

NANOFÓSILES CALCÁREOS Y BIOESTRATIGRAFÍA DEL MIOCENO TARDÍO DEL SW DE LA CUENCA TUMACO *ONSHORE* (PACÍFICO COLOMBIANO)

Erika Lorena Bedoya ^{*1,2}; José-Abel Flores³; Andrés Pardo^{1,2}

RESUMEN

Se presenta el estudio bioestratigráfico semicuantitativo de nanofósiles calcáreos para tres secciones estratigráficas del Mioceno superior de la costa Pacífica de Colombia (SW de la Cuenca Tumaco costa adentro). Para establecer la biocronología de las asociaciones de nanofósiles recuperadas se identificaron las biozonas estándar y se compararon los bioeventos reconocidos con las edades obtenidas en otros estudios (e.g. ODP leg 138, ODP Leg 165). Un total de seis bioeventos fueron reconocidos, incluyendo los primeros registros o *lower occurrence* (LO) de *Amaurolithus primus*, *Reticulofenestra rotaria*, *Amaurolithus delicatus*, *Amaurolithus amplificus* y *Amaurolithus tricorniculatus*, y el último registro o *highest occurrence* (HO) de *Reticulofenestra rotaria*. Los resultados sugieren que las secciones abarcan un intervalo de tiempo entre el Tortonense y el Mesiniense, correspondiente a las biozonas NN11a – NN11b de Martini (1971) y CN9a – CN9b de Okada and Bukry (1980).

Palabras clave: Nanofósiles calcáreos, Bioestratigrafía, Mioceno tardío, cuenca Tumaco onshore

LATE MIOCENE CALCAREOUS NANNOFOSSILS AND BIOSTRATIGRAPHY OF THE SW TUMACO ONSHORE BASIN (COLOMBIAN PACIFIC)

ABSTRACT

A semiquantitative biostratigraphic study of calcareous nannofossils for three upper Miocene stratigraphic sections on the Pacific coast of Colombia (SW of the Tumaco onshore basin) is presented. To establish the biochronology of the recovered nannofossils assemblages, standar biozones and previous recognized bioevents were identified and compared with other studies (e.g. ODP Leg 138, ODP Leg 165). A total of six bioevents were reconigzed, including the first record or lower occurrence (LO) of *Amaurolithus primus*, *Reticulofenestra rotaria*, *Amaurolithus delicatus*, *Amaurolithus amplificus* and *Amaurolithus tricorniculatus*, and the last record or highest occurrence (HO) of *Reticulofenestra rotaria*. Results suggest that the sections comprise a Tortonian to Messinian time interval, corresponding to the NN11a - NN11b biozones of Martini (1971) and CN9a - CN9b of Okada and Bukry (1980).

Keywords: Calcareous nannofossils, Biostratigraphy, Late Miocene, Tumaco basin onshore.

¹ Departamento de Ciencias Geológicas, Universidad de Caldas, Calle 65 No 26-10, Manizales, Colombia. Teléfono: + 57- (6)-8780015 ext. 13433. E-mail: erikal.bedoya@gmail.com

² Instituto de Investigaciones en Estratigrafía IIES, Universidad de Caldas, Manizales, Colombia

³ Universidad de Salamanca, Facultad de Ciencias, Departamento de Geología, Plaza de la Merced s/n,37008, Salamanca, España.

INTRODUCCIÓN

El conocimiento de la evolución geológica de las secuencias sedimentarias del Pacífico colombiano y particularmente de la cuenca Tumaco *onshore* es limitado, por lo que actualmente se considera una cuenca frontera. La escasez de afloramientos, la densidad de vegetación y la dificultad de acceso, han limitado el desarrollo de estudios estratigráficos y bioestratigráficos en este sector.

A pesar de la importancia de los nanofósiles calcáreos como herramienta de alta resolución biocronológica, en Colombia su aplicación aún es limitada. Los datos bioestratigráficos disponibles para las cuencas pacíficas están basados principalmente en estudios de foraminíferos (ver Duque-Caro, 1990), mientras que la

información publicada sobre nanofósiles calcáreos para esta área, es prácticamente inexistente.

La cuenca de antearco Tumaco *onshore* se localiza al SW de la provincia costera del Pacífico colombiano (FIGURA 1). Un nuevo estudio desarrollado en esta área por la Agencia Nacional de Hidrocarburos y la Universidad de Caldas en 2011, presenta la descripción detallada de varias secciones estratigráficas localizadas en los acantilados de la bahía de Tumaco, hacia el norte del municipio de Tumaco. Estas secciones comprenden las sedimentitas de la Formación San Agustín (Mioceno superior), compuestas principalmente de espesas sucesiones de limolitas bioturbadas, arcillolitas masivas y margas, intercaladas con algunas areniscas turbidíticas de grano medio (Borrero *et al.*, 2012).

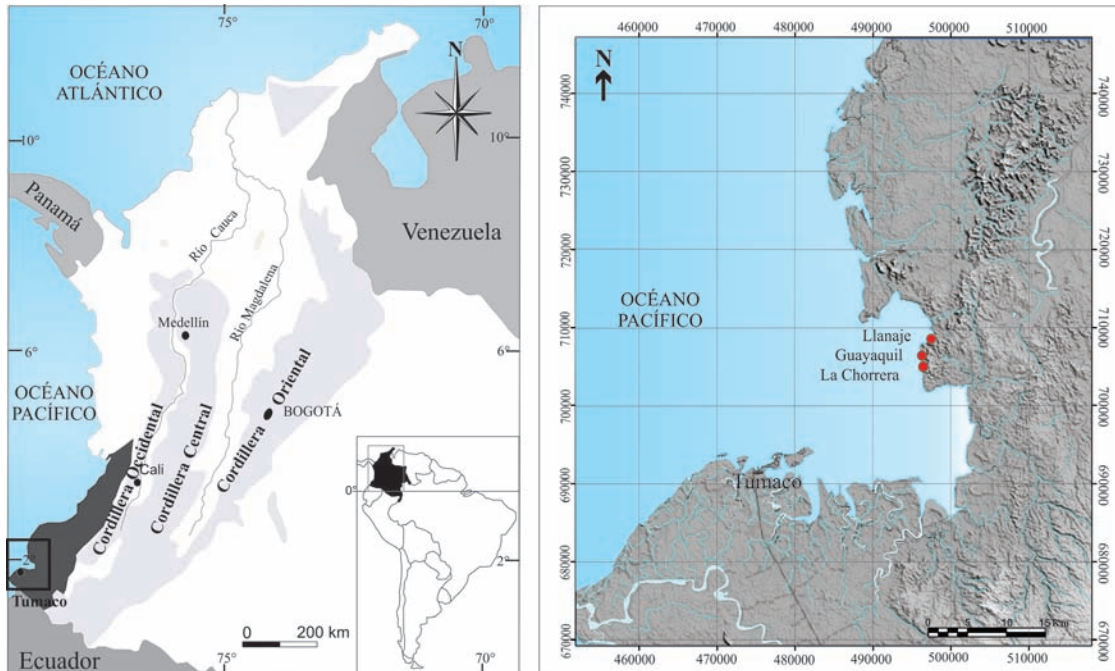


FIGURA 1. Localización geográfica y límites de la cuenca Tumaco *onshore* (gris oscuro). A la derecha, zoom del mapa con la localización de las secciones estudiadas.

