

La investigación reportada en esta tesis es parte de los programas de investigación del CICESE (Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California).

La investigación fue financiada por el CONACYT (Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología).

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México). El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo o titular de los Derechos Autor.

CICESE@ 2023. Todos los derechos reservados

**Centro de Investigación Científica y de Educación
Superior de Ensenada, Baja California**



**Maestría en Ciencias
en Ciencias de la Tierra con orientación en Geología**

**Conjuntos de dinoflagelados del Cretácico Inferior de
Colombia**

Tesis
para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
Maestro en Ciencias

Presenta:

Maribel Reyes Tixteco

Ensenada, Baja California, México
2023

Tesis defendida por
Maribel Reyes Tixteco

y aprobada por el siguiente Comité

Dr. Javier Helenes Escamilla
Director de tesis

Dr. Juan Gabriel Flores Trujillo

Dr. Mario González Escobar

Dr. Thomas Gunter Kretzschmar

Dr. Andrés Pardo Trujillo

Dra. M. del Pilar Sánchez Saavedra



Dr. Diego Ruíz Aguilar
Coordinador del Posgrado en Ciencias de la Tierra

Dra. Ana Denise Re Araujo
Directora de Estudios de Posgrado

Resumen de la tesis que presenta **Maribel Reyes Tixteco** como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Ciencias de la Tierra con orientación en Geología.

Conjuntos de dinoflagelados del Cretácico Inferior de Colombia

Resumen aprobado por:

Dr. Javier Helenes Escamilla
Director de tesis

Los dinoflagelados se usan como indicadores en investigaciones ecológicas y son uno de los principales causantes de toxicidad en florecimientos algales nocivos (FANs). Estas microalgas producen quistes resistentes y fosilizables, los cuales son muy útiles como indicadores bioestratigráficos y paleoecológicos. Los dinoflagelados del Cretácico han sido ampliamente estudiados en estratos de latitudes medias y altas, pero los conjuntos tropicales casi no han sido estudiados. Para ayudar a remediar esta falta de conocimiento, se estudiaron cuantitativamente y cualitativamente el contenido de dinoflagelados de 50 muestras de núcleos de los pozos ANH-CR-MONTECARLO-1X y ANH-CON-06-ST-S, localizados en Colombia. La edad de la sedimentación en ambos pozos se interpreta como Albiano, aunque hay un poco de incertidumbre en la edad de inicio. Los taxones heterotróficos tienen menor riqueza de especies, pero presentan mayor abundancia, mientras que los autótrofos tienen mayor riqueza de especies pero menor abundancia. En el pozo ANH-CR-MONTECARLO-1X se identificaron 20 géneros y 24 especies, con altos valores de concentración total de 1,441.00 qst / gr sed, en la muestra IIES-PALY-6015 por la presencia de *Subtilisphaera* y 1,036.88 en la muestra IIES-PALY-6021 dominada por *Muderongia*. Dichas muestras son correlacionables con dos transgresiones marinas, del Albiano tardío (104.4 Ma) y el Albiano temprano (111 Ma) respectivamente. Además, indican que los ensamblajes de quistes en este pozo, están dominados por formas Peridinoideas y Ceratioideas. En el pozo ANH-CON-06-ST-S se encontraron 16 géneros y 15 especies, con un valor máximo de 3,539.62 qst / gr sed en la muestra IIES-PALY-5995 por el alto contenido de *Subtilisphaera*, y correlacionable con la transgresión marina del Albiano tardío (104.4 Ma). Los ensamblajes de quistes en este pozo, están dominados por las formas Peridinoideas. La litología y el contenido de palinomorfos de los pozos indican un ambiente nerítico interno (NI) a transicional (T), con mayor aporte de terrígenos en el pozo ANH-CON-06-ST-S. Se propone un clima cálido para el Cretácico Inferior por la alta diversidad de taxones autótrofos característicos de aguas cálidas y estratificadas.

Palabras clave: Dinoflagelados, Cretácico Inferior, Bioestratigrafía, Paleoambientes, Paleoecología.

Abstract of the thesis presented by **Maribel Reyes Tixteco** as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Earth's Sciences with orientation in Geology.

Assemblages of dinoflagellate from the Lower Cretaceous of Colombia

Abstract approved by:

Dr. Javier Helenes Escamilla
Thesis Director

Dinoflagellates produce resistant and fossilizable cysts, which are useful as biostratigraphic and paleoecological indicators. These microalgae are used as indicators in ecological studies and are one of the main causes of toxicity in harmful algal blooms (HABs). Cretaceous dinoflagellates have been extensively studied in mid- and high-latitude strata, but tropical assemblages have hardly been studied. To help remedy this lack of knowledge, the dinoflagellate content of 50 core samples from the ANH-CR-MONTECARLO-1X and ANH-CON-06-ST-S wells, located in Colombia, were quantitatively and qualitatively studied. The age of sedimentation in both wells is interpreted as Albian, although there is some uncertainty in the beginning of the depositional age. Heterotrophic taxa have lower species richness but higher abundance, while autotrophs have higher species richness but lower abundance. In the ANH-CR-MONTECARLO-1X well, 20 genera and 24 species were identified, with high total concentration values of 1,441.00 cst / gr sed, in the IIES-PALY-6015 sample, due to the presence of *Subtilisphaera* and 1,036.88 in the IIES sample -PALY-6021, dominated by *Muderongia*. These samples are correlable with two marine transgressions, from the late Albian (104.4 Ma) and early Albian (111 Ma) respectively. Furthermore, they indicate that the cyst assemblages in this well are dominated by heterotrophic forms. In the ANH-CON-06-ST-S well, 16 genera and 15 species were found, with a maximum value of 3,539.62 qst / gr sed in the IIES-PALY-5995 sample due to the high content of *Subtilisphaera*, and correlated with the transgression marina from the late Albian (104.4 Ma). The cyst assemblages in this well are also dominated by the heterotrophic forms. The lithology and palynomorph content of the wells indicate an internal neritic (NI) to transitional (T) environment, with a higher terrigenous influx in the ANH-CON-06-ST-S well. A warm climate is proposed for the Lower Cretaceous due to the high diversity of autotrophic taxa characteristic of warm and stratified waters.

Keywords: Dinoflagellates, Lower Cretaceous, Biostratigraphy, Paleoenvironment, Paleoecology.

Dedicatoria

A mi madre y a la memoria de mi padre.

Agradecimientos

A mi familia por su apoyo y cariño a pesar de la distancia.

Al Dr. Javier Helenes Escamilla por compartir sus conocimientos, por ser un buen director de tesis y un ser humano increíble.

A mi comité de tesis por sus comentarios, sugerencias, correcciones y disponibilidad.

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE).

Al personal Académico, técnico y administrativo por la cordialidad y el apoyo.

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por el financiamiento económico para la elaboración de este estudio de maestría.

Al Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación de Colombia - Minciencias y a la Agencia Nacional de Hidrocarburos - ANH por permitir el estudio del material de los pozos.

Al Instituto de Investigaciones en Estratigrafía (IIES) de la Universidad de Caldas Colombia por el procesamiento palinológico de las muestras para este trabajo.

A mis amigos y compañeros dentro y fuera de CICESE por estar siempre y por los buenos momentos compartidos que perduraran en mi memoria.

Tabla de contenido

	Página
Resumen en español.....	ii
Resumen en inglés.....	iii
Dedicatoria	iv
Agradecimientos.....	v
Lista de figuras.....	viii
Lista de tablas	x
Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1 Características importantes de los dinoflagelados	1
1.2 Antecedentes	3
1.2.1 Marco climático.....	3
1.2.2 Conocimiento de condiciones fósiles.....	3
1.3 Hipótesis.....	4
1.4 Objetivos	4
1.4.1 Objetivo general.....	4
1.4.2 Objetivos específicos.....	4
Capítulo 2. Metodología.....	5
2.1 Localización y litología de los pozos estudiados	5
2.1.1 Marco geológico.....	7
2.1.2 Cuenca Cesar Ranchería	7
2.1.3 Cordillera Oriental.....	8
2.2 Procesamiento palinológico.....	9
2.3 Análisis microscópico	9
2.4 Bioestratigrafía.....	10
2.5 Análisis estadísticos.....	10
Capítulo 3. Resultados	11
3.1 Análisis cuantitativos y cualitativos de dinoflagelados	11

3.1.1 Pozo ANH-CR-MONTECARLO-1X	11
3.1.2 Pozo ANH-CON-06-ST-S.....	15
Capítulo 4. Discusión.....	18
4.1 Bioestratigrafía	18
4.2 Paleobatimetría.....	23
4.3 Transgresiones marinas del Albiano	26
4.4 Interpretación Climática.....	27
Capítulo 5. Conclusiones	29
Literatura citada	30
Anexos	36

Lista de figuras

Figura	Página
1. Ciclo de vida de los dinoflagelados (Modificado de Evitt, 1985)	1
2. Mapa de localización de Colombia, las tres cordilleras Andinas (Occidental, Central y Oriental) y los pozos de donde se tomaron las muestras de núcleo para este estudio (Modificado de Saenz, 2003).	5
3. Litología de los pozos ANH-CR-MONTECARLO-1X (Cuenca Cesar Ranchería) y ANH-CON-06-ST-S (Cordillera Oriental), las flechas indican la posición de las muestras analizadas en este trabajo.	6
4. Estratigrafía de la cuenca Cesar Ranchería. La unidad estudiada corresponde a la Formación Lagunitas. (Tomado de García <i>et al.</i> , 2007)	7
5. Columna estratigráfica generalizada de la Cuenca del Valle medio de Magdalena, incluyendo a la Formación Simití. Esta nomenclatura también se emplea en el borde occidental de la Cordillera Oriental, donde fue perforado el pozo ANH-CON-06-ST-S. Adaptado de Morales <i>et al.</i> (1958), Bueno (1986), Govea y Aguilera (1986), Mojica y Franco (1992), Royero y Clavijo (2001)	8
6. Concentración de quistes de dinoflagelados totales, heterótrofos y autótrofos por gramo de sedimento seco del pozo ANH-CR-MONTECARLO-1X. Líneas negras punteadas indican los valores promedio	14
7. Concentración de quistes de dinoflagelados totales, heterótrofos y autótrofos por gramo de sedimento seco del pozo ANH-CON-06-ST-S. Líneas negras punteadas indican los valores promedio	17
8. Rango de edades reportado en la literatura, de las especies de dinoflagelados encontrados en el Pozo ANH-CR-MONTECARLO-1X, ubicado en la cuenca Cesar Ranchería. Las edades en millones de años (Ma) corresponden a la Carta Cronoestratigráfica Internacional (CCI; Cohen <i>et al.</i> , 2013). Las barras verdes representan a las especies autótrofas (<i>Tenua hyst</i> = <i>Tenua hystrix</i> , <i>Circulo distinc</i> = <i>Circulodinium distinctum</i> , <i>Polystep euryant</i> = <i>Polystephanephorus euryanthus</i> , <i>Oligo compl</i> = <i>Oligosphaeridium complex</i> , <i>Tanyos regul</i> = <i>Tanyosphaeridium regulare</i> , <i>Oligo asterig</i> = <i>Oligosphaeridium asterigerum</i> , <i>Cribo muderon</i> = <i>Cribroperidinium muderongense</i> , <i>Coro oceá</i> = <i>Coronifera oceánica</i> , <i>Tanyos variec</i> = <i>Tanyosphaeridium variecalamus</i> , <i>Tanyos xanthiopy</i> = <i>Tanyosphaeridium xanthiopyxides</i> , <i>Dapsi? duma</i> = <i>Dapsilidinium? duma</i> , <i>Oligo pocul</i> = <i>Oligosphaeridium poculum</i> , <i>Pseudoc securig</i> = <i>Pseudoceratium securigerum</i> , <i>Hystrich tubifer</i> subsp. <i>brev</i> = <i>Hystrichosphaeridium tubiferum</i> subsp. <i>brevispinum</i> , <i>Oligo compl brev</i> = <i>Oligosphaeridium complex brevispinum</i> , <i>Psaligon defland</i> = <i>Psaligonyaulax deflandrei</i> , <i>Cribo intric</i> = <i>Cribroperidinium intricatum</i> , <i>Cyclonep vannop</i> = <i>Cyclonephelium vannophorum</i> , <i>Glaphyr espirit</i> = <i>Glaphyrocysta espiritosantensis</i>) y las rojas a las heterótrofas (<i>Mude simplx</i> = <i>Muderongia simplex</i> , <i>Mude endov</i> = <i>Muderongia endovata</i> , <i>Subt senegal</i> = <i>Subtilisphaera senegalensis</i> , <i>Mude austra</i> = <i>Muderongia australis</i> , <i>Subt cf. pirnaen</i> = <i>Subtilisphaera cf. pirnaensis</i>).....	18

9. Rango de edades reportado en la literatura, de las especies de dinoflagelados encontrados en el Pozo ANH-CON-06-ST-S, ubicado en la Cordillera Oriental de Colombia. Las edades en millones de años (Ma) corresponden a la Carta Cronoestratigráfica Internacional (CCI; Cohen *et al.*, 2013). Las barras verdes representan a las especies autótrofas (*Circulo brevis*= *Circulodinium brevispinatum*, *Oligo pulcherri*= *Oligosphaeridium pulcherrimum*, *Circulo distinc*= *Circulodinium distinctum*, *Oligo cf. compl*= *Oligosphaeridium cf. complex*, *Oligo asterig*= *Oligosphaeridium asterigerum*, *Coro oceá*= *Coronifera oceánica*, *Coro alber*= *Coronifera albertii*, *Oligo compl brev*= *Oligosphaeridium complex brevispinum*, *Coro monst*= *Coronifera monstrosa*, *Spinif aff. aracaj*= *Spiniferites aff. aracajuensis*) y las rojas a las heterótrofas (*Subt senegal*= *Subtilisphaera senegalensis*, *Mude impari*= *Muderongia imparilis*, *Subt pirnaen*= *Subtilisphaera pirnaensis*, *Palaeohys infusorio*= *Palaeohystrichophora infusorioides?*, *Odont diduc*= *Odontochitina diducta*) 19
10. Especies de dinoflagelados que establecen la edad del pozo ANH-CR-MONTECARLO-1X. En paréntesis se indican las edades de cada especie en millones de años, reportadas en la literatura y de acuerdo con la Carta Cronoestratigráfica Internacional (CCI; Cohen *et al.*, 2013) 21
11. Especies de dinoflagelados que establecen la edad del pozo ANH-CON-06-ST-S. En paréntesis se indican las edades de cada especie en millones de años, reportadas en la literatura y de acuerdo con la Carta Cronoestratigráfica Internacional (CCI; Cohen *et al.*, 2013) 22
12. Paleobatimetría del pozo ANH-CR-MONTECARLO-1X, litología y especies de dinoflagelados identificados. Los ambientes indicados son: C= Continental; T= Transicional; NI= Nerítico Interno; NM= Nerítico Medio y NE= Nerítico Externo 24
13. Paleobatimetría del pozo ANH-CON-06-ST-S, litología y especies de dinoflagelados identificados. Los ambientes indicados son: C= Continental; T= Transicional; NI= Nerítico Interno; NM = Nerítico Medio y NE= Nerítico Externo. 25
14. Concentraciones totales de dinoflagelados en los pozos ANH-CR-MONTECARLO-1X y ANH-CON-06-ST-S correlacionables con transgresiones marinas reportadas en el Albiano (Haq, 2014) 27
15. Fotografías de las especies y géneros identificados bajo el microscopio correspondientes al pozo ANH-CR-MONTECARLO-1X. Peridinales: 1-2: *Subtilisphaera cf. pirnaensis*, 3-4: *Subtilisphaera senegalensis*, 5: *Subtilisphaera sp.*, 6: *Trithyrodinium sp.*..... 40
16. Fotografías de las especies y géneros identificados bajo el microscopio correspondientes al pozo ANH-CON-06-ST-S. Peridinales: 1: *Palaeohystrichophora infusorioides?*, 2: *Subtilisphaera pirnaensis*, 3: *Subtilisphaera senegalensis*, 4: *Subtilisphaera cf. senegalensis*, 5: *Subtilisphaera sp.*, 6: *Subtilisphaera? sp.*..... 47

