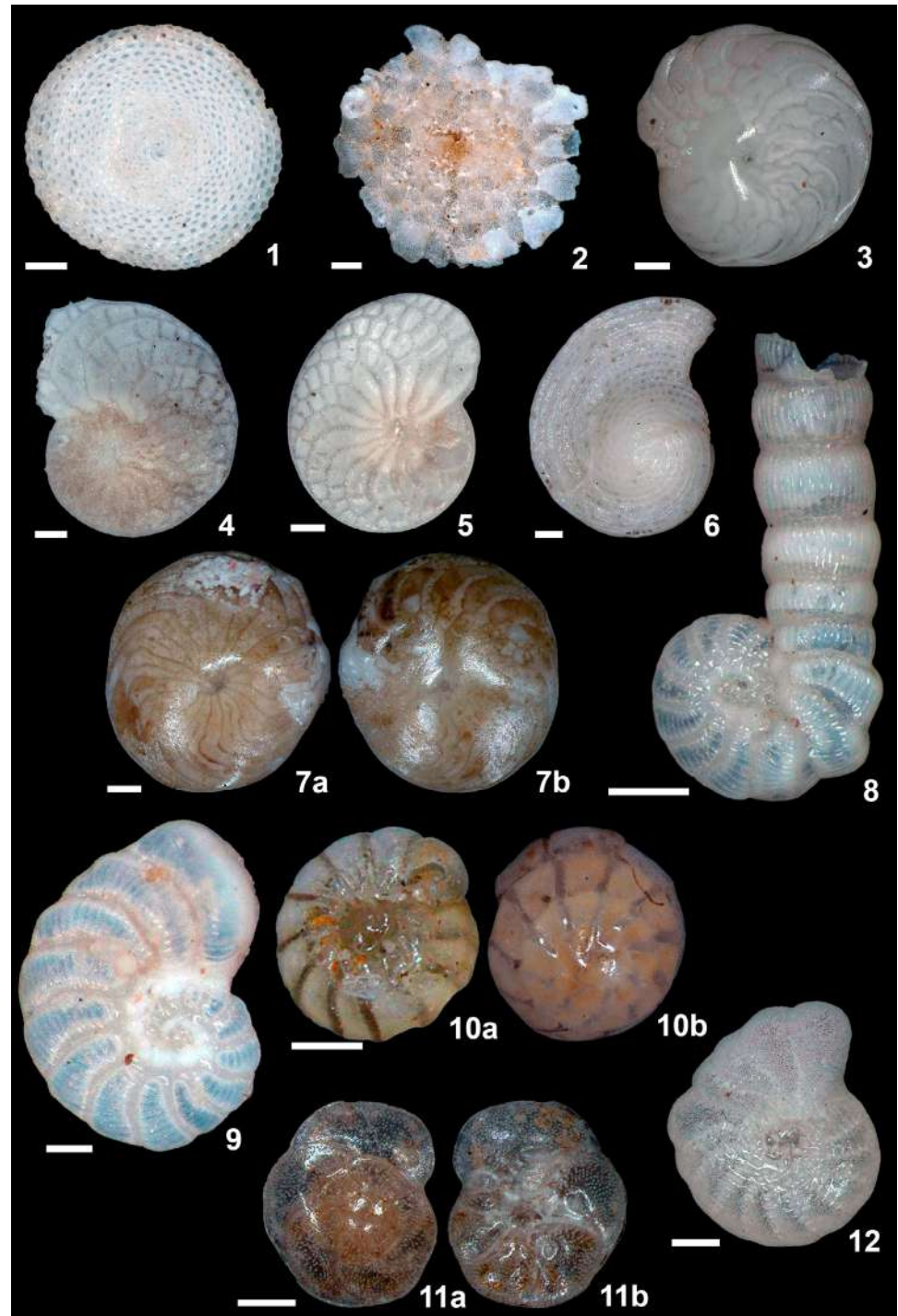


Figura 2. Foraminíferos representativos de los ambientes arrecifales de la isla de Providencia. La escala corresponde a 100 μm . La técnica de adquisición de las microfotografías es de apilamiento focal. 1. *Sorites orbiculus* (Forsskål; PS6). 2. *Planogypsina acervalis* (Brady; PS4). 3 y 7a-b. *Amphistegina gibbosa* (d'Orbigny; PS3, PS7). 4-5. *Heterostegina depressa* (d'Orbigny; PS7, PS10). 6. *Archaias angulatus* (Fichtel & Moll; PS9). 8. *Peneroplis arietinus* (Batsch; PS8). 9. *Peneroplis pertusus* (Forsskål; PS13). 10a-b. *Ammonia beccarii* (Linnaeus; PS12). 11a-b. *Eponides repandus* (Fichtel & Moll; PS4). 12. *Criboelphidium* sp. (Cushman & Brönnimann; PS7)

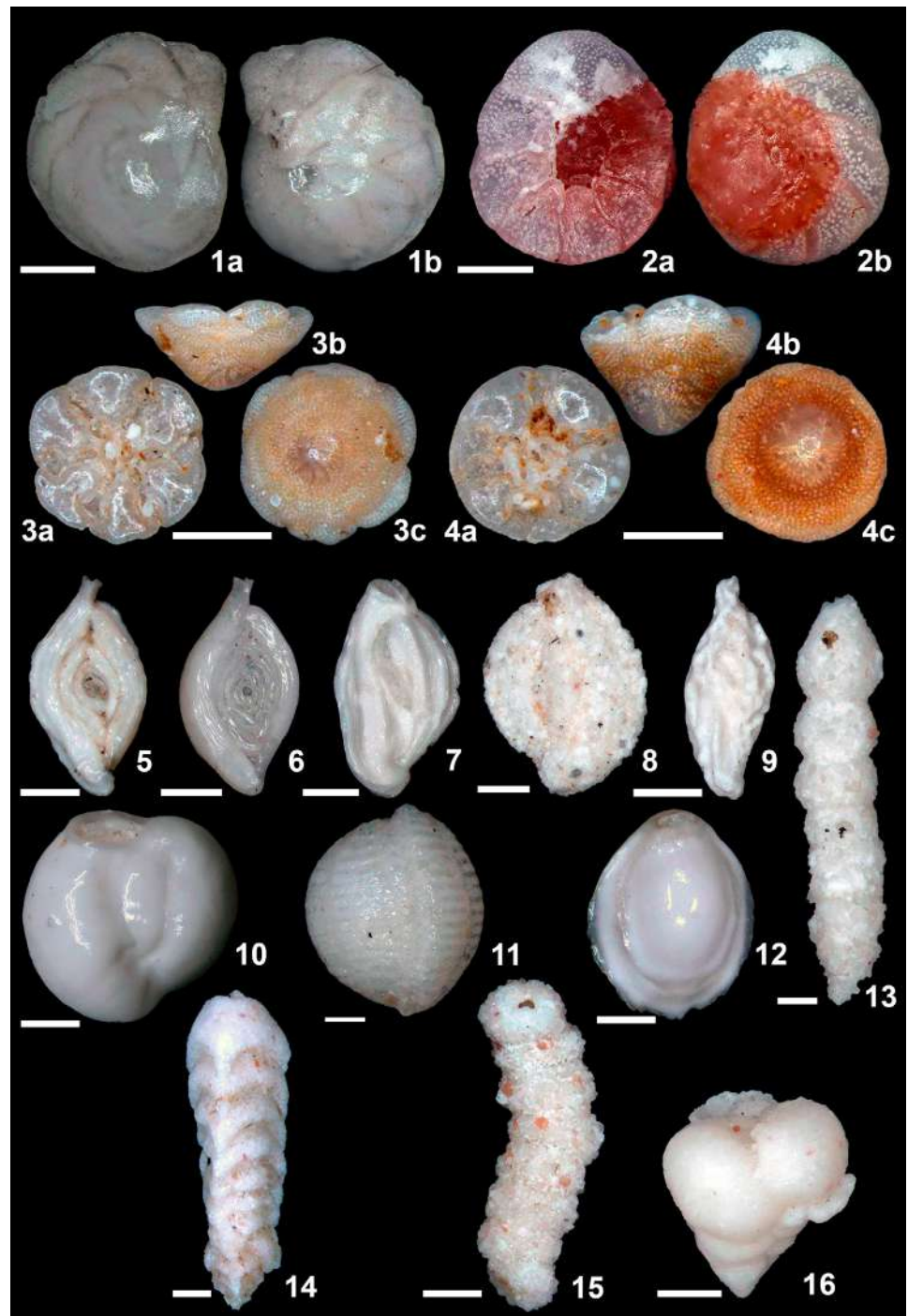


Figura 3. Foraminíferos representativos de los ambientes arrecifales de la isla de Providencia. La escala corresponde a 100 μm . La técnica de adquisición de las microfotografías es de apilamiento focal. **1a-b.** *Asterigerina carinata* (d'Orbigny; PS2). **2a-b.** *Rotorbinella rosea* (d'Orbigny; PS8). **3a-c, 4a-c.** *Cymbaloporeta squamosa* (d'Orbigny; PS12). **5.** *Spiroloculina atlantica* (Cushman; PS12). **6.** *Spiroloculina antillarum* (d'Orbigny; PS17). **7.** *Quinqueloculina poeyana* (d'Orbigny; PS9). **8.** *Quinqueloculina agglutinans* (d'Orbigny; PS13). **9.** *Quinqueloculina reticulata* (d'Orbigny; PS11). **10.** *Miliolinella subrotundata* (Montagu; PS5). **11.** *Borelis pulchra* (d'Orbigny; PS17). **12.** *Pyrgo* sp. (Defrance; PS10) **13.** *Bigenerina* sp. (d'Orbigny; PS5). **14.** *Clavulina trilatera* (Cushman; PS10). **15.** *Reophax* sp. (Monfort; PS6). **16.** *Textularia oviedoiana* (d'Orbigny; PS17)