En este estudio se presentan los resultados del análisis semi-cuantitativo de las asociaciones de nanofósiles calcáreos de nueve secciones estratigráficas, distribuidas en tres localidades geográficas de la bahía de Tumaco (TABLA 1). Mediante el análisis de los patrones de distribución, abundancia y morfología de algunos taxones, la comparación con las zonaciones estándar del

Cenozoico (*e.g.* Martini, 1971; Okada and Bukry, 1980), la identificación de bioeventos globales y otros propios del entorno paleoceanográfico del Pacífico colombiano y su posterior comparación con las edades calibradas en diferentes cuencas oceánicas, se obtiene un marco bioestratigráfico y una aproximación a las condiciones paleoecológicas de este sector.

TABLA 1. Coordenadas de las tres localidades estudiadas en los acantilados de la bahía de Tumaco con sus respectivos perfiles (Datum Magna Sirgas, origen Bogotá). L, CH, G: código de los perfiles estratigráficos.

Localidad	Sección	Coordenadas planas	
Llanaje	L1	X:496754	Y:708083
	L2	X:496983	Y:708158
	L3	X:497144	Y: 708737
	L4	X:496409	Y:708090
La Chorrera	CH1	X:496468	Y:704829
	CH2	X:496462	Y:704849
	CH3	X:496462	Y:704849
	CH4	X:496487	Y:705035
Guayaquil	G1	X:496112	Y:707587

MARCO GEOLÓGICO

La historia geológica del suroccidente colombiano y el desarrollo de la cuenca Tumaco, ha estado influenciada principalmente por la interacción de las placas Farallón-Nazca y Suramericana (Borrero *et al.*, 2012). La cuenca Tumaco ha sido clasificada por sus características lito tectónicas e interpretaciones sísmicas como una cuenca de antearco (Suárez, 2007; Marcaillou and Collot, 2008; López, 2009), relacionada a los procesos de subducción que generaron acreción de terrenos en la región pacífica (Suárez, 2007).

La cuenca ha sido dividida en un sector *onshore* y un *offshore* por Barrero *et al.* (2007). Su basamento está conformado de fragmentos de afinidad oceánica (*plateau* y arcos de isla) que fueron acrecionados al continente durante el Cretácico tardío y el Paleógeno (Villagómez, *et al.*, 2011), el cual es correlacionable con

los bloques de basamento de las cuencas de antearco ecuatorianas (Cediel *et al.*, 2003, Kerr *et al.*, 2004; Luzieux *et al.*, 2006; Vallejo *et al.* 2009). El relleno sedimentario consiste de sedimentos siliciclásticos cenozoicos (Luzieux, 2007; Marcaillou and Collot, 2008; Borrero *et al.*, 2012). De base a techo, el registro sedimentario comprende 1) las formaciones Zapallo/Ostiones del Eoceno tardío (Luzieux, 2007); 2) las formaciones Unidad 1 Sur, Cayapas, Viche y Angostura del Oligoceno medio-Mioceno tardío, acumuladas en ambientes marinos profundos; 3) las formaciones San Agustín y Cascajal del Mioceno tardío y Plioceno, relacionadas a ambientes de plataforma, prodelta y fan delta influenciados por vulcanismo (Borrero *et al.*, 2012).

MATERIALES Y MÉTODOS

Cuarenta muestras de rocas de grano fino fueron colectadas para este estudio (TABLA 2). Las muestras fueron preparadas siguiendo la técnica de *smear slides* (Backman and Shackleton, 1983; Perch Nielsen, 1985; Bown and Young, 1998). Las láminas fueron observadas con un microscopio óptico bajo luz polarizada a 1000x de magnificación.

Dos conteos de nanofósiles fueron realizados: 1) con propósitos paleoecológicos, utilizando campos visuales al azar y contando alrededor de 500-1000 especímenes por muestra, asegurando una representación estadística (>1%) y una resolución del 99% (Dennison and Hay, 1967; Thierstein *et al.*, 1977; Fatela and Taborda, 2001). 2) Un conteo enfocado en las especies minoritarias (por debajo del 1% de la asociación total), con el objetivo de cuantificar los marcadores bioestratigráficos. Estos especímenes fueron contados en un total de 50 campos visuales.

TABLA 2. Síntesis de las secciones analizadas.

Sección	Total metros	Total muestras	Zonas de Nanofósiles de Martini (1971)/Okada and Bukry (1980)	Intervalo de edad
Llanaje (L1, L2, L3, L4)	32	19	NN11b/(CN9b)	Mioceno tardío (Mesiniense)
La Chorrera (CH1, CH2, CH3, CH4)	38	14	NN11a (CN9a) – NN11b (CN9b)	Mioceno tardío (Tortonense-Mesiniense)
Guayaquil (G4)	22	6	NN11a (CN9a) – NN11b (CN9b)	Mioceno tardío (Tortonense-Mesiniense)

El estado de preservación de los nanofósiles calcáreos para cada muestra se definió siguiendo el criterio de Roth and Thierstein (1972) y Roth (1983): 0 (Estéril); 1 (Pobre), presenta serios efectos de disolución y/o sobrecrecimiento de algunos elementos diagnósticos; 2 (Moderado), los especímenes muestran disolución y/o sobrecrecimiento moderado, pero el reconocimiento de las especies es posible y 3 (Bueno), el espécimen presenta pocos signos de disolución o sobrecrecimiento y se distingue la morfología completa.

Los taxones son reportados alfabéticamente y por géneros en el APÉNDICE A. Las referencias para estas especies son dadas en Perch-Nielsen (1985) y Bown (1998).