Lista de tablas

Tabla	Página
1 Parámetros promedios de los dinoflagelados identificados.....	11
2 Riqueza y abundancia de especies y géneros en las muestras del pozo ANH-CR-MONTECARLO-1X. En rojo se indican las especies heterótrofas y en verde las autótrofas	12
3 Conteos y concentraciones de quistes de dinoflagelados en muestras del pozo ANH-CR-MONTECARLO-1X. Los cuadros color rojo representa taxones heterótrofos y los verdes taxones autótrofos, por familia.....	13
4 Riqueza y abundancia de especies y géneros en las muestras del pozo ANH-CON-06-ST-S. En rojo se indican las especies heterótrofas y en verde las autótrofas	15
5 Conteos y concentraciones de quistes de dinoflagelados en muestras del pozo ANH-CON-06-ST-S. los cuadros color rojo representa taxones heterótrofos y los verdes taxones autótrofos, por familia	16
6 Conteos totales de especímenes por muestra de la columna sedimentaria del pozo ANH - CR-MONTECARLO-1X, Cuenca Cesar Ranchería, Colombia. Incluye el número de lycopodios contabilizados	36
7 Conteos totales de especímenes por muestra de la columna sedimentaria del pozo ANH-CON-06-ST-S, Cuenca Cesar Ranchería, Colombia. Incluye el número de lycopodios contabilizados	38

Capítulo 1. Introducción

1.1 Características importantes de los dinoflagelados

Los dinoflagelados son algas unicelulares acuáticas que producen estructuras pequeñas (20 a 200 μm). Su ciclo de vida incluye reproducción sexual y asexual, además de presentar un estadio móvil y otro sésil (Fig. 1). Ciertas especies se recubren por placas poligonales de celulosa llamadas tecas en la etapa móvil (Evitt, 1985), mientras que, en la etapa sésil, algunas generan quistes de resistencia hechos de un biopolímero orgánico denominado dinosporina (Bogus *et al.*, 2014). Estos quistes, que son el objeto de este estudio, poseen una alta resistencia y una morfología variada que los hacen muy útiles como indicadores bioestratigráficos y paleoecológicos.

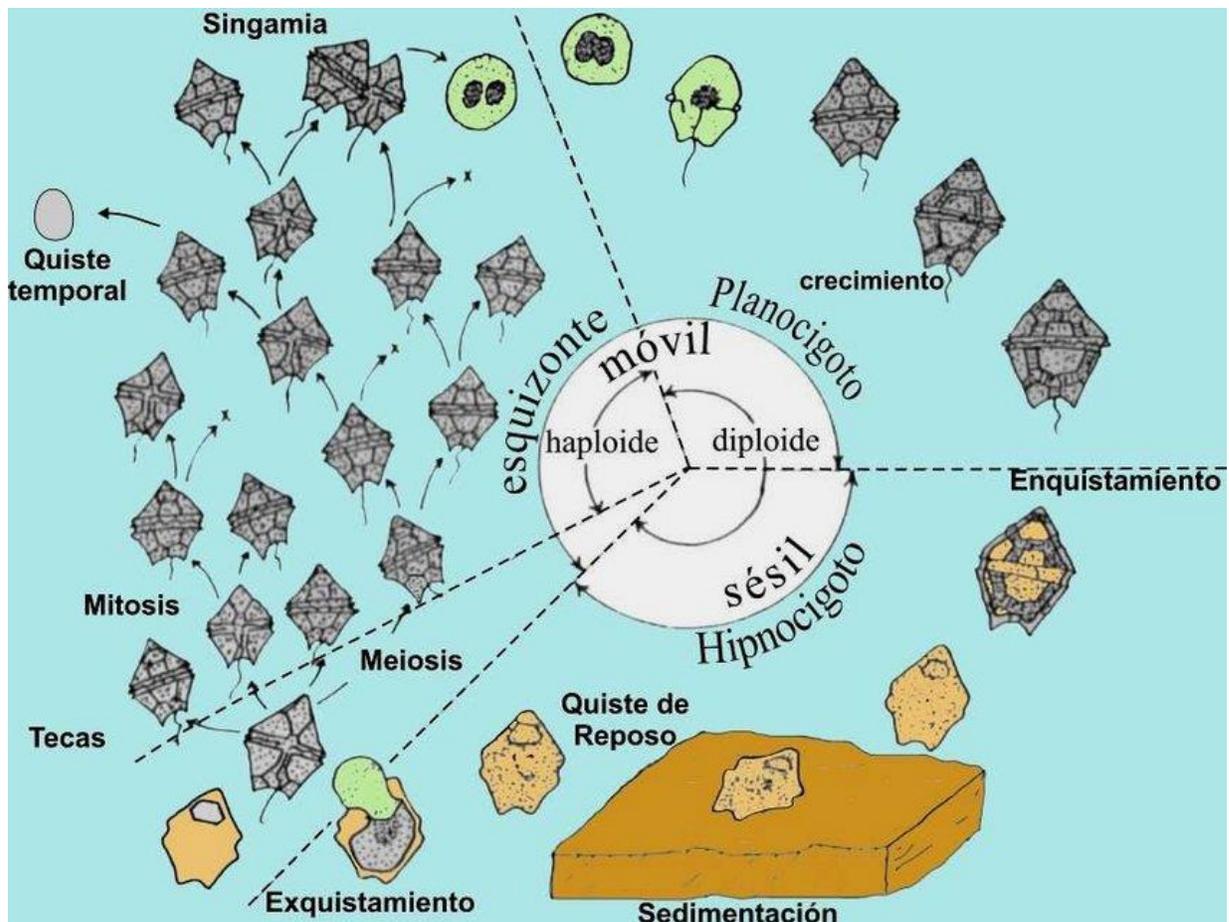


Figura 1. Ciclo de vida de los dinoflagelados (Modificado de Evitt, 1985).

Actualmente hay 96 especies que producen quistes de resistencia con paredes de dinosporina (Zonneveld y Pospelova, 2015). Estos quistes se pueden conservar en el fondo marino por periodos largos, permaneciendo viables hasta 100 años (Lundholm *et al.*, 2011; Kremp *et al.*, 2018). Su registro fósil empieza en el Triásico, hace más de 200 millones de años (Evitt, 1985; Fensome *et al.*, 1993). Los quistes de resistencia se depositan en el fondo marino y en condiciones favorables pueden eclosionar, o florecer para poblar la columna de agua (Bolch y Hallegraeff, 1990). Los principales factores favorables para dicho florecimiento son la concentración de nutrientes, la duración del día, la temperatura del agua y la intensidad de luz (Margalef, 1978). Los quistes suelen ser abundantes en los márgenes continentales (Stover *et al.*, 1996), donde se encuentran las áreas con mayor productividad primaria marina.

Los quistes de resistencia producidos por los dinoflagelados actuales son muy estudiados debido a su potencial como indicadores indirectos, o proxy de parámetros de la superficie del mar tales como: temperatura, salinidad y productividad. Por lo tanto, la preservación y estudio de estos quistes ayuda a reconstruir paleoambientes y proporciona información útil para interpretar las condiciones paleoceanográficas (Dale, 1996; Pospelova *et al.*, 2008; Flores - Trujillo *et al.*, 2009; Zegarra y Helenes, 2011).

De acuerdo con su estrategia trófica, los dinoflagelados se pueden agrupar en fotosintéticos o autótrofos y heterótrofos o no fotosintéticos (Taylor, 1987). Aproximadamente la mitad de los taxones que forman quistes de dinosporina son autótrofos, mientras que la otra mitad son heterótrofos que se alimentan principalmente de diatomeas y otros flagelados (Dale 1996; Jacobson y Anderson 1986). Las órdenes Gonyaulacales y Gymnodinales incluyen taxones autotróficos que producen quistes de resistencia, mientras que entre los heterotróficos predominan los quistes de la orden Peridinales (Zonneveld y Pospelova, 2015).

Concentraciones altas de quistes de dinoflagelados se encuentran cerca de áreas con alta productividad primaria (Sprangers *et al.*, 2004) y su abundancia refleja la cantidad de células planctónicas (Matsuoka y Fukuyo 1994; Peña – Manjarrez *et al.*, 2001; Morquecho *et al.*, 2012). Hay una relación directa entre la concentración de quistes en el sedimento y la abundancia de formas planctónicas en la columna de agua (de Vernal *et al.*, 2020), lo que puede ser un proxy de productividad primaria marina. La relación entre taxones autótrofos y heterótrofos se ha usado como indicador indirecto de productividad marina (Harland, 1973; Prauss, 2002; Reichart y Brinkhuis, 2003). Debido a que el registro fósil contiene solo quistes de resistencia de dinoflagelados, en este trabajo me referiré a ellos como dinoflagelados, o como quistes.

1.2 Antecedentes

1.2.1 Marco climático

El cambio climático actual ha ocasionado aumentos en tres factores importantes: la productividad primaria marina (Chavez *et al.*, 2011), los niveles de hipoxia (Rabalais *et al.*, 2009), y la intensidad y frecuencia de florecimientos algales nocivos (FANs) (Anderson *et al.*, 2002; Bauman *et al.*, 2010). En particular, los efectos nocivos de los FANs van desde muerte de peces, mamíferos y aves por intoxicación, hasta anoxia por proliferaciones extremas (Anderson *et al.*, 2002). Además, el aumento de FANs en regiones tropicales está afectando la biota local (Bauman *et al.*, 2010). Entre los organismos tóxicos se encuentran 196 especies de microalgas (Moestrup *et al.*, 2009) de las cuales el 56 % (104 especies) son dinoflagelados. De las 104 especies tóxicas, 66 (37 %) son consideradas autotróficas asignadas a las órdenes Gonyaulacales (47 spp.) y Gymnodiniales (16 spp.), mientras que la orden heterotrófica Peridinales solo incluye 2 especies tóxicas. La mayoría de las especies que producen quistes de resistencia y potencialmente tóxicas pertenecen a las ordenes autotróficas Gonyaulacales y Gymnodiniales.

El Cretácico Inferior se caracterizó por altas temperaturas superficiales del océano (Ludvigson *et al.*, 2010; Li *et al.*, 2013) y la presencia de eventos anóxicos frecuentes (Schlanger y Jenkins, 1976). Estas condiciones de invernadero parecen haber producido cambios importantes en la flora continental (Zhang *et al.*, 2018) y marina (Kaiho *et al.*, 2014). En la actualidad, variaciones similares en el contenido de oxígeno han sido detectadas en áreas tropicales del Atlántico y Pacífico (Stramma *et al.*, 2008), junto con el aumento global de la temperatura superficial del océano (Levitus, *et al.*, 2000) desde aproximadamente 1950. En estas condiciones, los conjuntos de dinoflagelados del Cretácico pueden representar un ejemplo de las tendencias de este grupo de microalgas, a las condiciones actuales de calentamiento global.

1.2.2 Conocimiento de condiciones fósiles

Quistes de dinoflagelados fósiles del Mesozoico y Cenozoico han sido ampliamente estudiados en localidades de latitudes medias a altas, mientras que hay poca información sobre localidades tropicales de estas eras. El contenido de quistes de dinoflagelados en sedimentos de localidades tropicales contiene información importante sobre la evolución de este grupo de microalgas en su adaptación a condiciones de invernadero, potencialmente similares a las que tendremos en el futuro de seguir la tendencia actual.

1.3 Hipótesis

Las características tróficas de los conjuntos de quistes de dinoflagelados del intervalo Albiano - Cenomaniano en Colombia, representan un alto índice H-A, relacionado con alta productividad primaria marina y una alta diversidad de taxones autotróficos potencialmente tóxicos.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Documentar cuantitativamente los conjuntos de quistes de dinoflagelados del intervalo Albiano – Cenomaniano de Colombia, para establecer las edades y paleoambientes de sedimentación de las secciones muestreadas y determinar el significado paleoecológico de los taxones observados.

1.4.2 Objetivos específicos

- ✚ Identificar quistes de dinoflagelados de 50 muestras de núcleo de los pozos ANH-CR-MONTECARLO-1X y ANH-CON-06-ST-S.
- ✚ Determinar las edades de los conjuntos de dinoflagelados.
- ✚ Identificar características vinculadas a las estrategias tróficas de los conjuntos de quistes de dinoflagelados.
- ✚ Comparar las características de los conjuntos de quistes de dinoflagelados con conjuntos similares contemporáneos (Cretácico) y recientes.
- ✚ Interpretar el significado climático y el tipo de ambiente en el que se depositaron las muestras estudiadas.

Capítulo 2. Metodología

2.1 Localización y litología de los pozos estudiados

Para el desarrollo de este trabajo se analizaron 50 muestras de núcleo, 25 del pozo: ANH-CR-MONTECARLO-1X y 25 del pozo ANH-CON-06-ST-S. El pozo ANH-CR-MONTECARLO-1X se localiza en la Cuenca Cesar Ranchería, en las coordenadas: N (Y):1533166 m; E(X):1071624 m. El pozo ANH-CON-06-ST-S se ubica en la Cordillera Oriental de Colombia, en las coordenadas: N (Y): 1126562.65 m; E(X): 1037661.17 m (Fig. 2).