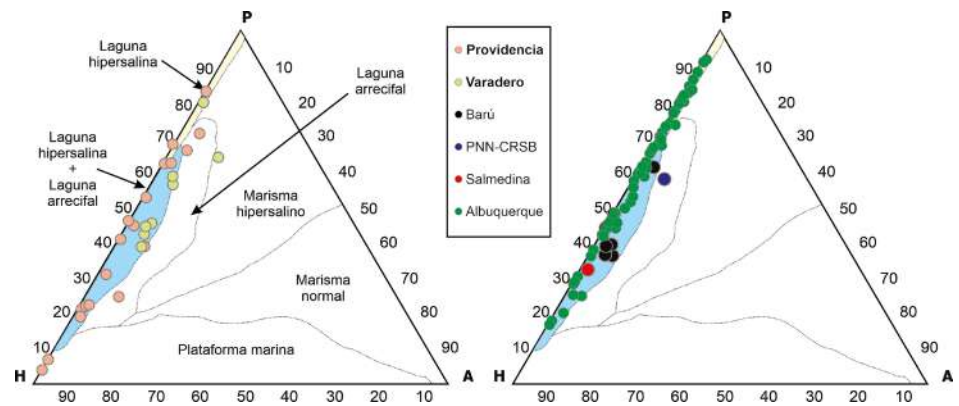


Figura 4. Diagramas ternarios de las asociaciones de foraminíferos: **Izquierda:** asociaciones de la isla de Providencia y del arrecife de Varadero. **Derecha:** asociaciones de la región de Cartagena, incluyendo Barú (Rodríguez *et al.*, 2023), Parque Nacional Natural Islas del Rosario (Velásquez *et al.*, 2011), banco de Salmedina (Bernal *et al.*, 2005), y cayo Albuquerque (Patarroyo *et al.*, 2024). Tipos de conchillas: calcáreo hialino (H), calcáreo porcelanáceo (P) y aglutinado (A). Definición de hábitats basadas en Murray (1991, 2006)

El porcentaje de conchillas fragmentadas fue bajo (<10 % de la asociación total) en la mayoría de las muestras, con excepción de las localidades PS1 y PS16, con porcentajes de 20 y 17 %, respectivamente. Sin embargo, el bajo recobro de foraminíferos en estas dos muestras (<100 individuos/muestra) pudo llevar a sobrestimaciones en este parámetro y por ello no fueron consideradas en los análisis de diversidad. La diversidad (Shannon-H) de las asociaciones de foraminíferos fluctuó entre 1,2 y 2,5, con excepción de las muestras PS2 y PS18, ubicadas en la parte norte de la isla (Figura 1), y cuyos valores de Shannon-H fueron menores a uno (<1). Los valores de equidad, en cambio, presentaron valores entre 0,24 y 0,55 en todas las muestras y no hubo diferencias significativas entre aquellas provenientes del litoral costero y las de la laguna arrecifal.

Otros elementos constitutivos de los sedimentos analizados en Providencia, que en general pueden definirse como arenas biogénicas de grano medio a grueso y arenas de grano muy fino (muestras PS1, PS13, PS12, PS15 y PS16), correspondían a fragmentos de gasterópodos y bivalvos, espinas de equinodermos, espículas de esponjas, valvas de ostrácodos (muy diversos), restos de peces (otolitos y dientes), foraminíferos planctónicos (género *Globigerinoides*) y restos leñosos (muestras del litoral costero).

Asociaciones de foraminíferos del arrecife de Varadero

Los sedimentos analizados en el arrecife de Varadero correspondieron a arenas biogénicas de grano medio, en las que, además de las conchillas de foraminíferos bentónicos, también estaban presentes abundantes fragmentos de invertebrados (moluscos, espinas y osículos de equinodermos, espículas de esponjas, valvas de ostrácodos) y vertebrados (otolitos y dientes de peces). Al igual que en el grupo de muestras de Providencia analizado, las formas de las conchillas calcáreas porcelanáceas y hialinas fueron dominantes (>40 % de la asociación total), en tanto que las de tipo aglutinante fueron escasas (<6 % de la asociación total) (Figura 4). Teniendo en cuenta el diagrama ternario de la Figura 4, la mayoría de las asociaciones encontradas en Varadero correspondían a las de un entorno de laguna arrecifal y laguna hipersalina, diferenciándose ligeramente las muestras al sur del arrecife (VAR-6 y VAR-8) (Figura 1) en su composición faunística.

Las asociaciones de foraminíferos encontradas en el sector de Varadero (1.024 especímenes en total) registraron una abundancia moderada (100-150 especímenes/muestra) y una preservación de buena a moderada. Se identificaron un total de 35 géneros (ocho de ellos con algas simbiotes) y 43 especies de foraminíferos bentónicos. Algunos de los taxones más representativos se muestran en la Figura 5. Entre las formas con