PRESERVACIÓN DE LOS NANOFÓSILES CALCÁREOS

En general, la preservación de las asociaciones de nanofósiles calcáreos es buena a moderada (grado de preservación 2 y 3), con algunas variaciones mínimas a través de la secuencia. El sobrecrecimiento es frecuente en *Coccolithus pelagicus* y *Discoaster* spp. Deformación, rayos rotos y/o pérdida de las finas bifurcaciones, es común en *D. pentaradiatus*, *D. brouweri* y *D. surculus*. Los reticulofenéstidos muestran una preservación moderada, *Reticulofenestra pseudoumbilicus* algunas veces presenta disolución en el escudo central y esporádicamente, también las especies entre 4-7 μm . No obstante, cocósfemas de *Reticulofenestra* spp. son comunes en las muestras, indicando una buena preservación. Una mínima disolución fue observada en especímenes de *Helicosphaera carteri*, *Calcidiscus* spp. y *Ponthosphaera* spp. La cantidad de especímenes retrabajados en la asociación es insignificante, y la riqueza de especies es moderada a baja (de 14 a 17 especies por muestra), y es relativamente constante en las tres localidades.

BIOESTRATIGRAFÍA Y BIOCRONOLOGÍA

Para el estudio bioestratigráfico, se utilizaron los esquemas zonales del Cenozoico de Martini (1971) y Okada and Bukry (1980) y los datos de los bioeventos propuestos por otros autores (e.g. Raffi *et al.*, 2006). Los marcadores bioestratigráficos estándar fueron identificados en el intervalo estudiado (FIGURA 2). Los bioeventos identificados fueron comparados con las edades obtenidas por Raffi and Flores (1995) en

el Pacífico ecuatorial oriental; Curry *et al.* (1995), Backman and Raffi (1997), y Shackleton and Crowhurst (1997), en el Atlántico ecuatorial oriental; Negri *et al.*, (1999) Negri and Villa (2000), Hilgen *et al.* (2000a, b) y Raffi *et al.* (2003), en las secciones del Mediterráneo, y Raffi *et al.* (2006) para diferentes cuencas.

En la TABLA 3 se presenta la integración de nuestros datos bioestratigráficos con las edades calibradas propuestas por otros autores, las biozonas, la edad y el código adoptado. La TABLA 4, muestra la posición estratigráfica de los eventos de nanofósiles calcáreos en cada sección.

MIOCENO TARDÍO

Se identificaron dos asociaciones principales en las secciones estudiadas, que abarcan el intervalo Tortoniense-Mesiniense (entre 7.6 – 6.7 Ma), correspondiente a las biozonas NN11a/NN11b (CN9a/CN9b) de Martini (1971) y Okada and Bukry (1980), respectivamente.

Algunos eventos de nanofósiles calcáreos globalmente reconocidos, fueron identificados dentro de estas sucesiones; la mayoría de las especies bioestratigráficamente relevantes son ilustradas en el APÉNDICE B.

Tortoniense

La asociación del Tortoniense se reconoció en los estratos inferiores de las secciones La Chorrera y Guayaquil. En estos niveles, los nanofósiles calcáreos son abundantes y bien preservados. Esta asociación se caracteriza por *Reticulofenestra minuta*, *Sphenolithus abies/neoabies*, *R. minutula*, *R. haqii*, *Dyctiococites productus*, *D. quinquaramus*, *D. berggrenii*, *D. brouweri*, *D. pentaraditaus*, *Geminolithella rotula*, *R. rotaria*, *Calcidiscus leptorus*, *Amaurolithus primus* y *Ponthosphaera* spp.

LO: Primer registro de *Amaurolithus primus* y distribución de otras especies de *Amaurolithus*

La aparición (LO) de *Amaurolithus* spp. en el registro estratigráfico es equivalente al primer registro de *A. primus* (Rio *et al.*, 1990 Raffi *et al.*, 2006). Este evento ha sido considerado además por algunos autores como el límite entre las subzonas CN9b/CN9a (Raffi and Flores, 1995, Negri and Villa, 2000).

TABLA 3. Eventos de nanofósiles calcáreos y edades estimadas para el Mioceno tardío. HO: Highest occurrence, LO: Lower occurrence; PE: Paracme end. Zonas bioestratigráficas: CN (Okada and Bukry, 1980), NN (Martini, 1971).

Eventos de nanofósiles calcáreos	Zona /subzona	Edad adoptada (Ma)	Edad otros autores	Referencias
HO <i>R. rotaria</i>		6,760	6.42	6, 12
LO <i>A. tricorniculatus</i>		6,83	NC	2,
LO <i>A. amplificus</i>	CN9bA – CN9bB	6.909	6.684	1, 3, 4, 5, 9, 10
PE <i>R. pseudoumbilicus?</i>		7.07	7.167	1, 3, 4, 7, 8, 11
LO <i>A. delicatus</i>		7.134	6.88	6, 8, 12
LO <i>A. primus</i>	CN9a – CN9bA, NN11a - NN11b	7.362	7.424	1, 4, 8, 11
LO <i>R. rotaria</i>		7.398	7.22	6, 7, 12

Los números en negrilla corresponden a los datos de edades reportados por otros autores. 1. Raffi *et al.* (2006); 2. Este trabajo; 3. Shackleton and Crowhurst (1997); 4. Backman and Raffi (1997); 5. Curry *et al.* (1995); 6. Negri *et al.* (1999); Negri and Villa (2000); 7. Hilgen *et al.* (2000a); 8. Raffi *et al.* (2003); 9. Krijgsman *et al.* (1999); 10. Hilgen and Krijgsman (1999); 11. Hilgen *et al.* (1995); 12. Buitrago *et al.* (2010); NC: No calibrada.

TABLA 4. Posición estratigráfica de los eventos de nanofósiles calcáreos en las secciones.

Evento	Intervalo (muestras)	Profundidad (m)	Sección
HO <i>R. rotaria</i>	01 - 02	17,0 – 16,0	
LO <i>A. tricorniculatus</i>	03 - 04	29,0 – 28,0	Llanaje
LO <i>R. rotaria?</i>	03 – 16	16,5 – 19,0	
LO <i>A. amplificus</i>	15 – 17	35,3 – 33,8	
PE <i>R. pseudoumbilicus?</i>	12 – 16	19,2 – 12,1	La Chorrera
LO <i>A. primus</i>	09 – 13	11,0 – 6,8	
LO <i>R. rotaria</i>	13 – 14	6,8 – 3,8	
LO <i>A. tricorniculatus?</i>	19 – 21	19,0 – 15,0	
PE <i>R. pseudoumbilicus</i>	23 – 24	13,0 – 11,0	Guayaquil
LO <i>A. delicatus</i>	24 – 26	11,0 – 5,0	
LO <i>A. primus</i>	26 – 28	5,0 – 2,0	

Este evento ha sido datado en el Caribe colombiano por Buitrago *et al.* (2010) en 7.306 Ma, lo que evidencia un ligero diacronismo con las edades reportadas en otras cuencas, ya que en el Mediterráneo ha sido datado en 7.42 Ma (Hilgen *et al.* 1995), Krijgsman *et al.*, 1997; Negri and Villa, 2000 y Raffi *et al.* 2003), mientras que en el Atlántico ecuatorial ha sido situado en 7.39 Ma (Backman and Raffi, 1997; Raffi *et al.*, 2006).