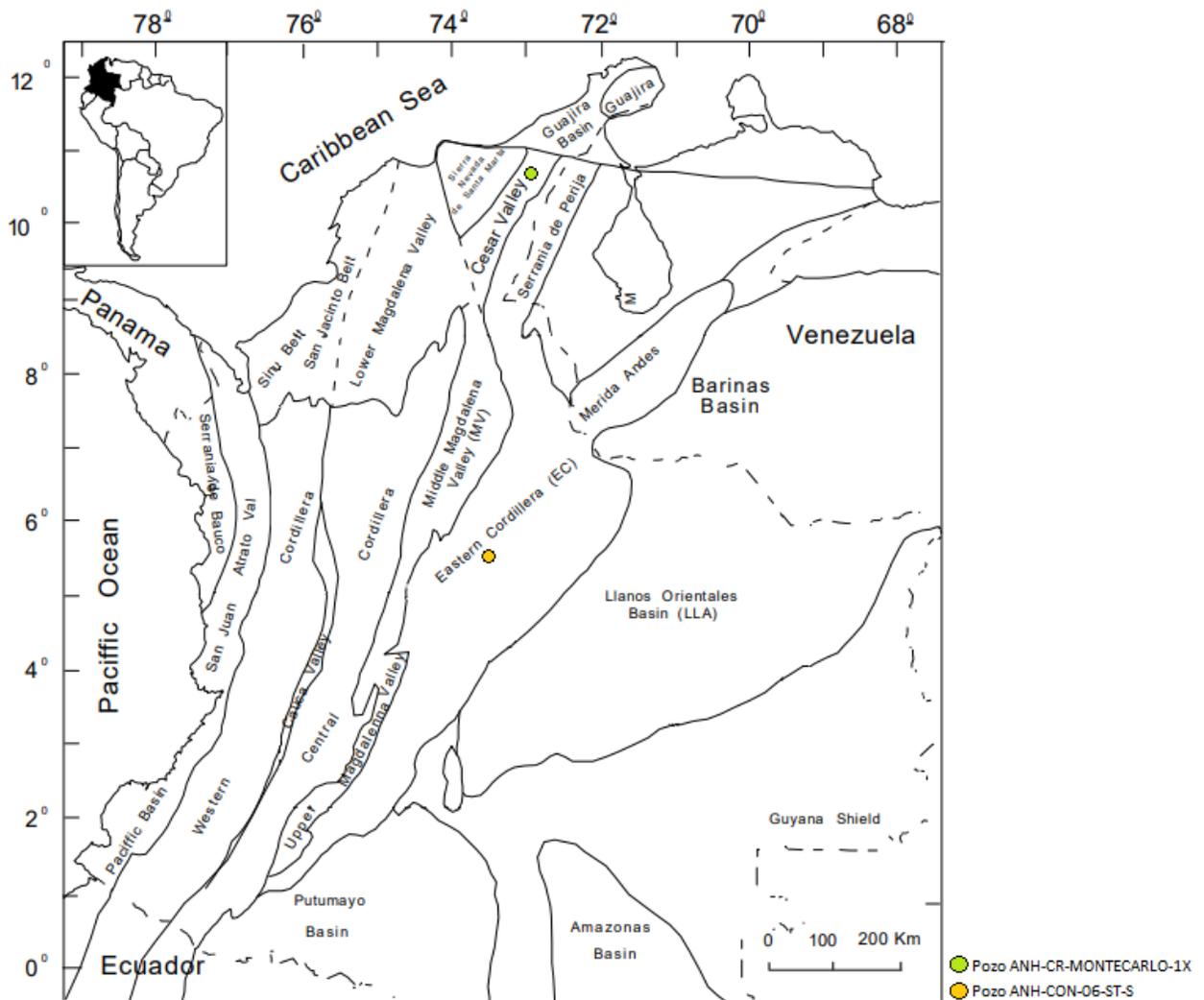


Figura 2. Mapa de localización de Colombia, las tres cordilleras Andinas (Occidental, Central y Oriental) y los pozos de donde se tomaron las muestras de núcleo para este estudio (Modificado de Sarmiento, 2001).

La profundidad total del pozo ANH-CR-MONTECARLO-1X es de 912.13 metros (m), pero para este estudio solamente se analizaron las muestras recuperadas entre los 82.83 m y 207.52 m. El pozo ANH-CON-06-ST-S se perforó a una profundidad de 449.70 m y se analizaron muestras recuperadas entre los 67.82 - 449.67 m es decir, se analizó casi la profundidad total recuperada (Fig. 3).

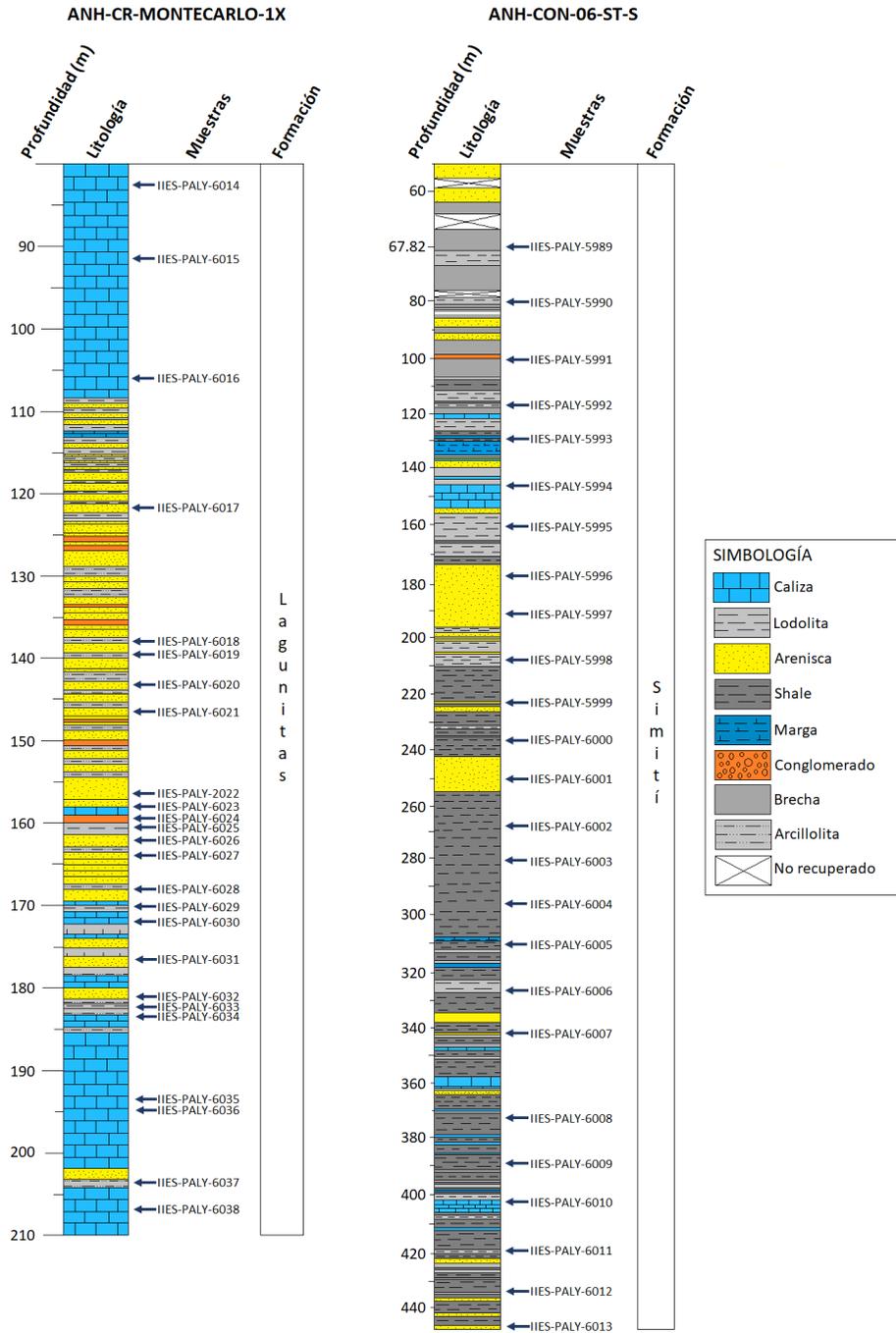


Figura 3. Litología de los pozos ANH-CR-MONTECARLO-1X (Cuenca Cesar Ranchería) y ANH-CON-06-ST-S (Cordillera Oriental), las flechas indican la posición de las muestras analizadas en este trabajo.

2.1.1 Marco geológico

Durante el Cretácico Temprano, se acumularon extensos depósitos marinos en la región central de la cordillera Oriental y el Valle Medio del Magdalena y se fue extendiendo progresivamente hasta alcanzar el Valle Superior e Inferior del Magdalena, la cuenca de Cesar Ranchería y los Llanos Orientales. La sedimentación marina somera terminó a finales del Cretácico debido a la disminución global del nivel del mar y a la actividad tectónica que dio como resultado el comienzo del levantamiento de los Andes.

2.1.2 Cuenca Cesar Ranchería

Las rocas cretácicas forman parte importante del relleno sedimentario de la cuenca del Cesar Ranchería localizada en el noreste de Colombia, entre la Sierra Nevada de Santa Marta y la Serranía de Perijá. Esta cuenca cubre un área de 11,630 km² y se subdivide en la subcuenca Cesar y la subcuenca Ranchería. La columna estratigráfica de la cuenca abarca desde el Precámbrico hasta el Cuaternario (Fig. 4). En particular, el Cretácico Inferior está representado por el grupo Cogollo que incluye las formaciones Lagunitas y Aguas Blancas. Este grupo está compuesto por una sucesión de calizas, lutitas carbonosas y en menor proporción areniscas, la sedimentación dominante es marina (García *et al.*, 2007). Las muestras de núcleo (ANH-CR-MONTECARLO-1X) que se analizaron en este estudio corresponden a la Formación Lagunitas.

		CUENCA DEL RANCHERIA	CUENCA DEL CESAR		
CENOZOICO	CUATERNARIO	ALUVIONES - TERRAZAS	ALUVIONES - TERRAZAS		
	TERCIARIO	PLIOCENO	CONJUNTO CONGLOMERATICO	CUESTA	
		MIOCENO	CONJUNTO CALCAREO		
		OLIGOCENO			
		EOCENO	TABACO		
		PALEOCENO	CERREJON MANANTIALES HATO NUEVO	CUERVOS BARCO	
	MESOZOICO	SUPERIOR	MOLINO	MOLINO	
			LA LUNA	LA LUNA	
		INFERIOR	GRUPO COGOLLO	GP COGOLLO	MARACAS AGUAS BLANCAS TOCUIY ANIMAS
					LAGUNITAS
				RIO NEGRO	
TRIASICO JURASICO	LA QUINTA				
PERMICO	MANAURE				
PALEOZOICO	CARBONIFERO	GRUPO CACHIRI	GRUPO CACHIRI		
	DEVONICO	PERIJA	PERIJA		
	ORDOVICIO				
	CAMBRICO				
PRECAMBRICO	GRANULITA DE LOS MANGOS				

Figura 4. Estratigrafía de la cuenca Cesar Ranchería. La unidad estudiada corresponde a la Formación Lagunitas. (Tomado de García *et al.*, 2007).

2.1.3 Cordillera Oriental

Las rocas sedimentarias cretácicas en Colombia afloran comúnmente en la Cordillera Oriental y el borde oriental del Valle del Magdalena. Los depósitos sedimentarios que constituyen la Cordillera Oriental van desde el Jurásico hasta el Cuaternario (Fig. 5). En este estudio, 25 de las 50 muestras utilizadas corresponden a la Formación Simití (ANH-CON-06-ST-S), la cual presenta espesores que varían entre 250 - 650 m y está conformada por lutitas grises a negras, carbonosas, localmente calcáreas, con concreciones calcáreas hasta de 3 m y con intercalaciones de areniscas y calizas grises, localmente arcillosas y fosilíferas, en capas delgadas. A esta unidad se le asigna un rango de edad entre Albiano tardío y Cenomaniano (Royero y Clavijo, 2001).

SISTEMA	SERIE	UNIDAD LITOESTRATIGRAFICA	SIMBOLO	LITOLOGIA	
Terciario	CUAT. HOLOCENO	GRUPO MESA	TQ		
		GRUPO REAL	Tmp		
	MIOCENO	GRUPO OLIGOCENO	FM. COLORADO	Tom	
			FM. MUGROSA	Teo	
		GRUPO EOCENO	FM. ESMERALDA	Tpe	
			FM. LA PAZ		
	PAL. EOCENO	FM. LISIANA			
	Cretácico	SUPERIOR	FM. UMIR	IKs	
			FM. LA LUNA	Kalc	
		INFERIOR	FM. SIMITI	Kbal	
FM. TABLAZO			TK		
FM. PAJA			Kbeh		
FM. ROSA BLANCA					
FM. CUMBRE					
FM. LOS SANTOS					
SUPERIOR		FM. GIRON	Js		

Figura 5. Columna estratigráfica generalizada de la Cuenca del Valle medio de Magdalena, incluyendo a la Formación Simití. Esta nomenclatura también se emplea en el borde occidental de la Cordillera Oriental, donde fue perforado el pozo ANH-CON-06-ST-S. Adaptado de Morales *et al.* (1958), Bueno (1986), Govea y Aguilera (1986), Mojica y Franco (1992), Royero y Clavijo (2001).

2.2 Procesamiento palinológico

Las 50 muestras de ambos pozos se procesaron con el tratamiento palinológico tradicional (Wood *et al.*, 1996), pero sin oxidación, para evitar destruir los palinomorfos. Además, a cada muestra se le agregó una tableta de esporas de *Lycopodium clavatum* para calcular la concentración de quistes por gramo de sedimento (qst/g sed).

El procesamiento completo incluye, pesar cada una de las muestras secas a procesar (gramos de sedimento seco). Agregar una pastilla de esporas de *L. clavatum* que funciona como un marcador exótico (Batch: 483216) para calcular la abundancia absoluta de dinoflagelados (Maher, 1981; Mertens *et al.*, 2009; 2012). Eliminar carbonatos mediante ácido clorhídrico (10%) y disgregar silicatos mediante ácido fluorhídrico (40%). Separar el material orgánico e inorgánico con politungstato de sodio de gravedad específica = 2.0. Tamizar y limpiar el residuo con mallas de 15 y 125 micras (μm). Finalmente, preparar y montar láminas delgadas en portaobjetos de 24 x 50 milímetros (mm) con gelatina glicerizada, sellada con resina óptica y secada con rayos ultravioleta (UV) para poder ser observadas al microscopio.

2.3 Análisis microscópico

Las 50 láminas preparadas se analizaron con la ayuda de dos microscopios ópticos de luz transmitida, CX31 y BX51 de la marca Olympus. Para analizar completamente cada lámina se realizaron aproximadamente 25 barridos de manera horizontal en cada una de las láminas. Estos análisis cuantitativos y cualitativos del contenido permiten calcular la diversidad y abundancia de taxones en cada muestra. En cada lámina se contó el contenido total de dinoflagelados, diferenciados por género y especie. La mala preservación de algunos quistes no permitió identificar la especie con certidumbre, es por ello que se empleó el uso de cf. (conferido), aff. (afín) y sp. (especie). También se contaron esporas de *L. clavatum* (marcador exótico), esporas, polen de angiospermas y de gimnospermas (bisacados). Los dinoflagelados se registraron con imágenes digitales en foco alto, foco medio y foco bajo (Anexo 3 y 4) para facilitar su identificación con ayuda de material bibliográfico.

La clasificación de cada dinoflagelado se basa en una descripción morfológica en donde se tomó en cuenta: forma general, tamaño (μm), relación quiste - teca, pared, estructuras externas, arqueópilo y tabulación. Posteriormente, en base a las características mencionadas anteriormente se asigna a que orden y a que familia (Peridiniaceae, Ceratiaceae, Gonyaulacaceae, Areoligeraceae) pertenecen siguiendo las

convenciones taxonómicas de Williams *et al.* (2017; Dinoflaj3). Después, se determina a que género pertenece cada espécimen (Stover y Evitt, 1978), (JanDuChene *et al.*, 1986), (Stover y Williams, 1987), (Fauconnier y Masure, 2004). Por último para identificar la especie correspondiente, se consultaron los catálogos de Eisenack (1964) que contienen imágenes y descripciones de los holotipos de especies de dinoflagelados.