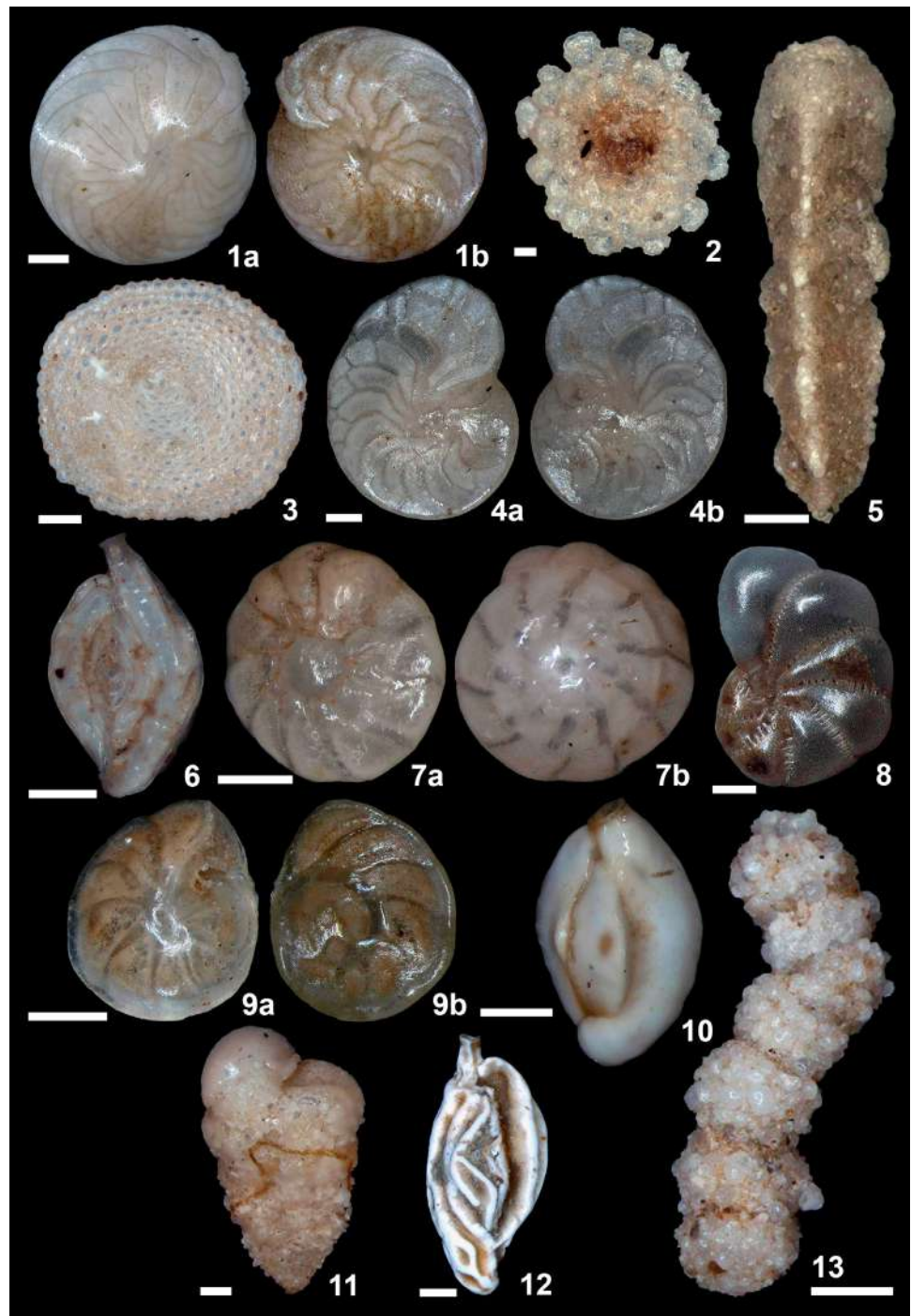


Figura 5. Foraminíferos representativos del arrecife de Varadero (bahía de Cartagena). La escala corresponde a 100 μm . La técnica de adquisición de las microfotografías es de apilamiento focal. **1a-b.** *Amphistegina gibbosa* (d'Orbigny; VAR-5). **2.** *Planogypsina acervalis* (Brady; VAR-1). **3.** *Sorites orbiculus* (Forsskål; VAR-7). **4a-b.** *Heterostegina depressa* (d'Orbigny; VAR-5). **5.** *Clavulina trilatera* (Cushman; VAR-4). **6.** *Spiroloculina antillarum* (d'Orbigny; VAR-2). **7a-b.** *Ammonia tepida* (Cushman; VAR-2). **8.** *Elphidium* sp. (Monfort; VAR-2). **9a-b.** *Asterigerina carinata* (d'Orbigny; VAR-1). **10.** *Quinqueloculina lamarckiana* (d'Orbigny; VAR-7). **11.** *Textularia agglutinans* (d'Orbigny; VAR-2) **12.** *Quinqueloculina reticulata* (d'Orbigny; VAR-5). **13.** *Bigenerina* sp. (d'Orbigny; VAR-2)

algas simbioses dominantes se identificaron las especies *Am. gibbosa*, *Heterostegina depressa*, *As. carinata*, y *Ar. angulatus*, al igual que los géneros *Borelis*, *Sorites*, *Peneroplis* y *Laevipeneroplis*. Las formas porcelanáceas estaban conformadas principalmente por distintas especies de los géneros *Miliolinella*, *Quinqueloculina*, *Triloculina* y *Spiroloculina*. Por su parte, las formas hialinas estuvieron dominadas por los taxones indicadores de estrés *C. poeyanum*, *Ammonia tepida*, así como la especie generalista *Rosalina floridana*. Las formas aglutinantes registraron proporciones de especímenes de *C. angularis*, *Textularia* spp, *Reophax* spp., entre otros. Los conteos totales de las muestras se encuentran en el material suplementario (**Tabla 2S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3145/4597>).

Los valores de diversidad (Shannon-H) y equidad de las asociaciones de foraminíferos de Varadero variaron según la localidad. En general, las muestras de la parte norte del arrecife (VAR-1 a VAR-5) presentaron valores de diversidad menores a 2,8, en tanto que sus valores de equidad fluctuaron entre 0,53 y 0,66. En comparación, las muestras del sector sur del arrecife —donde hay mayor comunicación con el océano— registraron valores de equidad entre 0,60 y 0,67.

Discusión

Las asociaciones de foraminíferos de Providencia y Varadero en el contexto de la región Caribe

Las asociaciones encontradas en Providencia coinciden con lo reportado para ambientes arrecifales del Caribe, lo que respalda su utilidad como indicadores ambientales en este contexto. Por ejemplo, entre los géneros dominantes en Providencia se encuentran las formas porcelanáceas *Quinqueloculina*, *Spiroloculina* o *Miliolinella*. También destaca la especie hialina *R. rosea*, o los géneros con algas simbioses *Archaias* y *Amphistegina*, que son elementos comunes en Serranilla y Albuquerque (**Triffleman et al.**, 1991; **Patarroyo et al.**, 2024). En contraste, la proporción de *Amphistegina* y *Archaias* se ha reportado como baja (<10 % de la asociación total) en Roncador y Serrana (**Sánchez et al.**, 2019), y especies encontradas en baja proporción en Providencia, como *A. beccarii*, *Hauerina diversa* o *N. atlantica*, aunque típicas de ambientes marinos someros (**Murray**, 1991, 2006), representarían los primeros registros en el archipiélago.

En general, *Amphistegina* y *Archaias* son característicos de aguas superficiales, a menudo adheridos a pastos marinos y bioclastos (**Culver & Buzas**, 1982; **Martin**, 1986; **Hallock et al.**, 1986). Sin embargo, debido a su morfología discoidal, pueden ser fácilmente movilizados de nuevo por eventos de alta energía que alteran la composición original de la tanatocenosis (**Li & Jones**, 1997; **Li et al.**, 1998; **Wilson**, 2006). Se ha propuesto que la abundancia de *Ar. angulatus* se ha sobrestimado en los sedimentos estudiados en Serranilla y Albuquerque dada las evidencias de daño en sus conchillas (abrasión, fragmentación, microperforaciones), causado ya sea por la dinámica del oleaje o la bioerosión (**Trifflemann et al.**, 1991, 1992; **Patarroyo et al.**, 2024). En contraste, la proporción de conchillas fragmentadas fue generalmente baja en las muestras de Providencia (<10 % de la asociación total, predominantemente especímenes de *Ar. angulatus*), lo que sugiere una baja energía en el lecho donde fueron recolectadas. Cabe resaltar que el muestreo de este estudio fue efectuado meses antes del paso del huracán Iota por la isla (noviembre de 2020), evento que ocasionó afectaciones significativas en el litoral costero y las zonas de manglar (**Instituto Humboldt**, 2021; **Comisión Colombiana del Océano-CCO**, 2024). Si bien la valoración preliminar de las comunidades coralinas sugiere afectaciones moderadas tras el paso del huracán (**Gómez et al.**, 2022; **CCO**, 2024), deben hacerse nuevos estudios que evalúen la respuesta de las asociaciones de foraminíferos desde el 2020.

Otras especies de foraminíferos que presentan algas simbioses, como *As. carinata*, *Heterostegina depressa*, y *Borelis pulchra*, registraron abundancias bajas a moderadas en Providencia (5-10 % de la asociación total), al igual que los géneros *Laevipeneroplis*, *Peneroplis* y *Sorites*. Estos taxones también se han identificado en Serranilla y Albuquerque

(Triffleman *et al.*, 1991; Patarroyo *et al.*, 2024). En Roncador y Serrana, en cambio, la proporción de estos taxones es baja, con excepción de *Laevipeneroplis* (Sánchez *et al.*, 2019), que, según algunos estudios, prefiere ambientes de moderada energía (Culver, 1990). La presencia común del género *Quinqueloculina* es una característica que comparten todos los cuerpos insulares analizados en el archipiélago, resultado esperable, ya que este género y otros miliólidos como *Spiroloculina* o *Miliolinella* son elementos característicos en las plataformas carbonatadas del Caribe, independientemente de las condiciones de energía en los sedimentos de fondo (Lidz & Rose, 1989; Havach & Collins, 1997; Gischler *et al.*, 2003). Entre las formas hialinas que no presentan algas simbiotes, la especie más representativa en Providencia fue *R. rosea*. Este taxón es común en los arrecifes del Caribe (Wilson & Ramsook, 2007; Gischler & Möder, 2009); en un ejemplo de sinonimia se ha identificado en Albuquerque (Patarroyo *et al.*, 2024) así, en Serranilla como *Discorbis rosea* (Triffleman *et al.*, 1991) y probablemente como *Discorbis* sp. en Roncador y Serrana (Sánchez *et al.*, 2019). Por último, aunque en el estudio de Sánchez *et al.* (2019) no se reconocieron taxones de conchillas aglutinantes en las muestras puntuales de las lagunas arrecifales de esos dos cayos, *Bigenerina* y *Textularia* parecen ser los géneros aglutinantes más comunes en las muestras de Providencia, así como en el material estudiado en Serranilla y Albuquerque (Triffleman *et al.*, 1991; Patarroyo *et al.*, 2024).

Si bien la mayoría de las asociaciones descritas en Providencia también estuvieron presentes en las muestras del arrecife de Varadero, la abundancia de algunos taxones y la presencia puntual de algunos géneros (*Buliminella*, *Cornuspira*, *Globocassidulina*, *Nodosaria*) y especies como *A. tepida*, *R. floridana*, y *Textularia agglutinans* en esta última, sugieren diferencias significativas entre ambas localidades.