El evento de LO de *A. primus* en el registro sedimentario es seguido casi inmediatamente por la aparición de *A. delicatus*, el cual co-ocurre a lo largo de las secciones con morfotipos intermedios entre las dos especies (morfovariantes), presentando muy bajas abundancias y frecuencia variable. Este comportamiento ha sido

observado también en el Pacífico ecuatorial oriental por Raffi and Flores (1995), en el Mediterráneo (Negri and Villa, 2000; Raffi *et al.*, 2003), y en menor medida en las secciones estudiadas. El evento de LO of *A. delicatus* ha sido reportado por diferentes autores como el evento más cercano al límite Tortoniense-Mesiniense (*e.g.* Hilgen *et al.*, 2000a), datado en 7.24 Ma por Raffi *et al.*, 2006.

Este evento ha sido datado en el Mediterráneo en 7.13 Ma por Raffi *et al.* (2003), Negri and Villa (2000) y Negri *et al.* (1999), mientras que en el Caribe colombiano fue datado en 6.88 Ma por Buitrago *et al.* (2010), después del límite de las subzonas CN9a/ CN9b.

En este estudio, *A. delicatus* es observado en la sección de Guayaquil antes del PE of *R. pseudoumbilicus*, con una edad de 7.14 Ma, lo cual es similar a lo registrado en el Mediterráneo; mientras que en la sección La Chorrera, *A. delicatus* aparece después del PE de *R. pseudoumbilicus*, lo cual no sería coincidente con lo observado en Guayaquil, por lo cual este evento no puede establecerse en esta sección, posiblemente debido a las bajas abundancias y frecuencias de este taxón. En la sección de Llanaje, se observa primero en la asociación *A. delicatus* que *A. primus*, lo que situaría la asociación por encima del límite subzonal y sugeriría que el evento de LO de *A. primus* se encuentra registrado en los niveles ubicados por debajo de la sucesión aflorante.

Otro evento importante es el LO de *Reticulofenestra rotaria*, el cual fue identificado en la sección de La Chorrera, muy cercano al evento de LO de *A. primus*. En el Caribe colombiano, Buitrago *et al.* (2010) datan el evento de LO de *R. Rotaria* en 7.22 Ma; en el Mediterráneo Hilgen *et al.* (2000a), determinaron una edad de 7.46 Ma y Negri and Villa (2000), asignaron una edad de 7.39 Ma, indicando un leve diacronismo. Este último dato de acuerdo con lo encontrado en este estudio.

En las otras secciones, la presencia casi continua de *R. rotaria*, permite restringir las asociaciones a un intervalo de tiempo más corto; por ejemplo, en la sección de Llanaje, su presencia junto al registro regular de formas de *R. pseudoumbilicus*, soporta la idea de que la sección solo abarca el Mesiniense.

Mesiniense

La asociación del Mesiniense fue reconocida en los niveles superiores de las secciones La Chorrera y Guayaquil y en todo el intervalo de la sección de Llanaje. Una baja abundancia y preservación fue observada en este intervalo. La asociación se caracteriza por *R. minuta*, *Sphenolithus abies/neoabies*, *R. minutula*, *R. haqii*, *Dyctiococites productus*, *R. pseudoumbilicus*, *R. antarcticus*, *D. quinquerramus*, *D. berggrenii*, *D. brouweri*, *D. surculus*, *Coccolithus pelagicus*, *R. rotaria*, *Calcidiscus leptorus*, *Amaurolithus primus*, *A. delicatus*, *A. tricorniculatus* y *A. amplificus*.

PE: Fin del paracme de *Reticulofenestra pseudoumbilicus*

El intervalo de ausencia (casi total) de formas grandes de *R. pseudoumbilicus* ($> 7\mu\text{m}$) o paracme, fue observado por primera vez en sedimentos del Mioceno

superior del Océano Índico por Rio *et al.* (1990), y posteriormente registrado en otras cuencas oceánicas (e.g. Gartner, 1992; Takayama, 1993; Raffi and Flores, 1995; Backman and Raffi, 1997). El inicio y fin de este paracme, proporciona dos eventos bioestratigráficos muy útiles que han sido astronómicamente calibrados en secuencias del Atlántico ecuatorial oriental (Backman and Raffi, 1997, Shackleton and Crowhurst, 1997) y del Mediterráneo (Raffi *et al.*, 2003).

Raffi and Flores (1995) indican que el Paracme de *R. pseudoumbilicus* comienza desde la zona CN8 (NN10) hasta la base de la zona CN9b. La desaparición “temporal” de este taxón en el registro ha sido interpretada como una característica estratigráfica regional que probablemente refleja una inestabilidad oceanográfica-climática (Rio *et al.*, 1990).

Gartner (1992) también identificó un cambio drástico en el tamaño de los reticulofenéstidos cerca al cron 4, lo cual es interpretado como un posible cambio en la productividad en el Atlántico Norte en latitudes medias, donde el dominio de reticulofenéstidos grandes está relacionado con una baja productividad de las aguas superficiales. Por otra parte, Raffi *et al.* (1995) sugieren que la desaparición temporal de *R. pseudoumbilicus* es una característica correlacionable entre regiones tropicales y ecuatoriales.

En este estudio se consideran los porcentajes de *R. pseudoumbilicus* ($<1\%$ de la asociación tota) y los bioeventos de las muestras adyacentes para la ubicación de este evento. Siguiendo este criterio, se observa la ausencia de formas grandes de *R. pseudoumbilicus* en las muestras ubicadas hacia el tope de las secciones La Chorrera y Guayaquil, lo cual puede interpretarse como el fin del paracme (PE) reconocido por Rio *et al.* (1990), permitiendo situar este evento en la sucesión.

En la sección de Llanaje, el evento de PE de *R. pseudoumbilicus* no fue identificado, por lo tanto, se asume que las asociaciones están por encima del paracme, teniendo en cuenta el intervalo de duración de este evento y soportado por la presencia de algunos individuos de *Amaurolithus* spp. desde la base hasta el tope de la sección.