2.4 Bioestratigrafía

Para establecer la edad de los dos pozos estudiados (ANH-CR-MONTECARLO-1X y ANH-CON-06-ST-S), se utilizaron las especies de dinoflagelados identificados. Se analizó la base de datos de Palynodata (Palynodata and White, 2008) para obtener el rango de edad de cada una de las especies identificadas y la edad en millones de años se obtuvo de la Tabla Cronoestratigráfica Internacional. Además se consideraron los rangos reportados en Helby *et al.* (1987), Williams y Bujak (1985) y Williams *et al.* (2004).

2.5 Análisis estadísticos

Con la información obtenida durante el análisis microscópico se generó una base de datos que contiene el número total de dinoflagelados por géneros y especies identificados en cada una de las 50 láminas y la cantidad total de esporas de *Lycopodium clavatum* (material exótico; anexo 1 y 2). Se analizó y se determinó la riqueza y abundancia por género y especie, y se calculó la estadística básica: promedio, concentración máxima, concentración mínima y desviación estándar. El cálculo de la abundancia absoluta de dinoflagelados (Maher, 1981; Mertens *et al.*, 2009; 2012) o concentración por gramo de sedimento seco, se realizó con la fórmula de Benninghoff (1962):

$$C = \frac{dc * Lt * t}{Lc * W} \quad (1)$$

En donde, **C**: Concentración de dinoflagelados por gramo de sedimento (seco), **dc**: Conteo total de dinoflagelados por lámina, **Lt**: Concentración de esporas de *Lycopodium clavatum* por tableta, **Lc**: Conteo total de esporas de *Lycopodium clavatum* por lámina, **t**: Cantidad de tabletas agregada y **W**: Peso del sedimento seco (g).

Capítulo 3. Resultados

3.1 Análisis cuantitativos y cualitativos de dinoflagelados

En la tabla 1 se muestra la estadística descriptiva promedio de los dinoflagelados observados en los pozos ANH-CON-06-ST-S y ANH-CR-MONTECARLO-1X de acuerdo a diferentes autores.

Tabla 1. Parámetros promedios de los dinoflagelados identificados.

Parámetros Promedios	ANH-CON-06-ST-S	ANH-CR-MONTECARLO-1X
Concentración (q / gr sed)	2,857.1	643.8
Abundancia (# especímenes)	22.7	36.8
Riqueza Spp.	2.84	2.84
Simpson	0.68	0.63
Shannon	1.15	0.91
Margalef	1.44	1.07

3.1.1 Pozo ANH-CR-MONTECARLO-1X

En este pozo se identificaron 20 géneros y 24 especies. De las 24 especies 2 son de la familia Peridiniaceae, 3 Ceratiaceae, 15 Gonyaulacaceae y 4 Areoligeraceae. De los taxones identificados, hay 4 géneros heterótrofos (5 especies) y 16 autótrofos (19 especies). Los heterótrofos tienen menor riqueza de especies y géneros pero, son los grupos con mayor abundancia y los autótrofos tienen una mayor riqueza de especies y géneros pero tiene una menor abundancia en las muestras analizadas. Los Peridinales, incluyen 2 especies que representan el 8.3% del total y su abundancia es el 34.9%, los Ceratiales tienen 3 especies que representa el 12.5% y su abundancia es de 51.7%. Los Gonyaulacales tienen 15 especies que

representan el 62.5% del total y su abundancia es de 12.5%, los Areoligeroideos tiene 4 especies que representan el 16.7% y su abundancia es de solo 0.9% (Tabla 2).

Tabla 2. Riqueza y abundancia de especies y géneros en las muestras del pozo ANH-CR-MONTECARLO-1X. En rojo se indican las especies heterótrofas y en verde las autótrofas.

Riqueza		Abundancia
Familias (num. especies / %)	Num. géneros (%)	Total de especímenes (%)
Peridiniaceae (2 / 8.3)	2 (10)	321 (34.9)
Ceratiaceae (3 / 12.5)	2 (10)	476 (51.7)
Gonyaulacaceae (15 / 62.5)	12 (60)	115 (12.5)
Areoligeraceae (4 / 16.7)	4 (20)	8 (0.9)

En el pozo ANH-CR-MONTECARLO-1X (Tabla 3), la recuperación de quistes de dinoflagelados va de estéril a buena al igual que la preservación de estos, con un promedio de 36.8 especímenes por muestra que representan 24 taxones de dinoflagelados.

Los conjuntos de quistes están dominados por las formas ceratioideas, con un conteo promedio de 19.04 especímenes, valor máximo de 467 y mínimo de 0. El valor máximo se observa en la muestra IIES-PALY-6021 que contiene 411 quistes de *Muderongia* sp., 50 de *Muderongia australis*, 1 de *Muderongia simplex* y 5 de *Odontochitina?* sp. Estas formas ceratioideas representan también el mayor promedio en concentración de quistes con un 269.89 q/gr sed, alcanzando un máximo de 6,384.83 q/gr sed y un mínimo de 0 q/gr sed.

Los peridinoideos son el segundo grupo de mayor promedio en conteos con un valor de 12.84 especímenes por muestra, un valor máximo de 302 y un mínimo de 0 (muestras estériles). Además presentan un promedio de concentración de 253.96 q/gr sed, un valor máximo de 5,491.26 q/gr sed y un valor mínimo de 0 q/gr sed. El valor máximo lo presenta la muestra IIES-PALY-6015 que contiene 161

quistes de *Subtilisphaera* sp., 74 *Subtilisphaera senegalensis*, 42 de *Subtilisphaera* cf., *pirnaensis* y 25 de *Trithyrodinium* sp.

Tabla 3. Conteos y concentraciones de quistes de dinoflagelados en muestras del pozo ANH-CR-MONTECARLO-1X. Los cuadros color rojo representa taxones heterótrofos y los verdes taxones autótrofos, por familia.

Parámetros	Conteos				
	Peridiniaceae	Ceratiaceae	Gonyaulacaceae	Aeroligeraceae	Total
Promedio	12.84	19.04	4.6	0.32	36.8
Max	302	467	22	4	795
Min	0	0	0	0	0
Desv. Est.	59.09	91.45	5.80	0.97	157.31
Concentración (qst/g sed)					
Promedio	253.96	269.89	114.64	5.35	643.84
Max	5,491.26	6,384.83	683.94	61.19	6,480.53
Min	0	0	0	0	0
Desv. Est.	1,075.04	1,249.93	160.76	15.26	1,631.39

En el pozo ANH-CR-MONTECARLO-1X, la concentración total de dinoflagelados (qst/g sed) en las muestras tiene un promedio de 24.92 qst/g sed, valor mínimo de 3.20 qst/g sed y alcanza el máximo de 1,441 qst/g sed (IIES-PALY-6015), el cual se debe a la abundante presencia de *Subtilisphaera* sp. Diez de las muestras se encuentran por encima del valor promedio, mientras que nueve muestras tienen valores menores a la media (Fig. 6).

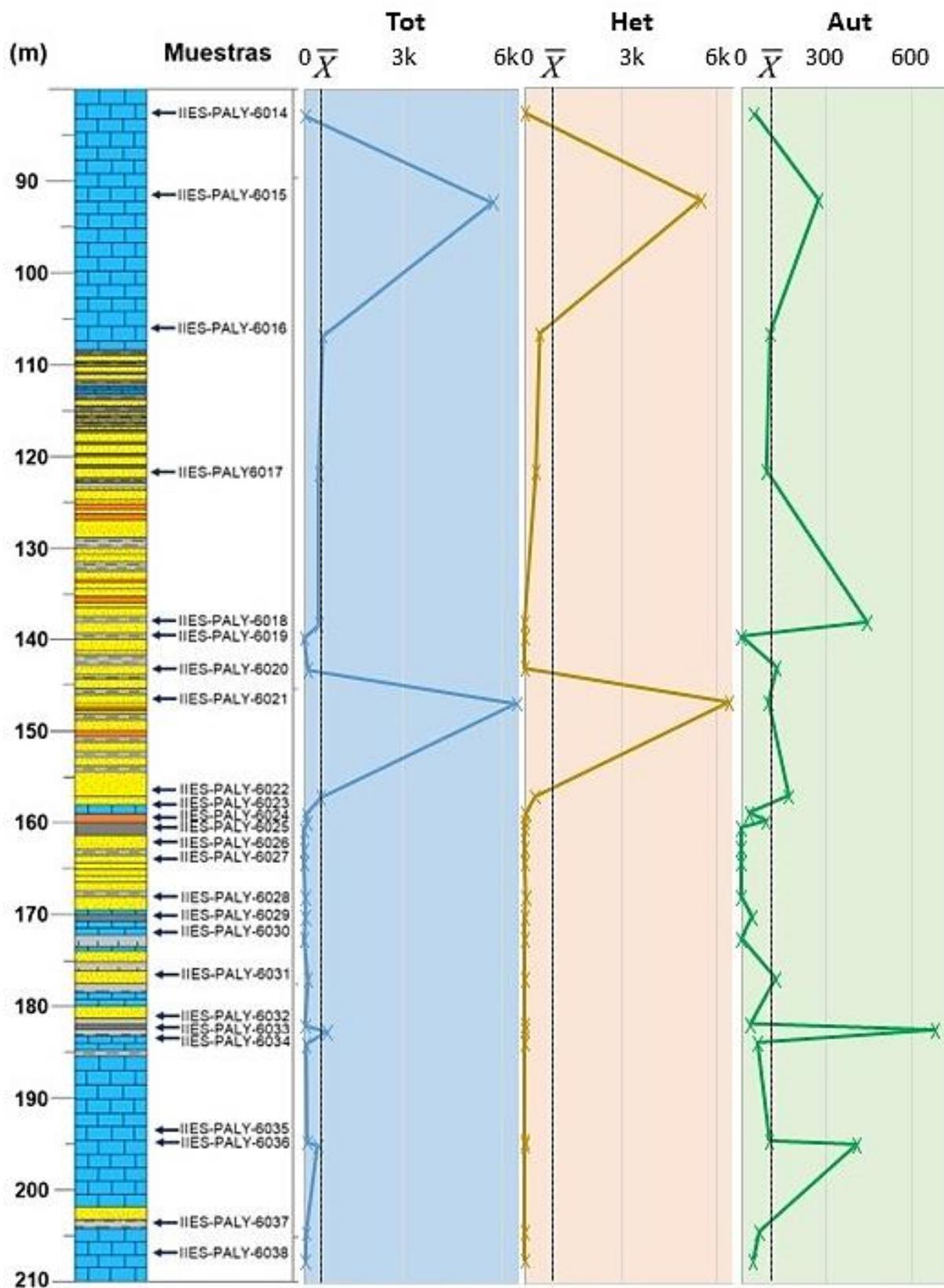


Figura 6. Concentración de quistes de dinoflagelados totales, heterótrofos y autótrofos por gramo de sedimento seco del pozo ANH-CR-MONTECARLO-1X. Líneas negras punteadas indican los valores promedio.

3.1.2 Pozo ANH-CON-06-ST-S

En este pozo se encontraron 16 géneros y 15 especies. De las 15 especies 3 son de la familia Peridiniaceae, 2 Ceratiaceae, 8 Gonyaulacaceae y 2 Areoligeraceae. Entre los taxones identificados, hay 4 géneros heterótrofos (5 especies) y 12 autótrofos (10 especies). En cuanto a los heterótrofos, los Peridiniales, incluyen 3 especies (20% del total) y su abundancia relativa es el 76.9%, mientras que los Ceratiales tiene solamente 2 especies (13.3%) y su abundancia relativa es de solo 0.9%. Con respecto a los autótrofos, los Gonyaulacales tienen 8 especies (53.3% del total) y su abundancia relativa de 20.8%, mientras que los Areoligeráceos tienen 2 especies (13.3%) y su abundancia relativa es de 1.2% (Tabla 4).

Tabla 4. Riqueza y abundancia de especies y géneros en las muestras del pozo ANH-CON-06-ST-S. En rojo se indican las especies heterótrofas y en verde las autótrofas.

Riqueza		Abundancia
Familias (num. especies / %)	Num. géneros (%)	Total de especímenes (%)
Peridiniaceae (3 / 20)	2 (12.5)	436 (76.9)
Ceratiaceae (2/ 13.3)	2 (12.5)	5 (0.9)
Gonyaulacaceae (8 / 53.3)	9 (56.3)	118 (20.8)
Areoligeraceae (2/ 13.3)	3 (18.8)	7 (1.2)

En el pozo ANH-CON-06-ST-S, la recuperación de quistes va de estéril a buena (Tabla 5), pero la preservación de muchos especímenes es mala. Se contó un promedio de 22.68 especímenes por muestras, los cuales representan 15 especies. Los ensamblajes de quistes están dominados por las formas peridinoideas con un promedio de conteos de 17.44, un máximo de 247, un mínimo de 0 y concentraciones de quistes con un promedio de 2,086.30 q/gr sed, un valor máximo de 22,565.07 q/gr sed y un mínimo de 0 q/gr sed. El valor máximo se encuentra en la muestra IIES-PALY-6011, con un total de 247 quistes de los cuales, 215 son de *Subtilisphaera senegalensis*, 24 de *Palaeohystrichophora infusorioides*, 7 de *Subtilisphaera pirnaensis* y una de *Subtilisphaera* sp.

Tabla 5. Conteos y concentraciones de quistes de dinoflagelados en muestras del pozo ANH-CON-06-ST-S. Los cuadros color rojo representa taxones heterótrofos y los verdes taxones autótrofos, por familia.

Parámetros	Conteos				
	Peridiniaceae	Ceratiaceae	Gonyaulacaceae	Aeroligeraceae	Total
Promedio	17.44	0.2	4.76	0.28	22.68
Max	247	2	26	3	278
Min	0	0	0	0	0
Desv. Est.	47.86	0.49	6.86	0.72	55.93
Concentración (qst/g sed)					
Promedio	2,086.30	14.00	739.64	31.19	2,857.13
Max	22,565.07	273.28	9,291.5	673.3	31,856.57
Min	0	0	0	0	0
Desv. Est.	4,802.73	53.57	1,879.13	131.52	6,489.37

Para el pozo ANH-CON-06-ST-S la concentración total de dinoflagelados (qst/g sed), tiene un promedio de 84.62 qst/g sed, valor mínimo es de 1.47 qst/g sed (IIES-PALY-6013) y el valor máximo es de 3,539.62 qst/g sed (IIES-PALY-5995), lo que se debe a la presencia abundante de *Sutilisphaeras*. Diez de las muestras tienen valores mayores al promedio y nueve tienen valores por debajo de la media (Fig. 7).