La Figura 6 es un gráfico de ordenación no paramétrica (*non-metric multidimensional scaling*, NMDS) que indica cómo los dos grupos de muestras de Providencia (G1-G2, arrecife norte y litoral costero) se segregaron del grupo de muestras analizadas en Varadero (G3), lo que se vio respaldado por el análisis PERMANOVA, el cual evidenció una separación entre los grupos de muestras de Providencia y Varadero. Por ejemplo, el valor de p (con corrección de Bonferroni) de los grupos G1 y G2 fue de 0,1026, en contraste con los valores de 0,0012 y 0,0051 evidentes al comparar G1 y G2 con G3 (Figura 6). El valor de p en estos casos fue menor a 0,05, lo que refleja una separación plausible entre los grupos de muestras de Providencia y Varadero.

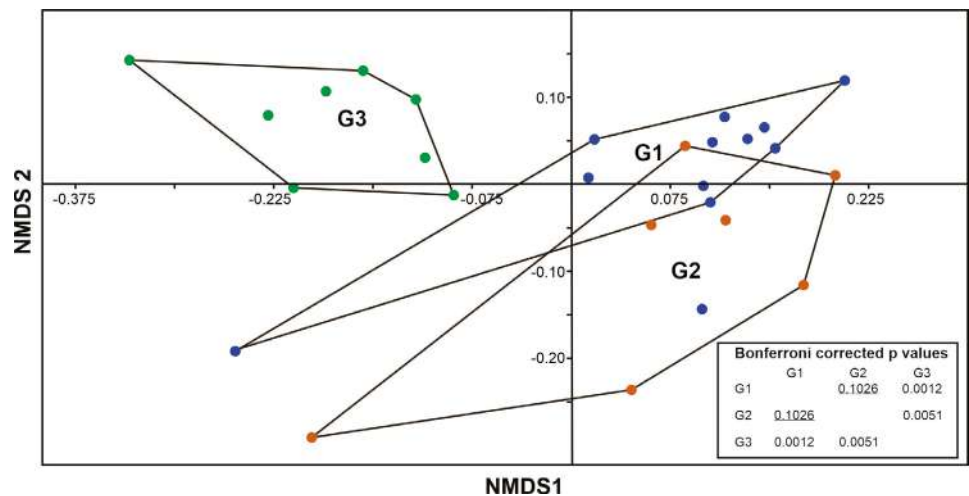


Figura 6. Gráfico de ordenación no paramétrica (NMDS) y prueba PERMANOVA de las asociaciones de foraminíferos de Providencia y Varadero. Las muestras se agruparon en tres grupos principales: Providencia (arrecife norte; G1), Providencia (litoral costero; G2) y Varadero (G3).

Una de las principales diferencias en las asociaciones de foraminíferos de Providencia y Varadero fue la proporciones de *Ar. angulatus* y *Am. gibbosa*. La primera fue siempre abundante (~20 % de la asociación total) en el material de Providencia, con abundancias significativas (>10 % de la asociación total) solamente en las muestras VAR-2 y VAR-3. En contraste, *Amphistegina* se caracterizó por ser el género dominante en las asociaciones con algas simbiotes de Varadero. En el litoral Caribe *Am. gibbosa* es característica de la plataforma interna a media (5-50 m de profundidad) (Havach & Collins, 1997; Gischler & Möder, 2009; Wilson & Carvajal-Chitty, 2021), siendo una especie ampliamente documentada en la bahía de Cartagena y en el Parque Nacional Natural Corales del Rosario y de San Bernardo (PNN-IR) (Parada-Ruffinatti & Londoño de Hoyos, 1983; Parada-Ruffinatti & Pinto, 1986; Bernal *et al.*, 2005; Velásquez *et al.*, 2011; Rodríguez *et al.*, 2023). Otra especie con algas simbiotes y de mayor recurrencia en el arrecife de Varadero fue *H. depressa*. Según diversos estudios, esta especie al parecer no depende tanto de una alta incidencia de la luz en las masas de agua, como sí ocurre con *Ar. angulatus* y el género *Amphistegina* (Nobes *et al.*, 2008; Uthicke & Nobes, 2008; Eder *et al.*, 2016).

Otra diferencia significativa en el material de Varadero es la ausencia de *R. rosea*, una especie recurrente en el archipiélago de San Andrés. Según algunos autores, esta especie podría estar sobrestimada en la tanatocenosis debido a su forma discoidal y a su mayor resistencia a la abrasión (Brasier, 1975; Rose & Lidz, 1977). En contraste, *R. floridana*, un taxón adaptado a condiciones de mayor energía en las zonas de parches arrecifales que usualmente se adhiere al pasto marino (Langer, 1993; Gischler & Möder, 2009), fue un elemento común (>3 % de la asociación total) en las muestras de Varadero. Otros taxones encontrados únicamente en esta zona correspondieron a los géneros calcáreos *Bolivina*, *Buliminella*, *Globocassidulina*, *Lagena* y *Nodosaria*, géneros comunes en las zonas de plataforma y talud (Murray, 1991, 2006) cuya presencia se ha documentado a lo largo del litoral Caribe colombiano (Parada-Ruffinatti & Londoño de Hoyos, 1983; Parada-Ruffinatti & Pinto, 1986; Bernal *et al.*, 2005; Fiorini, 2015; Rodríguez *et al.*, 2023; Barragán & Bernal, 2024). Los miliólidos también son más diversos en Varadero, donde, además de la presencia común de los géneros *Quinqueloculina*, *Miliolinella* y *Spiroloculina*, se hallaron igualmente especímenes de *Cornuspira*, *Massilina* y *Pseudotriloculina*. Estas diferencias en la composición de las asociaciones explican los valores más altos de riqueza y diversidad observados en las muestras del arrecife de Varadero comparados con los estimados en el material de Providencia.

Estimaciones del índice FORAM en el Caribe colombiano

Teniendo en cuenta las proporciones de los foraminíferos con algas simbiotes en Providencia y Varadero, y las observaciones metodológicas recientemente propuestas por Prazeres *et al.* (2020), se estimó el índice FORAM (IF) (Figura 7) para hacer una valoración ambiental de sus entornos arrecifales. En dicha valoración se consideraron las estimaciones del IF previamente realizadas en el archipiélago de San Andrés (Sánchez *et al.*, 2019; Patarroyo *et al.*, 2024) y en el litoral Caribe colombiano (Velásquez *et al.*, 2011; Rodríguez *et al.*, 2023).

Las estimaciones del IF en la isla de Providencia estuvieron, en general, entre 4 y 6, con valores significativamente altos (IF>6) en muestras puntuales del arrecife norte (PS5 y PS6) y del litoral costero (PS14, PS17 y PS18). En contraste, se obtuvieron valores de IF<4 en las muestras PS2, PS13 y PS15 (Figura 7). Todos los valores registrados concuerdan con las estimaciones previas (IF 3-8,4) reportadas por Patarroyo *et al.* (2024), quienes emplearon una taxonomía preliminar durante la fase de campo en el 2019. Las estimaciones del IF en Providencia sugieren condiciones moderadas de estrés ambiental (Hallock *et al.*, 2003; Prazeres *et al.*, 2020) en la mayoría de las zonas estudiadas. La distribución de los valores del IF indica condiciones más estables para los ambientes del arrecife norte, mientras que el material del litoral refleja condiciones ambientales más heterogéneas, asociadas con una mayor influencia antrópica (por ejemplo, la polución marina), la variabilidad en el tipo de sustrato, incluidos los lechos rocosos, y niveles con