La “re-entrada” al registro (o incremento en porcentaje) de formas grandes de *Reticulofenestra* es medianamente perceptible, ya que las abundancias permanecen bajas hasta el tope de las secciones, lo cual es consistente con las observaciones realizadas en el Pacífico ecuatorial oriental por Raffi and Flores (1995) y en el Mediterráneo por Raffi *et al.* (2003).

Este evento ha sido datado en el Atlántico ecuatorial oriental en 7.07 Ma (Backman and Raffi, 1997) y en el Mediterráneo en 7.16 Ma (Raffi *et al.*, 2003; Hilgen *et al.*, 1995 y Hilgen *et al.*, 2000b).

Intervalo de *Amaurolithus amplificus*

Amaurolithus amplificus es considerada como un importante marcador bioestratigráfico del Mioceno tardío. Su primer y último registro LO (*lower occurrence*) y HO (*highest occurrence*), respectivamente, han sido utilizados en algunos estudios para subdividir la zona CN9b de Okada and Bukry (1980) y establecer la base de las subzonas CN9bB y CN9bC (*e.g.* Raffi and Flores, 1995; Backman and Raffi, 1997 y Raffi *et al.*, 2006).

Amaurolithus amplificus es un taxón grande, con forma de herradura asimétrica y angular, fácilmente identificable, el cual solo fue observado hacia el tope de la sección La Chorrera, donde se presenta como un morfotipo menos robusto que el habitual. Su posición en la secuencia, permite ubicar la asociación en la parte basal de la subzona CN9bB.

Su primer registro es reportado en el Pacífico ecuatorial oriental en 6.50 Ma por Raffi and Flores (1995); en el Mediterráneo, Krijgsman *et al.* (1997), lo sitúan en 6.68 Ma; en el Caribe colombiano, es reportado en 6.95 Ma (Buitrago *et al.*, 2010), mientras que en el Atlántico ecuatorial, Curry *et al.* (1995), Shackleton and Crowhurst (1997), Backman and Raffi (1997), y Raffi *et al.* (2006), le asignan una edad de 6.90 Ma (Cron C3Ar).

Después del evento de LO de *A. amplificus*, se observa el primer registro de *Amaurolithus tricorniculatus* en 6.83 Ma y el HO de *R. rotaria*, el cual ha sido reportado en el Mediterráneo en 6.76 Ma (Raffi *et al.*, 2003; Negri and Villa, 2000). Ambos bioeventos fueron usados en este estudio para definir la edad de las asociaciones que se encuentran por encima del LO de *A. amplificus*, correspondiente al límite entre las subzonas CN9bA y CN9bB. Respecto al HO de *R. rotaria*, no se encontraron datos en otras cuencas que permitan hacer una comparación; sin embargo, en este estudio se considera un buen marcador bioestratigráfico para el Mesiniense, lo cual ha sido sugerido por otros autores (*e.g.* Theodoridis, 1984, Flores *et al.* 1992).

El LO de *A. tricorniculatus* es un evento que ha sido considerado dentro de la subzona CN9b (Berggren *et al.*, 1985) y que actualmente está tratando de definirse en diferentes secuencias, por ejemplo, en el ODP Leg 165, sitio 999 (mar Caribe colombiano), Buitrago *et al.* (2010) obtuvieron una edad de 7.24 Ma.

Amaurolithus tricorniculatus fue observado en las asociaciones recuperadas en las secciones de Llanaje y Guayaquil. Pese a que su presencia es rara y discontinua en el material analizado, soporta la hipótesis de que las asociaciones que incluyen este taxón, pertenecen al Mesiniense. Formas intermedias entre *A. delicatus* y *A. tricorniculatus*, también fueron observadas en la sección Guayaquil, las cuales son consideradas “morfovariantes de *A. delicatus*”.

CONCLUSIONES

Las dos asociaciones de nanofósiles calcáreos identificadas en las sucesiones sedimentarias de la Bahía de Tumaco, comprenden un intervalo de tiempo desde el Tortoniense tardío hasta el Mesiniense temprano, entre 7.61 y 6.85 Ma, correspondiente a las biozonas NN11a (CN9a) y NN11b (CN9b) de Martini (1971) and Okada and Bukry (1980), respectivamente.

Se reconocieron un total de seis eventos de nanofósiles calcáreos, tres de ellos cuentan con edades calibradas astronómicamente en diferentes cuencas oceánicas. Los demás eventos fueron usados como criterio secundario para mejorar la resolución bioestratigráfica y con el objetivo de probar su aplicabilidad en las secuencias del sector estudiado. Del más antiguo al más reciente estos son: LO de *R. Rotaria*, LO de *A. primus*, LO de *A. delicatus*, PE *R. pseudoumbilicus*, LO de *A. amplificus*, LO de *A. tricorniculatus* y HO *R. Rotaria*.

La implementación de bioeventos complementarios como el LO y el HO de *R. rotaria*, fue factible en este estudio, sugiriendo su aplicabilidad como marcador bioestratigráfico del Mioceno tardío en bajas latitudes. En contraste, el evento de LO de *A. delicatus*, mostró ciertas diferencias en la posición entre las secciones estratigráficas, por lo que se hace necesario documentar con más detalle la ocurrencia de este taxón en otras secciones estratigráficas del Pacífico ecuatorial oriental.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Agencia Nacional de Hidrocarburos de Colombia (ANH) y a la Universidad de Caldas por el financiamiento de esta investigación. Este trabajo forma parte de un convenio de cooperación suscrito entre el IIES (Instituto de Investigaciones en Estratigrafía) de la Universidad de Caldas y la Universidad de Salamanca. El manuscrito fue mejorado gracias a las sugerencias de dos revisores anónimos. Erika L. Bedoya agradece al CADIC-CONICET Ushuaia por la pasantía realizada en sus laboratorios y a Eduardo Olivero por

los comentarios, sugerencias y apoyo durante la estadía en su grupo de investigación, así como a los geólogos que contribuyeron al levantamiento de las secciones estratigráficas en las localidades estudiadas.