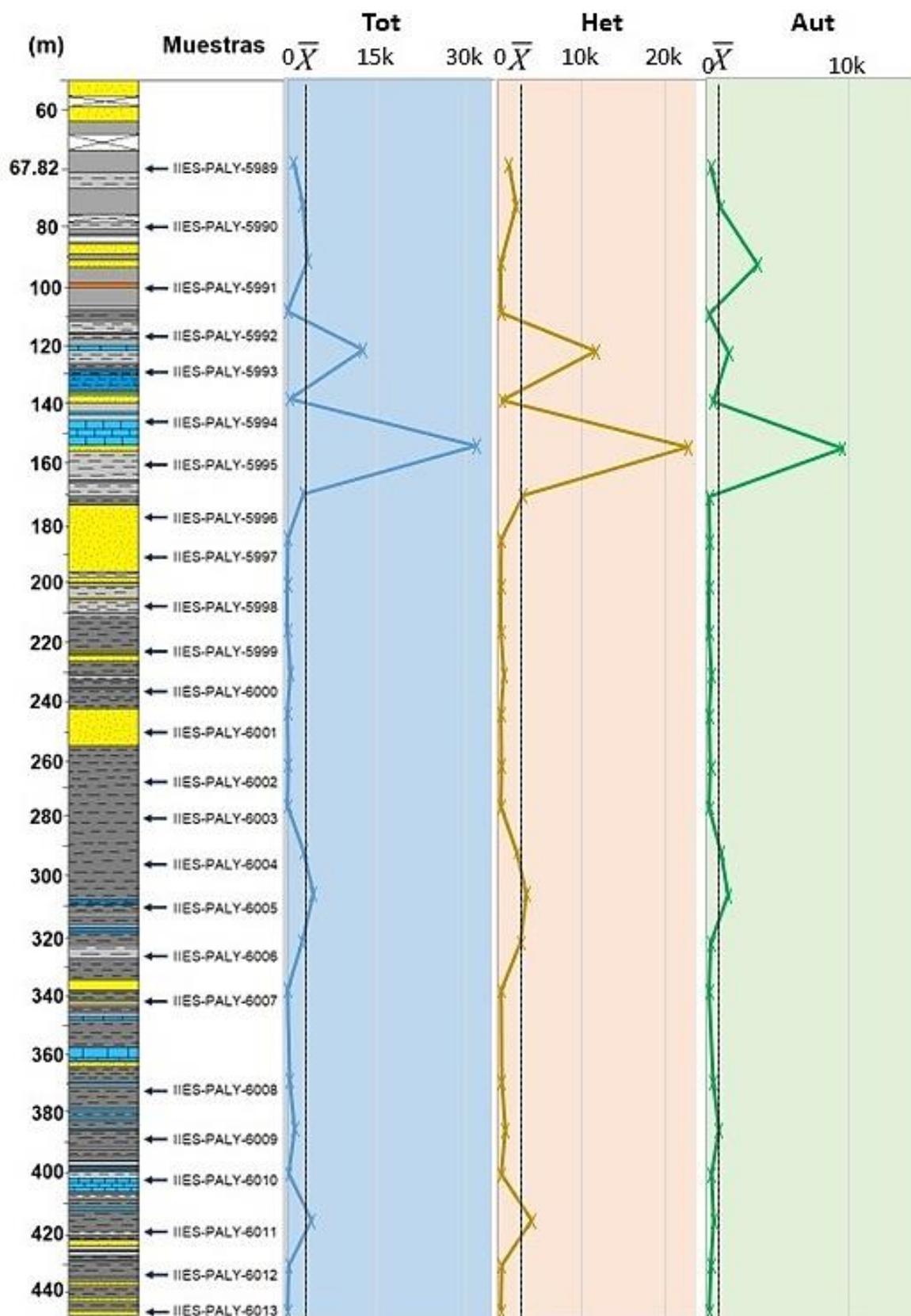


Figura 7. Concentración de quistes de dinoflagelados totales, heterótrofos y autótrofos por gramo de sedimento seco del pozo ANH-CON-06-ST-S. Líneas negras punteadas indican los valores promedio.

Capítulo 4. Discusión

4.1 Bioestratigrafía

Los resultados palinológicos obtenidos junto con el análisis de material bibliográfico y de las técnicas estadísticas fueron empleados para determinar edades, e interpretar paleoambientes y el significado paleoecológico de los grupos de dinoflagelados encontrados. Reportes de las especies identificadas indican un rango de edad confiable para cada especie identificada, lo que ayudo a establecer la edad de cada muestra y por ende de los intervalos estudiados (Fig. 8 y 9).

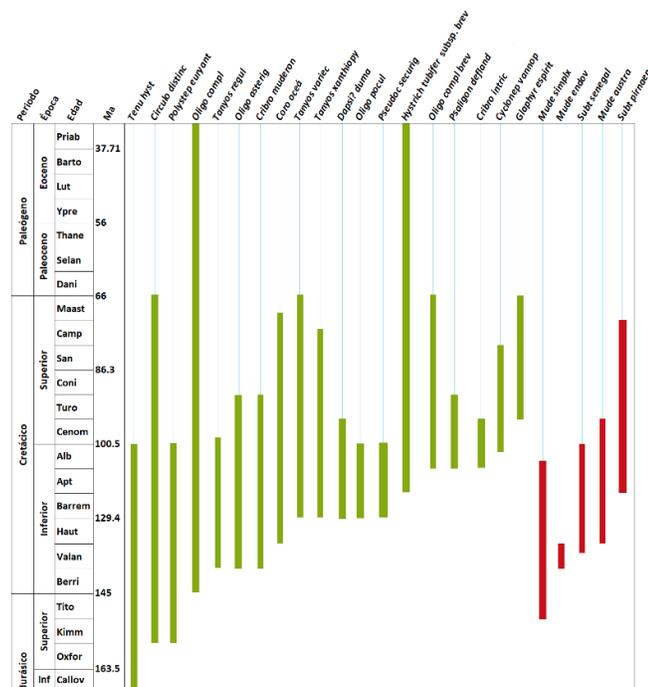


Figura 8. Rango de edades reportado en la literatura, de las especies de dinoflagelados encontrados en el Pozo ANH-CR-MONTECARLO-1X, ubicado en la cuenca Cesar Ranchería. Las edades en millones de años (Ma) corresponden a la Carta Cronoestratigráfica Internacional (CCI; Cohen *et al.*, 2013). Las barras verdes representan a las especies autótrofas (*Tenua hyst*= *Tenua hystrich*, *Circulo distinc*= *Circulodinium distinctum*, *Polystep euryant*= *Polystephanophorus euryanthus*, *Oligo compl*= *Oligosphaeridium complex*, *Tanyos regul*= *Tanyosphaeridium regulare*, *Oligo asterig*= *Oligosphaeridium asterigerum*, *Cribo muderon*= *Cribopteridinium muderonense*, *Coro oceá*= *Coronifera oceánica*, *Tanyos variec*= *Tanyosphaeridium variecalamus*, *Tanyos xanthiopy*= *Tanyosphaeridium xanthiopyxides*, *Dapsi? duma*= *Dapsilidinium? duma*, *Oligo pocul*= *Oligosphaeridium poculum*, *Pseudoc securig*= *Pseudoceratium securigerum*, *Hystrich tubifer* subsp. *brev*= *Hystrichosphaeridium tubiferum* subsp. *brevispinum*, *Oligo compl brev*= *Oligosphaeridium complex brevispinum*, *Psaligon defland*= *Psaligonyaulax deflandrei*, *Cribo intric*= *Cribopteridinium intricatum*, *Cyclonep vannop*= *Cyclonephelium vannophorum*, *Glaphyr espirit*= *Glaphyrocysta espiritosantensis*) y las rojas a las heterótrofas (*Mude simplx*= *Muderongia simplex*, *Mude endov*= *Muderongia endovata*, *Subt senegal*= *Subtilisphaera senegalensis*, *Mude austra*= *Muderongia australis*, *Subt cf. pirnaen*= *Subtilisphaera cf. pirnaensis*).

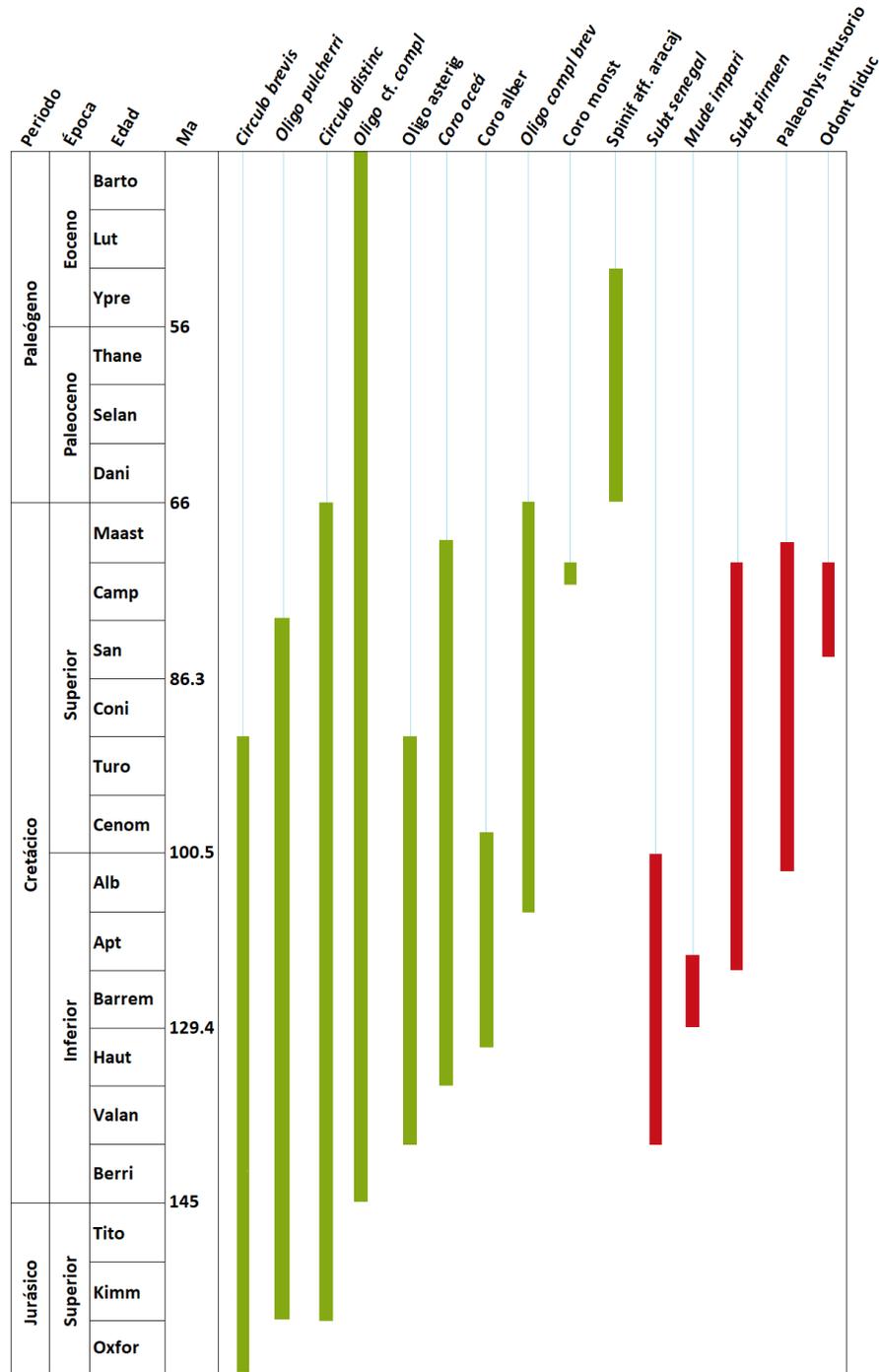


Figura 9. Rango de edades reportado en la literatura, de las especies de dinoflagelados encontrados en el Pozo ANH-CON-06-ST-S, ubicado en la Cordillera Oriental de Colombia. Las edades en millones de años (Ma) corresponden a la Carta Cronoestratigráfica Internacional (CCI; Cohen *et al.*, 2013). Las barras verdes representan a las especies autótrofas (*Circulo brevis*= *Circulodinium brevispinatum*, *Oligo pulcherri*= *Oligosphaeridium pulcherrimum*, *Circulo distinc*= *Circulodinium distinctum*, *Oligo cf. compl*= *Oligosphaeridium cf. complex*, *Oligo asterig*= *Oligosphaeridium asterigerum*, *Coro ocea*= *Coronifera oceánica*, *Coro alber*= *Coronifera albertii*, *Oligo compl brev*= *Oligosphaeridium complex brevispinum*, *Coro monst*= *Coronifera monstruosa*, *Spinif aff. aracaj*= *Spiniferites aff. aracajuensis*) y las rojas a las heterótrofas (*Subt senegal*= *Subtilisphaera senegalensis*, *Mude impari*= *Muderongia imparilis*, *Subt pirnaen*= *Subtilisphaera pirnaensis*, *Palaeohys infusorio*= *Palaeohystrichophora infusorioides?*, *Odont diduc*= *Odontochitina diducta*).

La recuperación de quistes en los intervalos basales de ambos pozos fue escasa y de muy baja diversidad, además los taxones observados están mal preservados y solo se pueden identificar especímenes de *Oligosphaeridium* sp. Este género tiene un rango estratigráfico de Jurásico Tardío (163.5 Ma) a Eoceno medio (37.8 Ma). Considerando que la litología de estas partes de las secciones no varía con respecto a los intervalos inmediatamente suprayacentes, es razonable interpretar que las secciones representan depositación concordante durante el Cretácico Temprano, muy probablemente durante el Albiano.

En las muestras de cada pozo se observaron tanto las apariciones estratigráficamente más bajas y altas, como su distribución en las muestras intermedias. Esta información permite asignar una edad a cada muestra y finalmente a los intervalos estudiados. En el pozo ANH-CR-MONTECARLO-1X se identificaron 24 especies de dinoflagelados. De estas 24 especies, 12 indican la edad del intervalo estudiado en el pozo (Fig. 10). Tres de dichas especies; *Tenua hystrix*, *Pseudoceratium securigerum* y *Cyclonephelium vannophorum* tienen rangos que alcanzan hasta el Albiano tardío (107.6-100.5 Ma) y corresponden a la muestra más somera (IIES-PALY-6014). Los rangos de edad reportados de *Polystephanephorus euryanthus*, *Subtilisphaera senegalensis*, *Oligosphaeridium poculum*, *Psaligonyaulax deflandrei* y *Oligosphaeridium complex brevispinum* establecen una edad Albiano (113-100.5 Ma) para las muestras IIES-PALY-6015 y IIES-PALY-6020. Durante el período Aptiano – Albiano, las cuencas nororientales se caracterizaron por la presencia conspicua de quistes de dinoflagelados pertenecientes a *Subtilisphaera*, siendo *S. senegalensis* una de las especies más comunes (Arai *et al.*, 2000). En las muestras IIES-PALY-6021 y IIES-PALY-6022 las especies de *Cribooperidinium intricatum* y *Muderongia simplex* señalan una edad Albiano temprano (113-110.2 Ma). Las especies de *Oligosphaeridium complex brevispinum* y *Oligosphaeridium cf. complex* establecen un intervalo de edad Berriasiano a Albiano (145–113 Ma) para las muestras IIES-PALY-6033 y IIES-PALY-6037 y en la parte más profunda (IIES-PALY-6038) el género *Oligosphaeridium* sp. arroja una edad Oxfordiano a Albiano (163.5-100.5 Ma). Estos datos nos indica que la columna sedimentaria se depositó en un periodo no más joven que el Albiano tardío y no más antiguo que el Jurásico Superior.

En el pozo ANH-CON-06-ST-S se identificaron 15 especies de dinoflagelados para el análisis bioestratigráfico. La aparición conjunta de *Subtilisphaera senegalensis* y *Palaeohystrichophora infusorioides* reportan una edad Albiano tardío (107-100.5 Ma) desde la muestra IIES-PALY-5989 hasta la muestra IIES-PALY-6011 y en la parte más profunda, las muestras IIES-PALY-6012 y IIES-PALY-6013 el género *Oligosphaeridium* sp. indica una edad Oxfordiano a Albiano (163.5-100.5 Ma) igual que en el pozo ANH-CR-MONTECARLO-1X. Así que, la edad más joven de la columna sedimentaria es Albiano tardío y la edad más antigua es Jurásico Superior (Fig. 11).