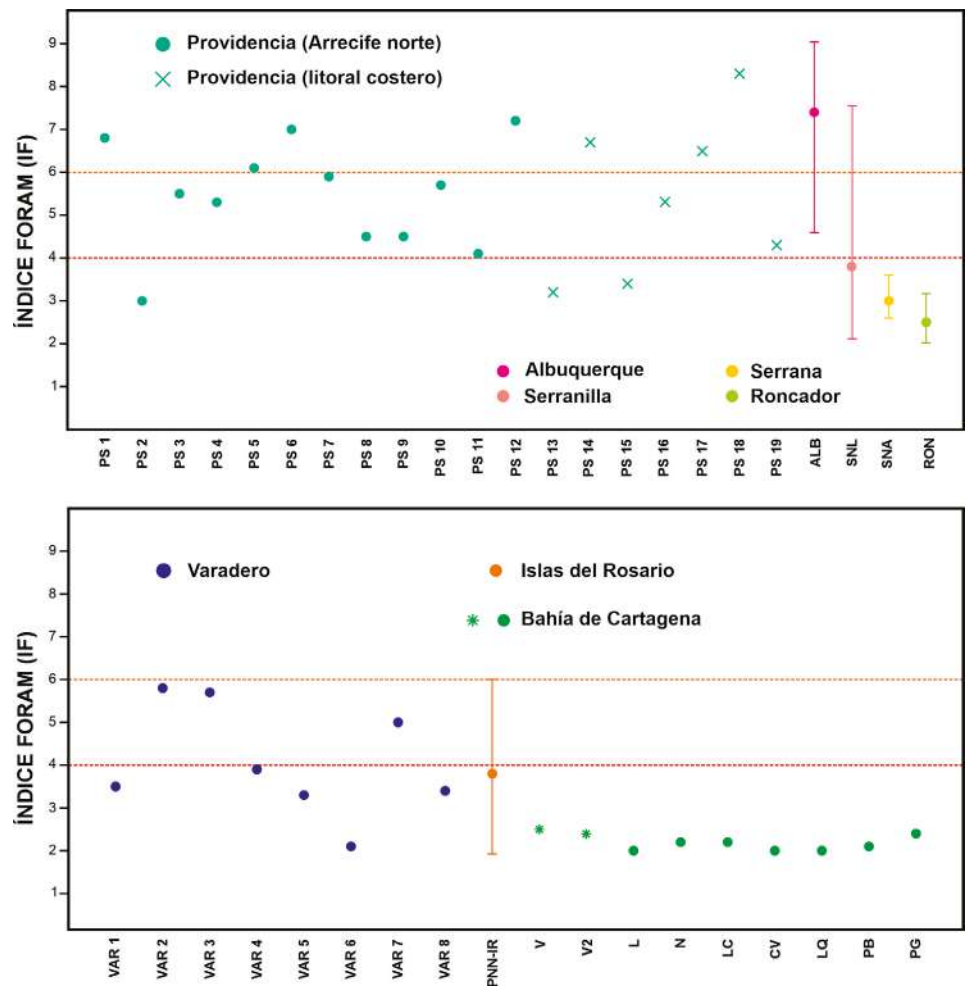


Figura 7. Estimaciones del índice FORAM (IF) en la isla de Providencia y el arrecife de Varadero. Los valores del IF por debajo de 4 indican un crecimiento marginal de arrecifes o su deterioro avanzado. **Topo.** Se indican las estimaciones del IF promedio obtenidas en otros cuerpos insulares del archipiélago de San Andrés: Albuquerque (ALB), Serranilla (SNL), Roncador (RON) y Serrana (SNA) (Sánchez et al., 2019; Patarroyo et al., 2024). **Base.** Se indican las estimaciones propuestas del IF en el Parque Nacional Natural Islas del Rosario (PNN-IR) (Velásquez et al., 2011) y la bahía de Cartagena (Rodríguez et al., 2023). Las muestras V y V2 fueron recolectadas en la parte sur del arrecife de Varadero.

mayores concentraciones de materia orgánica. Esto explicaría la presencia relativamente frecuente de taxones indicadores de estrés, como *Ammonia*, *Elphidium* o *Clavulina*, en localidades expuestas a una mayor descarga fluvial y a intervenciones antrópicas como dragados o remoción de zonas de manglar, por ejemplo en las cercanías de Smooth Water Bay (muestras PS15) y en el canal que separa Providencia y Santa Catalina (muestras PS13 y PS12).

En general, la evolución ecológica de los ambientes arrecifales de Providencia se ha documentado a través del monitoreo de sus comunidades coralinas (Geister, 1986; 1992; Geister & Díaz, 2007; CCO, 2024), el cual ha revelado la disminución paulatina de la población de varias especies de coral y de la cobertura coralina, fenómeno que también se ha reportado en otras zonas del Caribe. Recientemente, Puyana et al. (2015) evaluaron el papel que pueden desempeñar las floraciones de cianobacterias en la salud de las comunidades coralinas de la isla, y reportaron una alta prevalencia de cianobacterias

(planctónicas y bentónicas) en Providencia, lo que constituye un nuevo factor de estrés ambiental que deberá explorarse en estudios futuros. Cabe resaltar que dicho estudio no incluyó la evaluación de las comunidades de cianobacterias en la parte norte del arrecife, por lo que se recomienda el monitoreo ecológico de dichas regiones a través de la valoración conjunta de las poblaciones de cianobacterias y de foraminíferos bentónicos.

Los valores del IF en Providencia contrastaron con los reportados en otras regiones del archipiélago de San Andrés (**Figura 7**). Dichos valores fueron particularmente bajos en Roncador (IF 2-3,1) y Serrana (IF 2,6-3,7), lo que se atribuye a la presencia relativamente frecuente de los géneros oportunistas *Bolivina*, *Clavulina* y *Elphidium*. Estos resultados fueron validados por el estudio de la cobertera coralina y de las asociaciones de erizos. La información obtenida en ambas islas sugiere un deterioro gradual en las últimas décadas de las comunidades arrecifales de esta parte del archipiélago (**Sánchez et al.**, 2019). En contraste, en Albuquerque las estimaciones del IF fueron similares a las de Providencia (IF 4,7-9,8), lo que sugiere condiciones favorables para el desarrollo de las comunidades coralinas. Dichos valores se explican por el predominio de los géneros indicadores *Archaias* o *Amphistegina*, y la baja proporción (<5 % de la asociación total) de los taxones indicadores de estrés *Clavulina*, *Criboelphidium* y *Elphidium* (**Patarroyo et al.**, 2024). Cabe mencionar que, por lo menos parcialmente, las condiciones ambientales de Albuquerque no necesariamente estarían siendo reflejadas por el IF, ya que las estimaciones del IF > 6,5 podrían corresponder a sobrestimaciones causadas por la nueva movilización del material recolectado debida a una mayor dinámica del fondo. Este caso podría ser más relevante en las estimaciones propuestas para Serranilla (IF 2,1-7,4) y en otros bancos submarinos de la parte norte de la plataforma de Nicaragua, donde estudios granulométricos y geomorfológicos indican una mayor exposición a las corrientes oceánicas y un colapso paulatino de estas plataformas carbonatadas (**Triffemann et al.**, 1992; **Peebles et al.**, 1997; **Patarroyo et al.**, 2024).

En conclusión, una valoración exitosa del IF en el archipiélago de San Andrés requerirá de nuevas campañas de muestreo en los cuerpos insulares restantes como San Andrés, Quitasueño, o Courtown, los cuales presentan distintos grados de afectación ambiental. Asimismo, se recomienda establecer un monitoreo periódico de los lugares donde ya se dispone de información de las asociaciones de foraminíferos. Esto resulta especialmente relevante si se considera que gran parte del material analizado en el archipiélago fue complemento de diversas actividades de investigación (cobertura coralina, monitoreo de tiburones, polución, análisis granulométricos). Recientemente, **Prazeres et al.** (2020) propusieron una serie de recomendaciones adicionales (metodologías, insumos) a la propuesta original de **Hallock et al.** (2003) para optimizar la información obtenida mediante el IF.

Así como las asociaciones de foraminíferos descritas en Varadero presentan diferencias en su composición con respecto al material de Providencia, las estimaciones del IF también reflejan diferencias claras entre ambas localidades. En general, los valores del IF en Varadero (IF 2,1-5,7) (**Figura 7**) sugieren condiciones de estrés ambiental en las comunidades coralinas, lo cual se ve respaldado por una mayor recurrencia de taxones oportunistas como *Ammonia*, *Clavulina* y *Elphidium* y, principalmente, la especie *C. poeyanum*, documentados previamente en la bahía de Cartagena y áreas circundantes (**Parada-Ruffinatti & Londoño de Hoyos**, 1983; **Parada-Ruffinatti & Pinto**, 1986; **Velásquez et al.**, 2011; **Rodríguez et al.**, 2023). Aunque se trató de un sondeo exploratorio, las muestras de la parte norte del arrecife (muestras VAR-2 y VAR-3) sugieren condiciones ambientales menos estresantes que las de la parte sur (muestras VAR-4 a VAR-8), con estimaciones similares a las efectuadas por **Rodríguez et al.** (2023) en la parte más al sur del arrecife (muestras V y V2) y el sector de Barú (IF < 2,5). Asimismo, las estimaciones del IF en Varadero se ubicaron en los rangos reportados por **Velásquez et al.** (2011) en el PNN-IR (IF 2-6) (**Figura 7**), correspondientes al primer sondeo del índice en el Caribe colombiano. En ese estudio se valoró el IF en 14 localidades situadas dentro de dos áreas marinas protegidas (PNN-IR, Parque Nacional Natural Tayrona) o en sus cercanías. De forma sorpresiva, los valores del IF fueron más altos en las localidades situadas fuera

de las zonas protegidas. Se propuso que la mayor presión en los ecosistemas debido a las actividades turísticas y la presencia cercana de áreas densamente pobladas habrían condicionado tales resultados.