REFERENCIAS

- Backman, J. 1980. Miocene - Pliocene nannofossils and sedimentation rates in the Hatton - Rockall Basin, NE Atlantic Ocean. *Stockh. Cntr. Grol.* 3: 1-93.
- Backman, J., and Shackleton, N.J., 1983. Quantitative biochronology of Pliocene and Early Pleistocene calcareous nannofossils from the Atlantic, Indian and Pacific oceans. *Marine Micropaleontology*, 8: 141-170.
- Backman, J., and Raffi, I. 1997. Calibration of Miocene nannofossil events to orbitally tuned cyclostratigraphies from Ceara Rise. In: Curry, W.B., Shackleton, N.J., Richter, C., Bralower, T.J. (Eds.), *Proceedings of the Ocean Drilling Program*, 154: 83-99.
- Barrero, D., Pardo, A.; Vargas, C.A.; and Martinez, J.F. 2007. Colombian Sedimentary Basins: nomenclature, boundaries and petroleum geology, a new proposal. National Hydrocarbons Agency (ANH), 91p.
- Berggren, W. A., Kent, D. V., and Van Couvering, J. A., 1985. The Neogene: Part 2. Neogene geochronology and chronostratigraphy. In: N. J. Snelling (Ed.). *The Chronology of the Geological Record. Mem. Geol. Soc. London*, 211-260.
- Borrero, C., Pardo, A., Jaramillo, C.M., Osorio, J.A., Cardona, J.A., Flores, J-A., Echeverry, Rosero, S., García, J., and Castillo, H. 2012. Tectonostratigraphy of the Cenozoic Tumaco forearc basin (Colombian Pacific) and its relationship with the northern Andes orogenic build up, *Journal of South American Earth Sciences*, 39: 75-92.
- Bown, P.R. (Ed.). 1998. *Calcareous Nannofossil Biostratigraphy*. Paul Bown (Ed.). Chapman & Hall. 315p.
- Bown, P.R., and Young, J.R. 1998. Introduction. In: P.R. Bown, (Ed.). *Calcareous Nannofossil Biostratigraphy*. Kluwer Academic, Dordrecht, pp. 1-15.
- Buitrago, Y.M., Flores, J-A., and Sierro, F.J. 2010. Calcareous nannofossils Upper Miocene biostratigraphy and biochronology at western equatorial Atlantic (ODP Site 999). *Revista Española de Micropaleontología*, 42 (3): 301-319.
- Cediel, F., Shaw, R., and Cáceres, C. 2003. Tectonic assembly of the Northern Andean Block, in C. Bartolini, R. T. Buffler, and J. Blickwede (Eds.). *The Circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon habitats, basin formation, and plate tectonics. American Association Petroleum Geologist Memoir*, 79: 815-848.
- Curry, W.B., Shackleton, N.J., and Richter, C. 1995. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Initial Reports*, 154p.
- Dennison, J.M., and Hay, W.W. 1967. Estimating the needed sampling area for subaquatic ecologic studies. *Journal of Paleontology*, 41: 706-708.
- Duque-Caro, H. 1990. Neogene stratigraphy, paleoceanography and paleobiogeography in northwest South America and the evolution of the Panama Seaway. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 77: 203-234.
- Fatela, F., and Taborda, R. 2001. Confidence limits of species proportions in microfossil assemblages. *Marine Micropaleontology*, 45: 169-174.
- Flores, J.A., Sierro, F.J., and Glaçon, G. 1992. Calcareous plankton analysis in the pre-evaporitic sediments of the ODP site 654 (Tyrrhenian Sea, Western Mediterranean). *Micropaleontology*, 38: 279-288.
- Gartner, S. 1992. Miocene nannofossil chronology in the North Atlantic, DSDP Site 608. *Marine Micropaleontology*, 18, 307-331.
- Hilgen, F.J., and Krijgsman, W. 1999. Cyclostratigraphy and astrochronology of the Tripoli diatomite formation (pre-evaporite Messinian, Sicily, Italy). *Terra Nova*, 11: 16-22.
- Hilgen, F. J., Krijgsman, W., Langereis, C. G., Lourens, L. J., Santarelli, A., and Zachariasse, W. J. 1995. Extending the astronomical (polarity) time scale into the Miocene. *Earth Planetary Science Letters*, 136: 495-510.
- Hilgen, F.J., Krijgsman, W., Raffi, I., Turco, E., and Zachariasse, W.J. 2000a. Integrated stratigraphy and astronomical calibration of the Serravallian/Tortonion boundary section at Monte Gibliscemi (Sicily, Italy). *Marine Micropaleontology*, 38: 181-211.