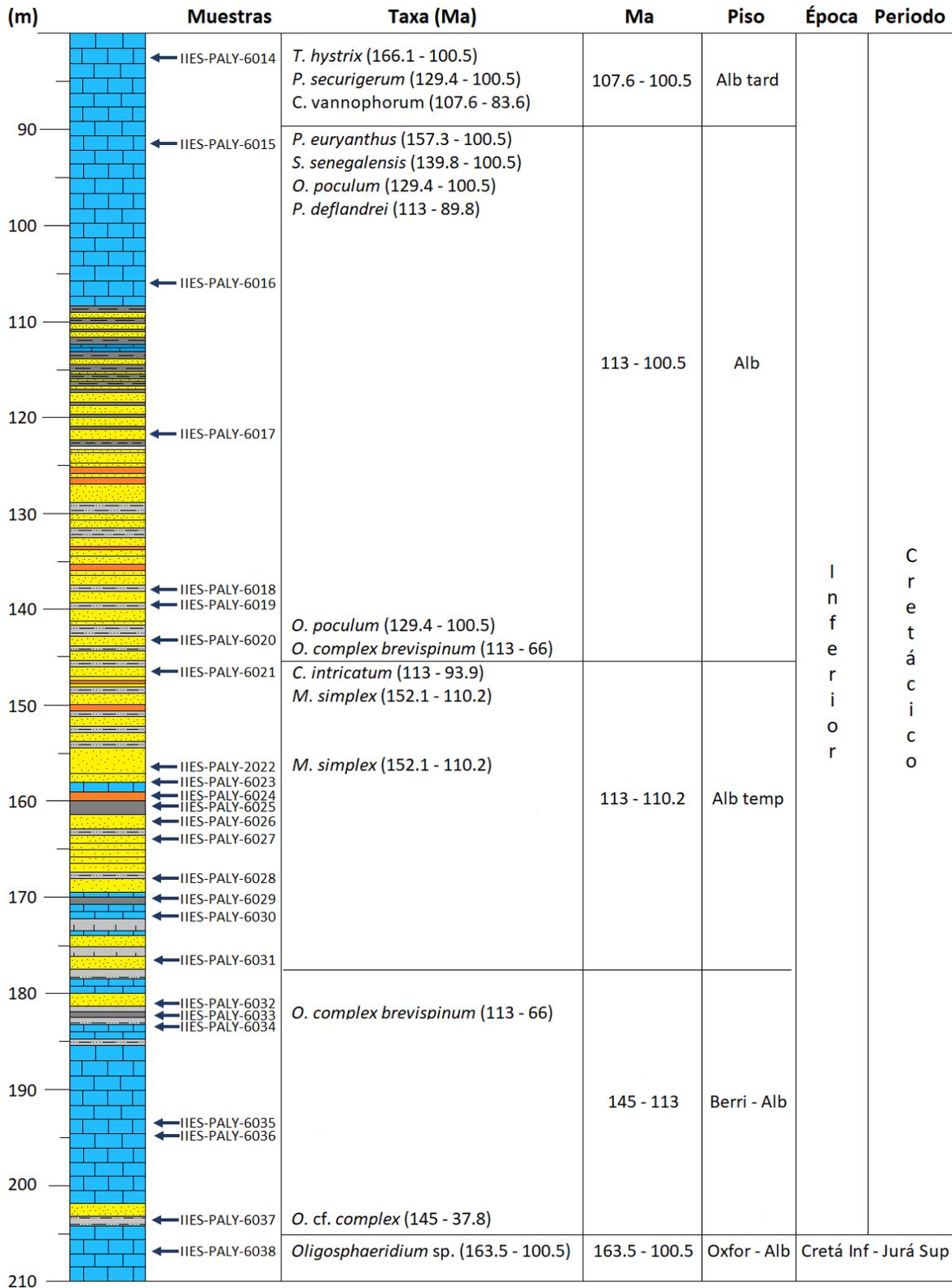


Figura 10. Especies de dinoflagelados que establecen la edad del pozo ANH-CR-MONTECARLO-1X. En paréntesis se indican las edades de cada especie en millones de años, reportadas en la literatura y de acuerdo con la Carta Cronoestratigráfica Internacional (CCI; Cohen *et al.*, 2013).

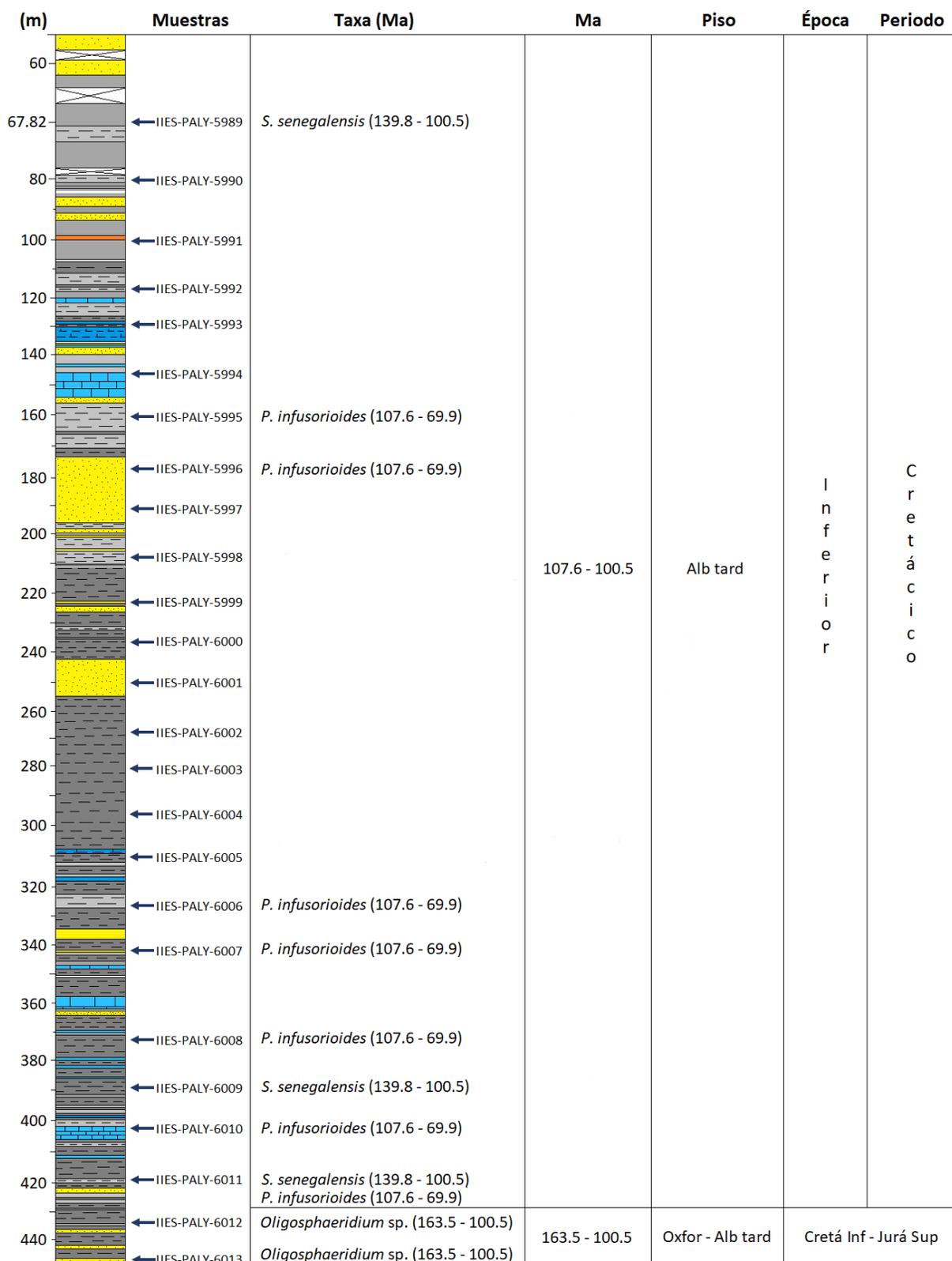


Figura 11. Especies de dinoflagelados que establecen la edad del pozo ANH-CON-06-ST-S. En paréntesis se indican las edades de cada especie en millones de años, reportadas en la literatura y de acuerdo con la Carta Cronoestratigráfica Internacional (CCI; Cohen *et al.*, 2013).

4.2 Paleobatimetría

Las rocas siliciclasticas contienen silicatos y fragmentos de rocas erosionadas. Por otra parte, las rocas sedimentarias químicas / bioquímicas se originan por la precipitación de minerales en el agua a través de varios procesos químicos o bioquímicos. Además, las rocas carbonatadas, constituyen un grupo especial que contienen abundante materia orgánica y de diversas cantidades de constituyentes siliciclásticos o químicos. Debido a la disminución de la saturación de carbonato de calcio del agua de mar con la profundidad y bajas temperaturas, la producción de carbonato de calcio se limita principalmente a las áreas de aguas muy poco profundas del océano. Estas son las aguas en las que viven la mayoría de los organismos secretores de carbonato de calcio (Boggs, 1987).

La litología del pozo ANH-CR-MONTECARLO-1X, permite dividir la columna estratigráfica en tres secciones; la primera de aproximadamente 80 a 108 m, está compuesta por calizas asociadas a un ambiente nerítico interno (NI). La segunda sección se observa entre 108 y 183 m y se asocia a un ambiente transicional (T) por la dominancia de rocas siliciclásticas, mayormente areniscas y lutitas, y en menor cantidad conglomerados que indican alta energía y aporte de abundante material terrígeno. La tercera y última sección que abarca entre 183 y 210 m, también se relaciona con un ambiente nerítico interno (NI), al igual que la primera sección (Fig. 12).

El pozo ANH-CON-06-ST-S (Fig. 13) presenta un ambiente predominantemente transicional (T) indicado por abundancia de siliciclásticos como lutitas, areniscas, brechas y en menor proporción lodolitas y conglomerados. Se observan delgados intervalos de calizas y margas que indican un ambiente nerítico interno (NI).

La litología indica un mayor aporte terrígeno, a diferencia del pozo ANH-CR-MONTECARLO-1X (Fig.12). El carbonato poco profundo y la alta presencia de terrígenos probablemente explica la baja diversidad o la nula presencia de dinoflagelados. En particular, las *Subtilisphaeras* se han asociado con ambientes marinos restringidos y de baja salinidad (Jain y Millepied, 1975; van Helmond *et al.*, 2014), aunque también son comunes en conjuntos de baja diversidad en rocas de Brasil (Arai, 2001; Arai *et al.*, 1994, 2000; Lana, 1997; Lana y Pedrão, 2000; Antonioli, 2001; Antonioli y Arai, 2002).

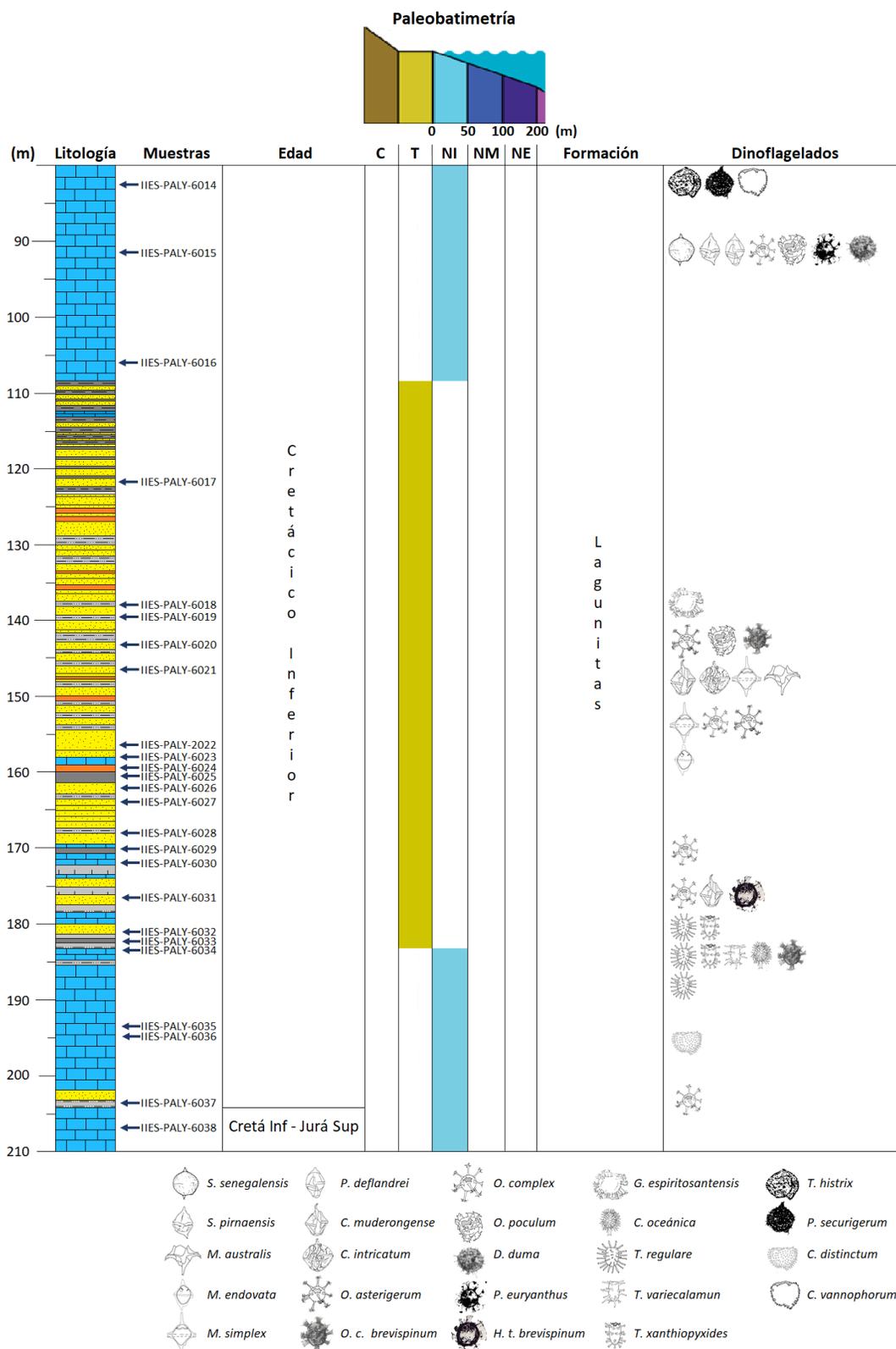


Figura 12. Paleobatimetría del pozo ANH-CR-MONTECARLO-1X, litología y especies de dinoflagelados identificados. Los ambientes indicados son: C= Continental; T= Transicional; NI= Nerítico Interno; NM= Nerítico Medio y NE= Nerítico Externo.