Es evidente que el factor de origen antrópico tiene un papel determinante en la salud de los entornos arrecifales de Varadero debido a la alta descarga de material silicoclástico asociado al canal del Dique (Restrepo *et al.*, 2006; Pizarro *et al.*, 2017; Manrique-Rodríguez *et al.*, 2019; Rodríguez *et al.*, 2023). Otros impactos significativos están ligados a las continuas actividades de dragado en el área y a la contaminación por metales pesados, cuyos valores exceden los estándares internacionales (Romero-Murillo *et al.*, 2023). A pesar del poco conocimiento que se tiene de las asociaciones de foraminíferos en la región de Varadero, los resultados obtenidos parecen reflejar apropiadamente el estado de salud en el que se encuentran hoy las comunidades coralinas. La realización de nuevos sondeos en el arrecife, incluidos transectos en distintos rangos batimétricos, así como el análisis de asociaciones vivas y su variabilidad genética, permitirán entender las principales características de los foraminíferos bentónicos de esta zona. Asimismo, la estimación del IF a partir de los sondeos ya realizados (Parada-Ruffinatti & Londoño de Hoyos, 1983; Parada-Ruffinatti & Pinto, 1986; Bernal *et al.*, 2005), podría contribuir a calibrar tales estimaciones en el litoral colombiano y a evaluar la progresión temporal del deterioro de los ambientes arrecifales de esta zona con una óptica diferente. En otras regiones del Caribe y del Pacífico, el índice IF se ha estimado no solo en términos espaciales, sino también con un enfoque temporal (Hallock *et al.*, 2003; Carnahan *et al.*, 2009; Carilli & Walsh, 2012). Por otra parte, el estudio de las asociaciones de foraminíferos en núcleos sedimentarios ha permitido determinar transformaciones ambientales en ambientes costeros de Brasil, Panamá y La Florida ocurridas en las últimas décadas y siglos (Cockey *et al.*, 1996; Almeida *et al.*, 2013; Gudnitz *et al.*, 2021; Gudnitz & Collins, 2024; Arellano-Torres *et al.*, 2024). El resiliente arrecife de Varadero, que representa un vestigio de las estructuras coralinas que se extendían por el litoral antes de la llegada de los europeos, constituye un valioso archivo natural que permite documentar la transformación ambiental que ha sufrido la bahía de Cartagena, especialmente desde la configuración del canal del Dique.

Conclusiones

Se evaluaron las asociaciones de foraminíferos de dos ambientes arrecifales del Caribe colombiano: la isla de Providencia (archipiélago de San Andrés) y Varadero (bahía de Cartagena). En las dos localidades las asociaciones presentaron elementos característicos de estos ambientes, con la presencia común de taxones con algas simbioses como *Archaias*, *Amphistegina*, *Asterigerina* o *Heterostegina*, miliólidos (*Quinqueloculina*, *Spiroloculina* y *Triloculina*) y taxones heterótrofos como *Cymbaloporetta*, *Eponides* y *Rotorbinaella*, entre otros. En proporciones variables, también se identificaron formas oportunistas como *Clavulina*, *Ammonia* o *Criboelphidium*. A pesar de su aparente similitud, las proporciones de algunos de estos taxones difieren en las dos localidades, lo que podría atribuirse a los distintos grados de impacto ambiental que presentan sus ecosistemas. En el caso de Providencia, las estimaciones del índice FORAM (IF) sugieren condiciones de estrés ambiental moderadas a bajas, con valores similares a los reportados recientemente en otras partes del archipiélago. En contraste, en Varadero los valores del IF indican condiciones de estrés ambiental moderado a alto, en concordancia con estimaciones previas en el área. Estos resultados nutren la evidencia de la intensa presión ecosistémica ejercida por la actividad antrópica en la bahía de Cartagena, asociada principalmente al aporte de material silicoclástico y a la contaminación marina. Por ello, el uso de los foraminíferos bentónicos como bioindicadores en ambientes arrecifales representa una herramienta con gran potencial para la valoración ambiental del litoral Caribe colombiano.

Información suplementaria

Ver la tabla 1S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3145/4596> y la tabla 2S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3145/4597>

Agradecimientos

Un especial agradecimiento a todos los profesionales y a la comunidad local que brindaron apoyo logístico y metodológico en la fase de campo de la Expedición Seaflower 2019. Un sentido agradecimiento a Rafael Bortolin[†], quien generosamente nos suministró parte del material analizado en Providencia y nos ofreció las muestras de sedimento obtenidas durante el Cartagena Reef Check 2019, y a Phanor Montoya (Corales de Paz) por la información adicional sobre las actividades llevadas a cabo durante dicha campaña. A la Universidad Industrial de Santander y Stratos Consultoría Geológica por el apoyo logístico adicional. A Pamela Hallock (University of South Florida) por la información para la correcta estimación del índice FORAM en el material que se viene estudiando en el Caribe colombiano. A los dos revisores por sus valiosos aportes, comentarios y sugerencias para mejorar el manuscrito.

Contribución de los autores

GDP: caracterización taxonómica de las asociaciones de foraminíferos y análisis composicionales; **GDP, GAT, JMT y RB:** recolección del material en Providencia; **RB:** recolección del material en el arrecife de Varadero; **DFG:** preparación en el laboratorio del material recolectado en Providencia y Varadero; **GAT:** edición de las láminas fotográficas.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no hay ningún conflicto de intereses.

Referencias

- Almeida, C.M., Fernandes-Barbosa, C.F., Cordeiro, R.C., Seoane, J.C.S., Fermino, G.M., Silva, P.O., Turcq, B.J.** (2013). Palaeoecology of a 3-kyr biosedimentary record of a coral reef-supporting carbonate shelf. *Continental Shelf Research*, 70, 168-176.
- Arellano-Torres, E., Correa-Metrio, A., Rutiaga-Ramírez, J. M., Escobar, J., & Castañeda-Posadas C.** (2024). Holocene benthic foraminifera ecological succession in the Panamanian Caribbean. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 655, 112536.
- Barbosa, C., Prazeres, M., Ferreira, B., Sicoli, J.C.** (2009). Foraminiferal assemblage and reef check census in coral reef health monitoring of East Brazilian margin. *Marine Micropaleontology*, 73(1-2), 62-69.
- Barragan, C. & Bernal, G.** (2024). Benthic foraminifera as bioindicators of gas seep intensity in the offshore zone of the Sinú fold belt. *Journal of South American Earth Sciences*, 148, 105103.
- Bernal, G., Agudelo, A., López, S., Domínguez, J.** (2005). Textura, composición y foraminíferos bentónicos de los sedimentos superficiales en los Bancos de Salmedina, Caribe Colombiano. *Boletín Científico CCCP*, 12, 95-112.
- Bernal, G., Ruiz-Ochoa, M., Piedrahita, M.T., Restrepo, E.** (2008). Foraminíferos en los sedimentos superficiales del sistema lagunar de Cispatá y la interacción Río Sinú-Mar Caribe Colombiano. *Boletín de las Ciencias de la Tierra*, 23, 5-20.
- Bolli, H.M., Beckmann, J.P., Saunders, J.B.** (1994). *Benthic Foraminiferal biostratigraphy of the South Caribbean region*. Cambridge University Press.
- Brasier, M.D.** (1975). The ecology and distribution of recent foraminifera from the reefs and shoals around Barbuda, West Indies. *Journal of Foraminiferal Research*, 5, 193-210.
- Carilli, J. & Walsh, S.** (2012). Benthic foraminiferal assemblages from Kiritimati (Christmas) Island indicate human-mediated eutrophication has occurred over the scale of decades. *Marine Ecology Progress Series*, 456, 87-99.
- Carnahan, E.A., Hoare, A.M., Hallock, P., Lidz, B.H., Reich, C.D.** (2009). Foraminiferal assemblages in Biscayne Bay, Florida, USA: Responses to urban and agricultural influence in a subtropical estuary. *Marine Pollution Bulletin*, 59, 221-233.
- Carvajal-Chitty, H.I. & Navarro, S.** (2021). Preliminary foraminiferal survey in Chichiriviche de La Costa, Vargas, Venezuela. *Revista Brasileira de Paleontologia*, 24(2), 90-103.
- Comisión Colombiana del Océano-CCO.** (2024). *Boletín Expedición Científica Seaflower 2021-I Old Providence y Santa Catalina*. Puntoaparte Editores.
- Cockey, E., Hallock, P., Lidz, B.H.** (1996). Decadal-scale changes in benthic foraminiferal assemblages off Key Largo, Florida. *Coral Reefs*, 15, 237-248.