- Hilgen, F.J., Iaccarino, S., Krijgsman, W., Villa, A.G., Langereis, C.G., and Zachariasse, W.J. 2000b. The Global Boundary Stratotype Section and Point (GSSP) of the Messinian Stage (uppermost Miocene). *Episodes* 23: 1–6.
- Kerr, A., Tarney, J., Kempton, P., Pringle, M., and Nivia, A. 2004. Mafic Pegmatites Intruding Oceanic Plateau Gabbros and Ultramafic Cumulates from Bolivar, Colombia: Evidence for a ‘Wet’ Mantle Plume? *J. Petrology*, 45(9): 1877–1906.
- Krijgsman, W., Hilgen, F.J., Negri, A., Wijbrans, J.R., and Zachariasse, W.J. 1997. The Monte del Casino section (Northern Apennines, Italy): A potential Tortonian/Messinian boundary stratotype. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 133: 27–47.
- Krijgsman, W., Hilgen, F.J., Raffi, I., Sierro, F.J., Wilson, D.S. 1999. Chronology, causes and progression of the Messinian salinity crisis. *Nature*, 400: 652–655.
- López, E. 2009. Evolution tectono-stratigraphique du double bassin avant - arc de 756 la marge convergente Sud Colombienne – Nord Equatorienne pendant le Cénozoïque. Thèse de Doctorat de l’Université de Nice Sophia Antipolis, 323p.
- Luzieux. 2007. Origin and late Cretaceous-Tertiary evolution of the Ecuadorian forearc. Université de Lausanne, ETH Zurich. 196 p.
- Luzieux, L.D.A., Heller, F., Spikings, R., Vallejo, C. F., and Winkler, W. 2006. Origin and Cretaceous tectonic history of the coastal Ecuadorian fore arc between 1°S–4°S: Paleomagnetic, radiometric and fossil evidence. *Earth and Planetary Science Letters*, 249: 400–414.
- Marcaillou, B., and Collot J.Y. 2008. Chronostratigraphy and tectonic deformation of the North Ecuadorian–South Colombian offshore Manglares forearc basin. *Marine Geology*, 255: 30–44.
- Martini, E., 1971. Standard Tertiary and Quaternary calcareous nannoplankton zonation. En: Farinacci, A. (Ed.), *Proceedings of the II Planktonic Conference*. Ed. Tecnoscienza, Roma 1970, 2:739–785.
- Negri, A., Giunta, S., Hilgen, F.J., Krijgsman, W., and Vai, G.B. 1999. Calcareous nannofossil biostratigraphy of the Monte del Casino section (northern Apennines, Italy) and paleoceanographic conditions at time of late Miocene sapropel formation. *Marine Micropaleontology*, 36: 13–30.
- Negri, A., and Villa, G. 2000. Calcareous nannofossil biostratigraphy, biochronology and paleoecology at the Tortonian/Messinian boundary of the Faneromeni section (Crete). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 156: 195–209.
- Okada, H., and Bukry, D. 1980. Supplementary modification and introduction of code numbers to the low-latitude coccolith biostratigraphic zonation (Bukry, 1973, 1975). *Marine Micropaleontology*, 5: 321–325.
- Perch-Nielsen, K. 1985. Mesozoic calcareous nannofossils. In: H.M. Bolli, J.B. Saunders, K. Perch-Nielsen (Eds.). *Plankton Stratigraphy*. Cambridge University Press, Cambridge, pp 329–426.
- Raffi, I., Backman, J., Fornaciari, E., Pälke, H., Rio, D., Lourens, L., and Hilgen, F. J. 2006. A review of calcareous nannofossil astrobiochronology encompassing the past 25 million years. *Quaternary Science Reviews*, 25: 3113–3137.
- Raffi, I., Mozzato, C.A., Fornaciari, E., Hilgen, F.J., and Rio, D. 2003. Late Miocene calcareous nannofossil biostratigraphy and astrobiochronology for the Mediterranean region. *Micropaleontology*, 49: 1–26.
- Raffi, I., and Flores, J. A. 1995. Pleistocene through Miocene calcareous nannofossils from eastern equatorial Pacific Ocean. In: Pisias, N.G., Mayer, L.A., Janecek, T.R., Palmer-Julson, A., and van Andel, T.H. (Eds.), *1995 Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, 138: 233–286.
- Raffi I., Rio D., D’atri A., Fornaciari E., and Rocchetti S. 1995. Quantitative distribution patterns and biomagnetostratigraphy of middle and late Miocene calcareous nannofossils from Equatorial Indian and Pacific Oceans (Legs 115, 130, and 138). In: Pisias, N.G., Mayer, L.A., Janecek, T.R., Palmer-Julson, A., van Handel, T.H. (Eds.). *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, 138: 479–502.
- Rio, D., Fornaciari, E., Raffi, I. 1990. Late Oligocene through early Pleistocene calcareous nannofossils from western equatorial Indian Ocean (Leg 115). In: Duncan, R.A., Backman, J., Peterson, L.C., *et al.* (Eds.), *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, 115: 175–235.

Roth, P.H., and Thierstein, H., 1972. Calcareous nannoplankton: Leg 14 of the Deep Sea Drilling Project. In: Hayes, D.E., Pimm, A.C., *et al.*, Initial Reports DSDP, Washington (U.S. Govt. Printing Office), 14: 421-485.

Roth, P.H. 1983. Jurassic and Lower Cretaceous calcareous nannofossils in the western North Atlantic (Site 534): biostratigraphy, preservation, and some observations on biogeography and paleoceanography. In: Sheridan, R.E., Gradstein, F.M., *et al.*, Initial Reports DSDP, Washington (U.S. Govt. Printing Office), 76: 587-621.

Shackleton, N.J., and Crowhurst, S.J. 1997. Sediment fluxes based on an orbitally tuned time scale 5 Ma to 14 Ma, Site 926. In: Curry, W.B., Shackleton, N.J., Richter, C., Bralower, T. (Eds.). Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, 154: 69-82.

Suárez, M. 2007. Geological Framework of the Pacific Coast Sedimentary Basins, Western Colombia. *Geología Colombiana*, 32: 47-62.

Takayama, T. 1993. Notes on Neogene calcareous nannofossil biostratigraphy of the Ontong Java Plateau and size variations of *Reticulofenestra* coccoliths. In: Berger, W.H., Kroenke, L.W., Mayer, L.A., *et al.*, Proceedings of the Ocean Drilling Program. Scientific Results, 130: 179-229.

Theodoridis, S.A. 1984. Calcareous nannofossil biozonation of the Miocene and revision of the helicoliths and Discoaster. *Utrecht Micropaleontological Bulletins*, 32: 1-271.

Thierstein, H.R., Geitzenauer, K., Molino, B., and Shackleton, N.J. 1977. Global synchronicity of late Quaternary coccolith datum levels: validation by oxygen isotopes. *Geology*, 5:400-404.

Vallejo, C., Winkler, W., Spikings, R. A., Luzieux, L., Heller, F., and Bussy, F. 2009. Mode and timing of terrane accretion in the forearc of the Andes in Ecuador. *Geological Society of America Memoirs*, 204:197-216.

Villagómez, D., Spikings, R., Magna, T., Kammer, A., Winkler, W., and Beltrán, A. 2011. Geochronology, geochemistry and tectonic evolution of the Western and Central cordilleras of Colombia. *Lithos*, 125 (3-4): 875-896.

APÉNDICE A. Nanofósiles Calcáreos considerados en este estudio (en orden alfabético)

Todas las especies y referencias incluidas, pueden ser encontradas en Perch-Nielsen (1985) y Bown and Young (1998).