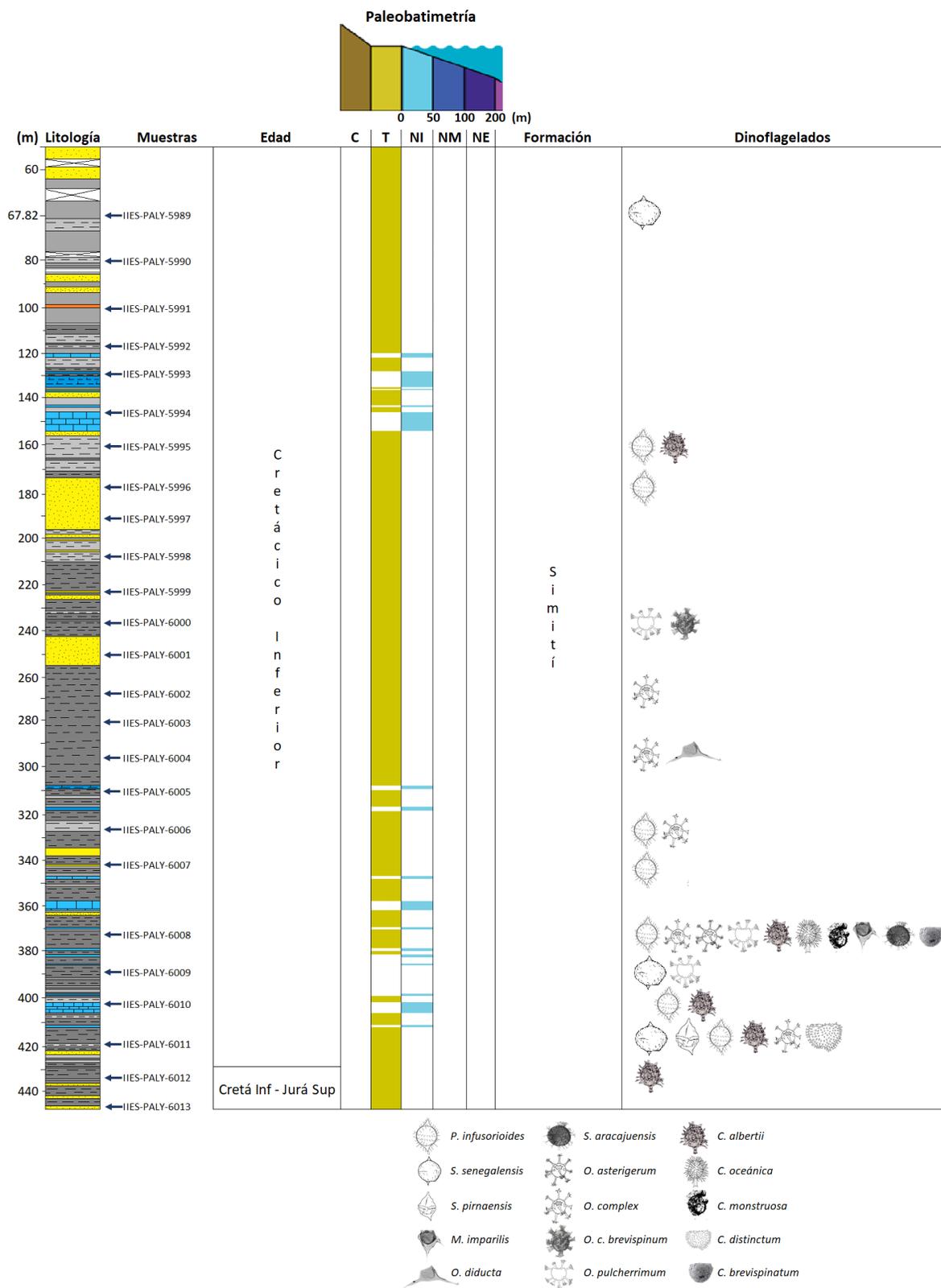


Figura 13. Paleobatimetría del pozo ANH-CON-06-ST-S, litología y especies de dinoflagelados identificados. Los ambientes indicados son: C= Continental; T= Transicional; NI= Nerítico Interno; NM= Nerítico Medio y NE= Nerítico Externo.

4.3 Transgresiones marinas del Albiano

Entre las muestras estudiadas resaltan algunas que contienen concentraciones muy altas de dinoflagelados. En el pozo ANH-CR-MONTECARLO-1X las altas concentraciones de dinoflagelados de las muestras IIES-PALY-6015 (1,441 qst/g sed) y IIES-PALY-6021 (1,036.89 qst/gr sed) son correlacionables con dos transgresiones marinas reportadas durante el Albiano tardío (104.4 Ma) y el Albiano temprano (111 Ma) respectivamente (Haq et al., 1988; Hardenbol et al., 1998; Haq, 2014).

La muestra IIES-PALY-5995 del pozo ANH-CON-06-ST-S también registra altas concentraciones de quistes de dinoflagelados (3,559.62 qst/gr sed) lo que puede correlacionarse con la transgresión marina del Albiano tardío (104.4 Ma; Fig.14).

La transgresión del Albiano temprano (KAl15; 111 Ma) ha sido asignada a la parte inferior de las zonas *Leymeriella tardefurcata* de amonites y la zona *Ticinella primula* de foraminíferos planctónicos, así como a la parte media de la zona CC8 de nanofósiles calcáreos (Haq, 2014).

En cuanto a la transgresión del Albiano tardío (KAl1; 104.4 Ma) ha sido asignada a la parte media superior de las zonas de *Mortonicerias pricei* de amonites y la zona *Pseudothalmanninella subticinensis* de foraminíferos planctónicos, así como a la parte superior de la zona CC8 de nanofósiles calcáreos (Haq, 2014).

Adicionalmente, las comunidades *Subtilisphaera (senegalensis)* de las muestras IIES-PALY-6015 (pozo ANH-CR-MONTECARLO-1X) y en menor proporción la muestra IIES-PALY-6011 (pozo ANH-CON-06-ST-S) pueden estar relacionadas con la Ecozona *Subtilisphaera* propuesta por Arai et al. (1994, 2000). Esta Ecozona *Subtilisphaera* del Cretácico Inferior (Aptiano - Albiano) del Atlántico Sur fue propuesta por Arai et al. (1994, 2000) y se define por la dominancia de las especies *S. senegalensis* y *S. scabrata*. Dicha Ecozona refleja florecimientos de estos dinoflagelados en los mares epicontinentales tropicales del Cretácico medio (Arai et al., 1994).

La distribución geográfica conocida de la Ecozona *Subtilisphaera* abarca aguas costeras del Tethys, ocupando mares epicontinentales de baja latitud Arai et al. (2000).

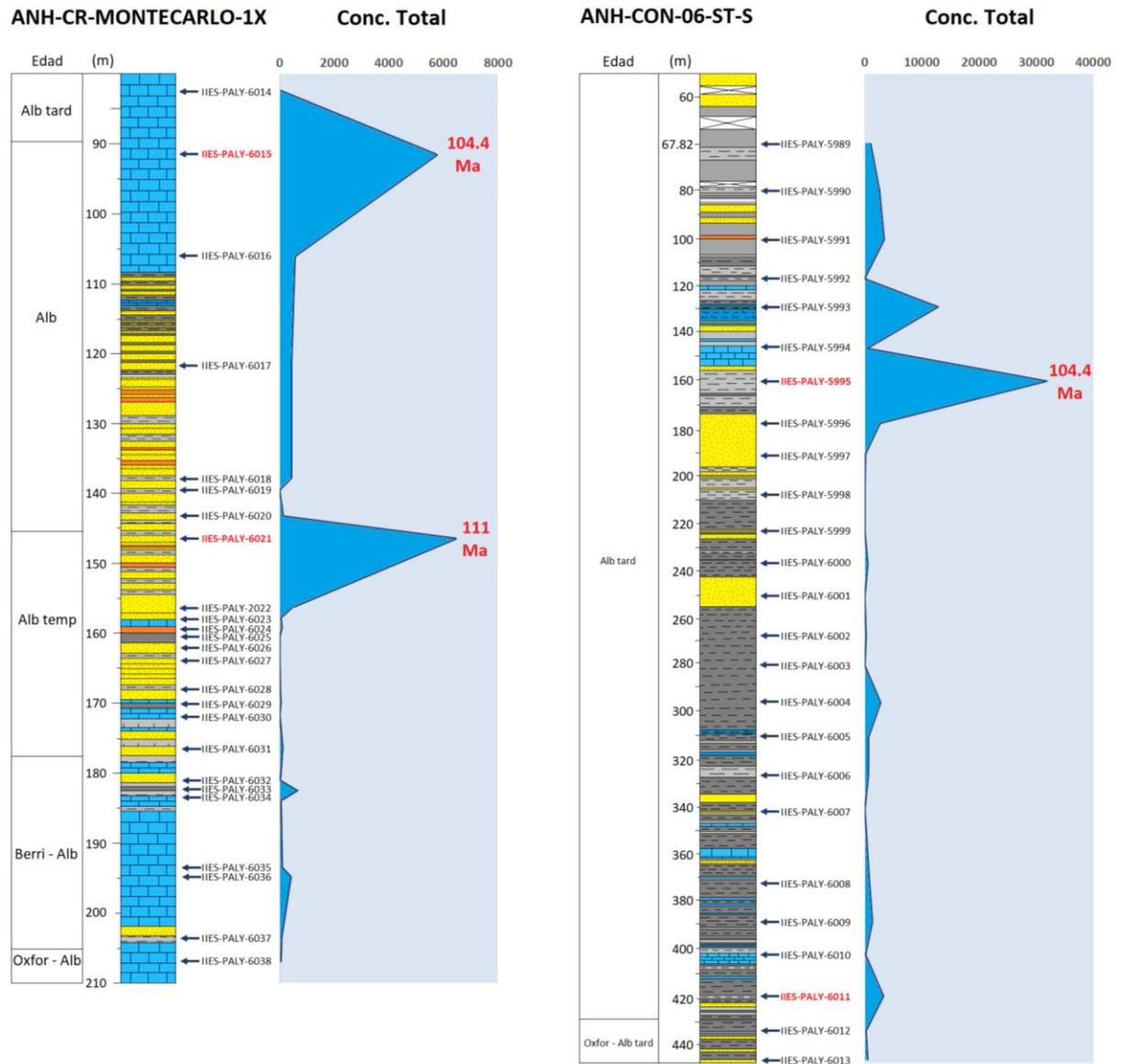


Figura 14. Concentraciones totales de dinoflagelados en los pozos ANH-CR-MONTECARLO-1X y ANH-CON-06-ST-S correlacionables con transgresiones marinas reportadas en el Albiano (Haq, 2014).

4.4 Interpretación Climática

Proponemos un clima cálido para el Cretácico Inferior ya que, en ambos pozos (ANH-CR-MONTECARLO-1X y ANH-CON-06-ST-S) los datos muestran una mayor diversidad de taxones autótrofos característicos de aguas cálidas y estratificadas y una menor diversidad de taxones heterótrofos característicos de aguas frías y que proliferan en zonas de surgencias (Edwards y Andrie, 1992; de Vernal et al., 2001; Bringué et al., 2013; Duque, 2015). Las altas concentraciones de dinoflagelados del género *Subtilisphaera* (Peridinales = heterótrofos) en la muestra IIES-PALY-6015 del pozo ANH-CR-MONTECARLO-1X pueden estar relacionados

con alguna zona de surgencia al igual que las muestras IIES-PALY-5993 y IIES-PALY-5995 del pozo ANH-CON-06-ST-S. Lo mismo puede ocurrir en la muestra IIES-PALY-6011, en donde hay altas concentraciones de *Palaeohystrichophora*.

Price *et al.* (2013) muestra resultados consistentes con un modo de clima cálido para el Jurásico y el Cretácico y, también, respaldan la opinión de que los cambios en las concentraciones atmosféricas de CO₂ están relacionados con los cambios en las temperaturas globales. La nueva curva de isótopos $\delta^{18}\text{O}$ derivada de braquiópodos anula las sugerencias anteriores y polémicas de que durante el Jurásico temprano al Cretácico temprano la Tierra experimentó un modo de clima frío. Además, nuevos registros de isótopos estables ($\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^{13}\text{C}$) y razones de Mg/Ca indican que la temperatura superficial del mar (SST, por sus siglas en inglés) durante el Cretácico son similares a las SST tropicales cercanas a los 40°C (Bice *et al.*, 2006), así como SST en latitudes medias (~ 40°N) entre 30 y 36°C (Erbacher *et al.*, 2011).

Capítulo 5. Conclusiones

Los sedimentos de los pozos ANH-CR-MONTECARLO-1X (cuenca Cesar Ranchería) y ANH-CON-06-ST-S (Cordillera Oriental) localizados en Colombia, se depositaron durante una edad no más antigua que el Albiano temprano (110.2 Ma) y no más temprana que el Albiano tardío (100.5 Ma). La escasez de recuperación y la mala preservación de los quistes en las muestras inferiores de los pozos impiden tener certidumbre completa acerca de la edad de inicio de la depositación. Pero, una interpretación razonable es que las secciones representan depositación concordante durante el Cretácico Temprano, muy probablemente durante el Albiano.

La litología y contenido palinológico del pozo ANH-CR-MONTECARLO-1X indica un ambiente nerítico interno (NI) a transicional (T), mientras que la del pozo ANH-CON-06-ST-S es predominantemente transicional (T) con pocas variaciones a nerítico interno (NI) lo cual muestra un mayor aporte terrígeno o cercanía al continente.

Las concentraciones de dinoflagelados observadas en el pozo ANH-CON-06-ST-S son casi cinco veces mayores que las del ANH-CR-MONTECARLO-1X, indicando depositación en una región con mayor productiva primaria marina. Esto es probablemente debido a la cercanía a la costa y el mayor aporte de nutrientes.

Las altas concentraciones de dinoflagelados en las muestras IIES-PALY-6015 y IIES-PALY-6021 del pozo ANH-CR-MONTECARLO-1X se pueden correlacionar con dos transgresiones marinas del Albiano (100.4-111 Ma), mientras que la alta concentración de la muestra IIES-PALY-5995 del pozo ANH-CON-06-ST-S se correlaciona con la transgresión marina del Albiano tardío (100.4 Ma).

La dominancia de especies autotróficas en ambas secciones indican sedimentación en aguas tropicales, confirmando el modelo de altas temperaturas (40°C) superficiales del mar durante el Albiano.