- CORALINA-INVEMAR.** (2012). *Atlas de la Reserva de Biósfera Seaflower. Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina*. Serie de Publicaciones Especiales de INVEMAR.
- Culver, S.J.** (1990). Benthic foraminifera of Puerto Rican mangrove-lagoon systems: potential for paleoenvironmental interpretations. *Palaios*, 5, 34-51.
- Culver, S.J. & Buzas, M.A.** (1995). The effects of anthropogenic habitat disturbance, habitat destruction, and global warming on shallow marine benthic foraminifera. *Journal of Foraminiferal Research*, 25(3), 204-211.
- Díaz, J.M., Barrios, L.M., Cendales, M.H., Garzón-Ferreira, J., Geister, J., López-Victoria, M., Ospina, G.H., Parra-Velandia, F., Pinzón, J., Vargas-Ángel, B., Zapata, F., Zea, S.** (2000). *Áreas coralinas de Colombia*. Serie de Publicaciones Especiales de INVEMAR.
- Dimiza, M.D., Triantaphyllou, M.V., Koukousioura, O., Hallock, P., Simboura, N., Karageorgis, A.P., Papathanasiou, E.** (2016). The Foram Stress Index: A new tool for environmental assessment of soft-bottom environments using benthic foraminifera. A case study from the Saronikos Gulf, Greece, Eastern Mediterranean. *Ecological Indicators*, 60, 611-621.
- Doo, S.S., Fujita, K., Byrne, M., Uthicke, S.** (2014). Fate of calcifying tropical symbiont-bearing large benthic foraminifera: Living sands in a changing ocean. *The Biological Bulletin*, 226(3), 169-186.
- Duque-Castaño, M., Trejos-Tamayo, R., Osorio-Tabares, L.C., Angulo-Pardo, E., Vallejo, F., Plata, A., Pardo-Trujillo, A.** (2023). Lower to Middle Miocene multiproxy biostratigraphy of the P-18 core-stratigraphic well in Sinú-San Jacinto Basin, Caribbean region of Colombia. *Journal of South American Earth Sciences*, 123, 104228.
- Duque-Caro, H.** (1975). Los foraminíferos planctónicos y el Terciario de Colombia. *Revista Española de Micropaleontología*, 7(3), 403-427.
- Duque-Caro, H.** (1990). The Chocó block in the northwestern corner of South America: Structural, tectonostratigraphic, and paleogeographic implications. *Journal of South American Earth Sciences*, 3(1), 71-84.
- Durán-Gómez, J.E., Patarroyo, G.D., Torres-Parada, J.M.** (2023). Miocene Fossils of Old Providence Island (Western Caribbean, Colombia) and geological heritage of the Seaflower Biosphere Reserve. *Caribbean Journal of Science*, 53(2), 210-221.
- Eder, W., Briguglio, A., Hohenecker, J.** (2016). Growth of *Heterostegina depressa* under natural and laboratory conditions. *Marine Micropaleontology*, 122, 27-43.
- Fatela, F. & Taborda, R.** (2002). Confidence limits of species proportions in microfossil assemblages. *Marine Micropaleontology*, 45, 169-174.
- Fiorini, F.** (2015). Recent benthic foraminifera from the Caribbean continental slope and shelf off west of Colombia. *Journal of South American Earth Sciences*, 60, 117-128.
- Fiorini, F. & Jaramillo, C.** (2007). Paleoenvironmental reconstruction of the Oligocene- Miocene deposits of southern Caribbean (Carmen de Bolívar, Colombia) based on benthic foraminifera. *Boletín de Geología*, 29(2), 47-55.
- Forcino, F.L.** (2012). Multivariate assessment of the required sample size for community paleoecological research. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 315-316, 134-141.
- Geister, J.** (1986). Recent Coral Reefs and geology history of Providencia Island (Western Caribbean Sea, Colombia). *Geología Colombiana*, 15, 115-134.
- Geister, J.** (1992). Modern reef development and Cenozoic evolution of an oceanic island/reef complex: Isla de Providencia (Western Caribbean Sea, Colombia). *Facies*, 27, 1-70.
- Geister, J. & Díaz, J.M.** (2007). *Reef Environments and Geology of an Oceanic Archipelago: San Andrés, Old Providence and Santa Catalina (Caribbean Sea, Colombia) with field guide*. INGEOMINAS Special Publication.
- Gischler, E., Hauser, I., Heinrich, K., Scheitel, U.** (2003). Characterization of depositional environments in isolated carbonate platforms based on benthic foraminifera, Belize, Central America. *Palaios*, 18, 236-255.
- Gischler, E. & Möder, A.**, 2009. Modern benthic foraminifera on Banco Chinchorro, Quintana Roo, Mexico. *Facies*, 55, 27-35.
- Gómez C., Millán, S., Acosta-Chaparro, A., Abril-Howard, A., Navas-Camacho, R.** (2022). Evaluación preliminar del impacto del huracán Iota en arrecifes coralinos de las islas de Providencia y Santa Catalina. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 51(1), 193-200.
- Gudnitz, M.N., Collins, L.S., O’Dea, A.** (2021). Foraminiferal communities of a mid-Holocene reef: Isla Colón, Caribbean Panama. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 562, 110042.

- Gudnitz, M.N. & Collins, L.S.** (2024). Using foraminifera to assess changes in marine coastal habitats of Caribbean Panama since the Middle Holocene. *Marine Micropaleontology*, 192, 102408.
- Hallock, P., Cottey, T.L., Forward, L. B., Halas, J.** (1986). Population dynamics and sediment production by *Archaias angulatus* (Foraminiferida) in Largo Sound, FL. *Journal of Foraminiferal Research*, 16, 1-18.
- Hallock, P., Lidz, B.H., Cockey-Burkhard, E.M., Donnelly, K.B.** (2003). Foraminifera as bioindicators in coral reef assessment and monitoring: the FORAM index. En Melzian, B.D., Engle, V., McAlister, M., Sandhu, S., Eads, L.K. (Eds.) *Coastal Monitoring through Partnerships* (221-238). Springer.
- Hammer, O., Harper, D.A.T., & Ryan, P.D.** (2001). PAST: paleontological statistics software package for education and data analysis: *Palaeontologia Electronica*, 4(1), 1-9.
- Havach, S.M. & Collins, L.S.** (1997). The distribution of recent benthic foraminifera across habitats of Bocas Del Toro, Caribbean Panama: *Journal for Foraminiferal Research*, 27, 232-249.
- Humphreys, A.F., Halfar, J., Ingle, J.C., Manzello, D., Reymond, C.E., Westphal, H., Riegl, B.** (2018). Effect of seawater temperature, Ph, and nutrients on the distribution and character of low abundance shallow water benthic foraminifera in the Galapagos. *PLoS One*, 13, e0202746.
- Instituto Humboldt.** (2021). *Expedición Cangrejo Negro. Isla de Providencia 17 al 24 de enero de 2021*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Langer, M.R.** (1993). Epiphytic foraminifera. *Marine Micropaleontology*, 20(3-4), 235-265.
- Li, C. & Jones, B.** (1997). Comparison of foraminiferal assemblages in sediments on the windward and leeward shelves of Grand Cayman, British West Indies. *Palaaios*, 12, 12-26.
- Li, C., Jones, B., Kalbfleisch, W.B.** (1998). Carbonate sediment transport pathways based on foraminifera: case study from Frank Sound, Grand Cayman, British West Indies. *Sedimentology*, 45, 109-120.
- Lidz, B.H. & Rose, P.R.** (1989). Diagnostic Foraminiferal Assemblages of Florida Bay and Adjacent Shallow Waters: A Comparison. *Bulletin of Marine Science*, 44(1), 399-418.
- Lintner, M., Schagerl, M., Lintner, B., Nagy, M., Heinz, P.** (2022). Photosynthetic performance of symbiont-bearing foraminifera *Heterostegina depressa* affected by sunscreens. *Scientific Reports*, 12, 2750.
- Manrique-Rodríguez, N., Agudelo, C., Sanjuan-Muñoz, A.** (2019). Comunidad de octocorales gorgonáceos del arrecife de coral de Varadero en el Caribe colombiano: diversidad y distribución espacial. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 48(1), 55-64.
- Martin, R.E.** (1986). Habitat and distribution of the foraminifer *Archaias angulatus* (Fichtel and Moll) (Miliolina, Soritidae), northern Florida Keys. *Journal of Foraminiferal Research*, 16, 201-206.
- Molinares, C.E., Martínez, J.I., Fiorini, F., Escobar, J., Jaramillo, C.** (2012). Paleoenvironmental reconstruction for the lower Pliocene Arroyo Piedras section (Tubará – Colombia): Implications for the Magdalena River – paleodelta’s dynamic. *Journal of South American Earth Sciences*, 39, 170-183.
- Ortiz-Moreno, M.L. & Acosta, N.** (2003). Inferencia de las condiciones ambientales de la playa “Pilón de azúcar” (Guajira, Colombia), a partir del conjunto de foraminíferos en una muestra de sedimento. *Acta Biológica Colombiana*, 8(2), 13-22.
- Murray, J.W.** (1991). *Ecology and Paleoecology of Benthic Foraminifera*. Longman.
- Murray, J.W.** (2006). *Ecology and Applications of Benthic Foraminifera*. Cambridge University Press.
- Nobes, K. Uthicke, S., Henderson, R.** (2008). Is light limiting factor for the distribution of benthic symbiont bearing foraminifera on the Great Barrier Reef? *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 363, 48-57.
- Parada-Ruffinatti, C.** 1996. *Foraminíferos del Pleistoceno – Holoceno del Caribe Colombiano*. Editora Guadalupe.
- Parada-Ruffinatti, C. & Londoño de Hoyos, C.** (1983). *Foraminíferos bentónicos recientes del Norte de Cartagena*. Editora Guadalupe.
- Parada-Ruffinatti, C. & Pinto, J.** (1986). *Foraminíferos bentónicos recientes de la Isla Barú*. FEN Colombia.
- Patarroyo, G., Torres, G., Gómez, D.** (2024). Foraminiferal assemblages as bioindicators In the Western Caribbean: Albuquerque Cay (Colombia). *Journal of Foraminiferal Research*, 54(1), 36-48.