- *Amaurolithus* Gartner and Bukry 1975.
- *Amaurolithus amplificus* (Bukry & Percival, 1971) Gartner & Bukry, 1975.
- *Amaurolithus delicatus* Gartner & Bukry, 1975.
- *Amaurolithus primus* (Bukry & Percival, 1971) Gartner & Bukry, 1975.
- *Amaurolithus tricorniculatus* (Gartner, 1967) Gartner & Bukry, 1975.
- *Calcidiscus leptoporus* (Murray & Blackman, 1898) Loeblich & Tappan, 1978.
- *Calcidiscus macintyreii* (Bukry & Bramlette, 1969) Loeblich & Tappan, 1978.
- *Coccolithus pelagicus* (Wallich, 1877) Schiller, 1930.
- *Discoaster berggrenii* Bukry, 1971.
- *Discoaster brouweri* Tan, 1927, emend. Bramlette & Riedel, 1954.
- *Discoaster pentaradiatus* Tan, 1927, emend. Bramlette & Riedel, 1954.
- *Discoaster quinquerramus* Gartner, 1969.
- *Discoaster surculus* Martini & Bramlette, 1963.
- *Discoaster variabilis* Martini & Bramlette, 1963.
- *Dictyococcites productus* (Kamptner, 1963) Backman, 1980.
- *Geminilithella jafari*, Backman, 1980.
- *Geminilithella rotula* (Kamptner, 1948) Backman 1980.
- *Helicosphaera carteri* (Wallich, 1877) Kamptner, 1954.
- *Helicosphaera sellii* (Bukry & Bramlette, 1969) Jafar & Martini, 1975.
- *Pontosphaera* spp. Lohmann, 1902.
- *Pontosphaera* cf. *japonica* (Takayama, 1967) Nishida, 1971.
- *Pontosphaera multipora* (Kamptner, 1948) Roth, 1970 emend. Burns, 1973.
- *Reticulofenestra antarctica* (Haq, 1976).
- *Reticulofenestra haqii* Backman, 1978.
- *Reticulofenestra gelida* (Geitzenauer, 1972) Backman, 1978.
- *Reticulofenestra minuta* Roth, 1970.
- *Reticulofenestra minutula* (Gartner, 1967) Haq & Berggren, 1978.
- *Reticulofenestra pseudoumbilicus* (Gartner, 1967) Gartner, 1969.
- *Reticulofenestra rotaria* Theodoridis, 1984.
- *Sphenolithus abies*, Deflandre en Deflandre & Fert, 1954.
- *Sphenolithus neoabies*, Bukry & Bramlette, 1969.
- *Scyphosphaera* spp. Lohmann, 1902.
- *Scyphosphaera* cf. *pulcherrima* Deflandre, 1942.

APÉNDICE B. Láminas

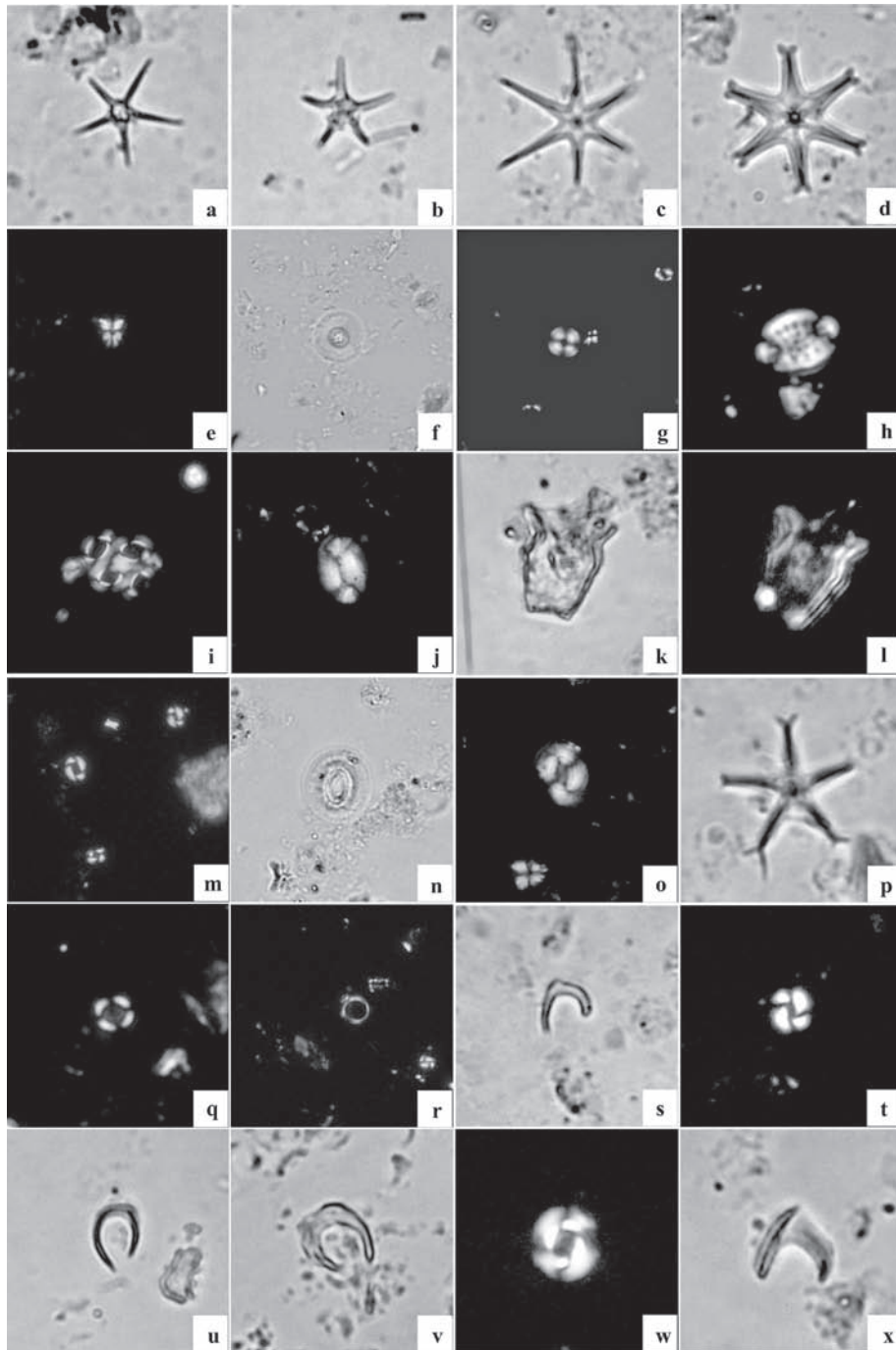


LÁMINA 1. Todas las fotografías ampliadas por 1000; escala gráfica= 10µm; NII: Nícoles paralelos; NX: Nícoles cruzados.

a. *Discoaster quinquerramus* NII; **b.** *D. berggrenii* NII; **c.** *D. brouweri* NX; **d.** *D. surculus* NX; **e.** *Sphenolithus abies*; **f, g.** *Calcidiscus leptoporus* NII y NX; **h.** NX; *Pontosphaera multipora* NX; **i.** Cocósfera de *Reticulofenestra* spp. **j.** *Helicosphaera carteri*, NX; **k, l.** *Scyphosphaera* cf. *pulcherrima* NII y NX; **m.** *Reticulofenestra haqii*; **n, o.** *Coccolithus pelagicus* NII y NX; **p.** *D. pentaradiatus*, NII; **q.** *Reticulofenestra rotaria* NX; **r.** *Geminilithella rotula* NX; **s.** morfovariante of *A. delicatus* NII; **t.** *Reticulofenestra minutula* NX; **u.** *Amaurolithus delicatus* NII; **v.** *A. primus* NII; **w.** *Reticulofenestra pseudumbilicus* NX **x.** *A. amplificus* NII.