- Peebles, M.W., Hallock, P., Hine, A.** (1997). Benthic foraminiferal assemblages from current-swept carbonate platforms of the Northern Nicaraguan Rise, Caribbean Sea. *Journal of Foraminiferal Research*, 27(1), 42-50.
- Petters, V. & Sarmiento, S.** (1956). Oligocene and Lower Miocene biostratigraphy of the Carmen-Zambrano area, Colombia. *Micropaleontology*, 2(1), 7-35.
- Pisapia, C., El Kateb, A., Hallock, P., Spezzaferri, P.** (2017). Assessing coral reef health in the North Ari Atoll (Maldives) using the FoRAM index. *Marine Micropaleontology*, 133, 50-57.
- Pizarro, V., Rodríguez, S.C., López-Victoria, M., Zapata, F.A., Zea, S., Galindo-Martínez, C.T., Iglesias-Prieto, R., Pollock, J., Medina, M.** (2017). Unraveling the structure and composition of Varadero Reef, an improbable and imperiled coral reef in the Colombian Caribbean. *PeerJ*, 5, e411.
- Prazeres, M., Martínez-Colon, M., Hallock, P.** (2020). Foraminifera as bioindicators of water quality: The FoRAM Index revisited. *Environmental Pollution*, 257, 113612.
- Puyana, M., Acosta, A., Bernal-Sotelo, K., Velásquez-Rodríguez, T., Ramos, F.** (2015) Spatial scale of cyanobacterial blooms in Old Providence Island, Colombian Caribbean. *Universitas Scientiarum*, 20(1), 83-105.
- Ramírez, L.F.** (2016). Marine protected areas in Colombia: advances in conservation and barriers for effective governance. *Ocean Coastal Management*, 125, 49-62.
- Restrepo, J.D., Zapata, P., Díaz, J.M., Garzón-Ferreira, J., García, C.B.** (2006). Fluvial fluxes into the Caribbean Sea and their impact on coastal ecosystems: the Magdalena River, Colombia. *Global and Planetary Change*, 50, 33-49.
- Rincón-Martínez, D.A., Arenas, J.E. Cuartas, C.H., Cárdenas, A.L., Molineras, C.E., Caicedo, C., Jaramillo C.** (2007). Eocene–Pliocene planktonic foraminifera biostratigraphy from the continental margin of the southwest Caribbean. *Stratigraphy*, 4, 261-311.
- Rodríguez, L., Acosta, A., González-Zapata, F.L., Gómez-Corrales, L., Marrugo, M., Alvarado-Ch., E.M., Dueñas, L.F., Andrade, J., Gutiérrez-Cala, L., Sánchez, J.A.** (2023). Conservation at the edge: connectivity and opportunities from non-protected coral reefs close to a national park in the Colombian Caribbean. *Biodiversity and conservation*, 32, 1493-1522.
- Romero-Murillo, P., Gallego, J.L., Leignel, V.** (2023). Marine pollution and advances in biomonitoring in Cartagena Bay in the Colombian Caribbean. *Toxics*, 11, 631.
- Rose, P.R. & Lidz, B.** (1977). Diagnostic foraminiferal assemblages of shallow-water modern environments: south Florida and the Bahamas. *Sedimenta*, 6, 1-55.
- Salazar-Ortiz, E.A., Rincón-Martínez, D., Páez, L.A., Restrepo, S.M., Barragán, S.** (2020). Middle Eocene mixed carbonate-siliciclastic systems in the southern Caribbean (NW Colombian margin). *Journal of South American Earth Sciences*, 99, 102507.
- Sánchez, J., Zea S., & Díaz, J.** (1998) Patterns of octocoral and black coral distribution in the oceanic barrier reef-complex of Old Providence island, southwestern. *Caribbean Journal of Science*, 34(3-4), 250- 264.
- Sánchez, J.A., Gómez-Corrales, M., Gutiérrez-Cala, L., Vergara, D.C., Roa, P., González-Zapata, F.L., Gnecco, M., Puerto, N., Neira, L., Sarmiento, A.** (2019). Steady Decline of Corals and Other Benthic Organisms in the Seaflower Biosphere Reserve (Southwestern Caribbean). *Frontiers in Marine Science*, 6, 416927. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00073>
- Schueth, J.D. & Frank, T.D.** (2008). Reef foraminifera as bioindicators of coral reef health: Low Isles Reef, Northern Great Barrier Reef, Australia. *Journal of Foraminiferal Research*, 38(1), 11-22.
- Sen Gupta, B.K.** (1999). *Modern Foraminifera*. Kluwer Academic Publishers.
- Stephenson, C.M., Hallock, P., & Kelmo, F.** (2015). Foraminiferal assemblage indices: A comparison of sediment and reef rubble samples from Conch Reef, Florida, USA. *Ecological Indicators*, 48, 1-7.
- Taylor, E., Baine, M., Killmer, A., Howard, M.** (2013). Seaflower marine protected area: governance for sustainable development. *Marine Policy*, 41, 57-64.
- Torres, G.A., Patarroyo, G.D., Veloza, G., Mora, J.A., Gómez, D.F.** (2022). Asociaciones de foraminíferos aglutinados de la Formación San Cayetano en el Cinturón Plegado de San Jacinto (Norte de Colombia). *Boletín de Geología*, 44(1), 75-92.
- Trejos-Tamayo, R., Garzón, D., Salazar-Ríos, A., Pardo-Trujillo, A., Flores, J. A.** (2024). Paleoambientes en la parte central del Cinturón Plegado de San Jacinto (Caribe colombiano) entre el Eoceno tardío y el Mioceno Temprano: Inferencias a partir de foraminíferos bentónicos. *Boletín de Geología*, 46(3), 169-191.

- Trejos-Tamayo, R., Garzón-Oyola, D., Rodríguez-Abaunza, A., Frontalini, F., Betancur, J. P., Gallego, F., Pardo-Trujillo, A., Flores, J.A.** (2025). Late Eocene-early Miocene paleoenvironmental shifts in the NW south American margin: Tectonic and climatic drivers inferred from benthic foraminifera. *Global and Planetary Change*, 104744.
- Triffleman, N.J., Hallock, P., Hine, A.C.** (1992). Morphology, sediments, and depositional environments of a small carbonate platform; Serranilla Bank, Nicaraguan Rise, Southwest Caribbean Sea. *Journal of Sedimentary Research*, 62, 591-606.
- Triffleman N.J., Hallock, P., Hine, A.C., Peebles, M.W.** (1991). Distribution of foraminiferal tests in sediments of Serranilla Bank, Nicaraguan Rise, southwestern Caribbean. *Journal of Foraminiferal Research*, 21(1), 39-47.
- Uthicke, S., Thompson, A., Schaffelke, B.** (2010). Effectiveness of benthic foraminiferal and coral assemblages as water quality indicators on inshore reefs of the Great Barrier Reef, Australia. *Coral Reefs*, 29, 209-225.
- Velásquez, J., López-Angarita, J., Sánchez, J.A.** (2011). Evaluation of the FORAM index in a case of conservation: Benthic foraminifera as indicators of ecosystem resilience in protected and non-protected coral reefs of the southern Caribbean. *Biodiversity and Conservation*, 20, 3591-3603.
- Wilson, B.** (2006). The environmental significance of *Archaias angulatus* (Miliolida, Foraminifera) in sediments around Nevis, West Indies. *Caribbean Journal of Science*, 42(1), 20-23.
- Wilson, B. & Ramsook, A.** (2007). Population densities and diversities of epiphytal foraminifera on nearshore substrates, Nevis, West Indies. *Journal of Foraminiferal Research*, 37(3), 213-222.