Literatura citada

- Antonioli, L. (2001). Estudo palinocronoestratigráfico da Formação Codó – Cretáceo Inferior do Nordeste Brasileiro, PhD thesis, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil.
- Antonioli, L., e Arai M. (2002). O registro da Ecozona Subtilisphaera na Formação Codó (Cretáceo Inferior da Bacia do Parnaíba, Nordeste do Brasil): Seu significado paleogeográfico, paper presented at 6° Simpósio sobre o Cretáceo do Brasil, São Pedro-SP, Brazil, 25–30.
- Arai, M., Lana, C.C., Pedrão, E. (1994). Ecozona Subtilisphaera: registro eocretáceo de um importante episódio ecológico do Oceano Atlântico primitivo. *Acta Geologica Leopoldensica*, São Leopoldo, RS, edição especial XVII (39/2): 521-538.
- Arai, M., Neto, J. B., Lana, C. C., and Pedrão, E. (2000). Cretaceous dinoflagellate provincialism in Brazilian marginal basins. *Cretaceous Research*, 21(2-3), 351-366.
- Arai, M. (2001). Palinologia de depósitos cretáceos no Norte e Meio-Norte do Brasil: Histórico e estado-de-arte, in *O Cretáceo na Bacia de São Luís-Grajaú 2001*, edited by D. F. Rossetti, A. M. Góes, and W. Truckenbrodt, 175-189, MPEG Editoração, Belém, Brazil.
- Anderson, D. M., Glibert, P. M., and Burkholder, J. M. (2002). Harmful algal blooms and eutrophication: nutrient sources, composition, and consequences. *Estuaries*, 25, 704-726.
- Bauman, A. G., Burt, J. A., Feary, D. A., Marquis, E., and Usseglio, P. (2010). Tropical harmful algal blooms: An emerging threat to coral reef communities?. *Marine Pollution Bulletin*, 60(11), 2117-2122.
- Benninghoff, W. S. (1962). Calculation of pollen and spore density in sediments by addition of exotic pollen in known quantities (Abstract): *Pollen et Spores*, v. 4.
- Bice, K.L., Birgel, D., Meyers, P.A., Dahl, K.A., Hinrichs, K.U., and Norris, R.D. (2006). A multiple proxy and model study of Cretaceous upper ocean temperatures and atmospheric CO₂ concentrations: *Paleoceanography*, doi:10.1029/2005PA001203.
- Boggs, Jr. S. (1987). Carbonate Sedimentary rocks. Lynch, P. (Ed.), *Principles of sedimentology and stratigraphy*. Pearson, Prentice Hall. Upper Saddle River, New Jersey.
- Bolch, C. J., and Hallegraeff, G. M. (1990). Dinoflagellate cysts in recent marine sediments from Tasmania, Australia. *Botánica Marina*, 33(2)173-192.
- Bogus, K., Mertens, K. N., Lauwaert, J., Harding, I. C., Vrielinck, H., Zonneveld, K. A., and Versteegh, G. J. (2014). Differences in the chemical composition of organic-walled dinoflagellate resting cysts from phototrophic and heterotrophic dinoflagellates. *Journal of Phycology*, 50(2), 254-266.
- Bueno, R. (1985). Presente y futuro de la exploración petrolera en Colombia. In *Congreso latinoamericano de geología*. 6 (pp. 426-490).
- Bringué, M., Pospelova, V., and Pak, D. (2013). Seasonal production of organic-walled dinoflagellate cysts in an upwelling system: A sediment trap study from the Santa Barbara Basin, California. *Marine Micropaleontology*, 100, 34-51.

- Chavez, F. P., Messié, M., and Pennington, J. T. (2011). Marine primary production in relation to climate variability and change. *Annual Review of Marine Science*, 3, 227-260.
- Cohen, K.M., Harper, D.A.T., Gibbard, P.L., and Fan, J.-X. (2013). The ICS International Chronostratigraphic Chart. *Episodes* 36: 199-204.
- Dale, B. (1996). Dinoflagellate cyst ecology: modeling and geological applications. In: Jansonius, J., McGregor, D.C. (Eds.), *Palynology: Principles and Applications*. AASP Foundation, 1249-1275.
- De Vernal, A. D., Henry, M., Matthiessen, J., Mudie, P. J., Rochon, A., Boessenkool, K. P., ... and Harland, R. (2001). Dinoflagellate cyst assemblages as tracers of sea-surface conditions in the northern North Atlantic, Arctic and sub-Arctic seas: The new 'n= 677' data base and its application for quantitative palaeoceanographic reconstruction. *Journal of Quaternary Science*, 16(7), 681-698.
- De Vernal, A., Radi, T., Zaragosi, S., Van Nieuwenhove, N., Rochon, A., Allan, E., and Richerol, T. (2020). Distribution of common modern dinoflagellate cyst taxa in surface sediments of the Northern Hemisphere in relation to environmental parameters: The new 'n= 1968' data base. *Marine Micropaleontology*, 159, 101-796.
- Duque Herrera, A. F. (2015). Bioestratigrafía del Neógeno a partir de dinoflagelados en el NW de Suramérica, Pacífico colombiano. Tesis de Maestría en Ciencias. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California. 85.
- Edwards, L. E., and Andrieu, V. A. S. (1992). Distribution of selected dinoflagellate cysts in modern marine sediments. *Neogene and Quaternary dinoflagellate cysts and acritarchs*, 259-288.
- Evitt, W. R. (1985). Sporopollenin dinoflagellate cysts: their morphology and interpretation. *Micropaleontology*, Vol. 32, No. 3 (1986), 282-285. Recuperado de: <https://www.jstor.org/stable/pdf/1485622.pdf>
- Eisenack, A. (1964). Katalog der fossilen Dinoflagellaten, Hystrichosphären und verwandten Mikrofossilien: Bd. 1 Dinoflagellaten. E. Schweizerbart. Stuttgart, 1-241.
- Erbacher, J., Friedrich, O., Wilson, P.A., Lehmann, J., and Weiss, W. (2011). Shortterm warming events during the boreal Albian (mid-Cretaceous). *Geology*, v. 39, 223-226, doi:10.1130/G31606.1.
- Fauconnier D., Masure E., Begouen V., Cornu P., Courtinat B., Foucher J.C., Hssaida T., Lachkar G., Londeix L., Michoux D., Monteil E., OGG G., Pourtoy D., Rauscher R., Soncini M.J. (2004). Les dinoflagellés fossiles. Guide pratique de détermination. Les genres à processus et archéopyle apical. BRGM Ed., Collection Scientifique, 600, 80 pl., photos 68 pl., dessins.
- Fensome, R. A. (1993). A classification of living and fossil dinoflagellates. *Micropaleontology Special Publications*, 7, 351.
- Flores-Trujillo, J. G., Helenes, J., Herguera, J. C., and Orellana-Cepeda, E. (2009). Palynological record (1483-1994) of *Gymnodinium catenatum* in Pescadero Basin, southern Gulf of California, México. *Marine Micropaleontology*, 73(1), 80-89.
- García, M., Mier, R., Arias, A. F., Yeny, R., Cortes, M., Mario, P., Salazar, O., Jiménez, M. (2007). Prospectividad de la cuenca Cesar Ranchería. Informe para la Agencia Nacional de Hidrocarburos.

http://www.anh.gov.co/Informacion-Geologica-y-Geofisica/Estudios-Integrados-y-Modelamientos/Presentaciones y Poster Tcnicos/Cesar_Rancheria.pdf

- Govea, C., y Aguilera, H. (1986). Cuencas Sedimentarias de Colombia. Cuadernos Técnicos de Ecopetrol, (4) 63.
- Harland, R. (1973). Dinoflagellate cysts and acritarchs from the Bearpaw Formation (Upper Campanian) of southern Alberta, Canada. *Palaeontology*, 16 (pt 4), 665-706.
- Haq, B. U. (2014). Cretaceous eustasy revisited. *Global and Planetary change*, 113, 44-58.
- Helby, R., Morgan, R., and Partridge, A. D. (1987). A palynological zonation of the Australian Mesozoic. *Memoir of the Association of Australasian Palaeontologists*, 4, 1-94.
- Jain, K. P., and Millepied P. (1975). Cretaceous microplankton from Senegal Basin, W. Africa: Pt. II: Systematics and Biostratigraphy, *Geophytology*, 5, 209-213.
- Jan Du Chene, R., Masure, E., Becheler, I., Biffi, U., De Vains, G., Fauconnier, D., Ferrario, R., Foucher, J.C., Gaillard, M., Hochuli, P., Lachkar, G., Michoux, D., Monteil, E., Moron, J.M., Rauscher, R., Raynaud, J.F., Taugourdeau, J., and Turon, J.L. (1986). Guide pratique pour la détermination de kystes de Dinoflagellés fossiles: le complexe Gonyaulacysta. *Bulletin des Centres de Recherches Exploration Production Elf-Aquitaine*, 1-479.
- Jacobson, D. M., and Anderson, D. M. (1986). Thecate heterophic dinoflagellates: Feeding behavior and mechanisms 1. *Journal of Phycology*, 22(3), 249-258.
- Kaiho, K., Katabuchi, M., Oba, M., and Lamolda, M. (2014). Repeated anoxia–extinction episodes progressing from slope to shelf during the latest cenomanian. *Gondwana Research*, 25: 1357–1368.
- Kremp, A., Hinners, J., Klais, R., Leppänen, A.-P., and Kallio, A. (2018). Patterns of vertical cyst distribution and survival in 100-year-old sediment archives of three spring dinoflagellate species from the Northern Baltic Sea. *Eur. J. Phycol.* 53, 1-11. doi: 10.1080/09670262.2017.1386330.
- Lana, C. C. (1997). Palinologia e estratigrafia integrada da seção Cenomaniano médio–Turoniano inferior da porção centro-leste da Bacia Potiguar, NE do Brasil, MSc thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brazil.
- Lana, C. C., and Pedrão E. (2000). *Subtilisphaera almadaensis*, uma nova espécie de dinoflagelado da Bacia de Almada, Brasil, *Revista Universidade Guarulhos Geociências*, V (Número Especial), 86–88.
- Levitus, S., Antonov, J. I., Boyer, T. P., and Stephens, C. (2000). Warming of the world ocean. *Science*, 287(5461), 2225-2229.
- Li, X.H., Xu, W.L., Liu, W.H., Zhou, Y., Wang, Y., Sun, Y., and Liu, L. (2013). Climatic and environmental indications of carbon and oxygen isotopes from the Lower Cretaceous calccrete and lacustrine carbonates in southeast and northwest China. *Paleogeography Paleoclimatology Paleoecology*, 385: 171-189.
- Ludvigson, G.A., Joeckel, R.M., Lez, L.A.G., Gulbranson, E.L., Rasbury, E.T., Hunt, G. J., Kirkland, J.I., and Madsen, S. (2010). Correlation of Aptian-Albian carbon isotope excursions in continental strata of the Cretaceous foreland basin, eastern Utah, U.S.A. *Journal of Sedimentary Research*, 80: 955-974.

- Lundholm, N., Ribeiro, S., Andersen, T. J., Koch, T., Godhe, A., Ekelund, F., and Ellegaard, M. (2011). Buried alive germination of up to a century old marine protist resting stages. *Phycologia*, 50(6), 629-640.
- Ludvigson, G.A., Joeckel, R.M., Lez, L.A.G., Gulbranson, E.L., Rasbury, E.T., Hunt, G. J., Kirkland, J.I., and Madsen, S. (2010). Correlation of Aptian-Albian carbon isotope excursions in continental strata of the Cretaceous foreland basin, eastern Utah, U.S.A. *Journal of Sedimentary Research*, 80: 955-974.
- Manjarrez, J. L. P., Castro, G. G., Escamilla, J. H., y Cepeda, E. O. (2001). Quistes de *Lingulodinium polyedrum*, productor de mareas rojas en la Bahía de Todos Santos (invierno-primavera, 2000). *Ciencias Marinas*, 27(4), 543-558.
- Margalef, R. (1978). Life-forms of phytoplankton as survival alternatives in an unstable environment. *Oceanologica acta*, 1(4), 493-509.
- Matsuoka, K., and Fukuyo, Y. (1994). Geographical Distribution of the Toxic Dinoflagellate *Gymnodinium catenatum* Graham in Japanese Coastal Waters. *Botánica Marina*, 37, 495-503.
- Maher, L. J. (1981). Statistics for microfossil concentration measurements employing samples spiked with marker grains. *Review of Paleobotany and Palynology*, 32(2-3), 153-191.
- Mertens, K. N., Verhoeven, K., Verleye, T., Louwye, S., Amorim, A., Ribeiro, S., ... and Kodrans-Nsiah, M. (2009). Determining the absolute abundance of dinoflagellate cysts in recent marine sediments: the *Lycopodium* marker-grain method put to the test. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 157(3), 238-252.
- Mertens, K. N., Price, A. M., and Pospelova, V. (2012). Determining the absolute abundance of dinoflagellate cysts in recent marine sediments II: further tests of the *Lycopodium* marker-grain method. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 184, 74-81.
- Morales, L. G. (1958). General geology and oil occurrence of the Middle Magdalena Valley, Colombia. In *habitat of oil a Symposium American Association of Petroleum*, *Geologists Bulletin*, 641-695.
- Morquecho, L., Alonso-Rodríguez, R., Arreola-Lizárraga, J. A., and Reyes-Salinas, A. (2012). Factors associated with moderate blooms of *Pyrodinium bahamense* in shallow and restricted subtropical lagoons in the Gulf of California. *Botánica Marina*, 55(6), 611-623.
- Moestrup, Ø., Akselmann-Cardella, R., Churro, C., Fraga, S., Hoppenrath, M., Iwataki, M., Larsen, J., Lundholm, N., Zingone, A. (2009). IOC-UNESCO Taxonomic Reference List of Harmful Micro Algae. Accessed at <http://www.marinespecies.org/hab> on 2021-07-30. doi:10.14284/362.
- Mojica, J., y Franco, R. (1992). Estructura y evolución tectónica del Valle Medio y Superior del Magdalena. *Universidad Nacional de Colombia. Geología Colombiana*, (17) : 41-64.
- Palynodata, I., and White, J. (2008). *Geological Survey of Canada Open File 5793 1 CD-ROM*.
- Reichert, G. J., and Brinkhuis, H. (2003). Late Quaternary *Protoperidinium* cysts as indicators of paleoproductivity in the northern Arabian Sea. *Marine Micropaleontology*, 49(4), 303-315.
- Pospelova, V., de Vernal, A., Pedersen, T.F. (2008). Distribution of dinoflagellate cysts in surface sediments from the northeastern Pacific Ocean (43–25 N) in relation to sea-surface temperature, salinity, productivity and coastal upwelling. *Marine Micropaleontology*, 68 (1-2), 21-48.

- Prauss, M. L. (2002). Recent global warming and its influence on marine palynology within the central Santa Barbara Basin, offshore Southern California, USA. *Palynology*, 26(1), 217-238.
- Price, G. D., Twitchett, R. J., Wheeley, J. R., and Buono, G. (2013). Isotopic evidence for long term warmth in the Mesozoic. *Scientific Reports*, 3, 1-5. <https://doi.org/10.1038/srep01438>.
- Rabalais, N. N., Turner, R. E., Díaz, R. J., and Justić, D. (2009). Global change and eutrophication of coastal waters. *ICES Journal of Marine Science*, 66(7), 1528-1537.
- Royero, J. M., y Clavijo, J. (2001). Mapa Geológico Generalizado del Departamento de Santander, Escala 1:400.000. Memoria Explicativa, INGEOMINAS, 92.
- Sarmiento Rojas, L. F. (2001). Mesozoic rifting and cenozoic basin inversion history of the eastern cordillera, colombian andes, inferences from tectonic models. Tesis de PhD. Vrije Universiteit. 295.
- Stover, L. E., and Evitt, W. R. (1978). Analyses of Pre-Pleistocene Organic-walled dinoflagellates. Stanford University Publications, 299.
- Stover, L. E., and Williams, G. L. (1987). Analyses of Mesozoic and Cenozoic organic walled dinoflagellates 1977-1985. AASP Contribution Series No. 18: 243.
- Stover, L. E., Brinkhuis, H., Damassa, S. P., De Verteuil, L., Helby, R. J., Monteil, E., ... and McGregor, D. C. (1996). Mesozoic-Tertiary dinoflagellates, acritarchs and prasinophytes. *Palynology: principles and applications*, 2, 641-750.
- Stramma, L., Johnson, G. C., Sprintall, J., and Mohrholz, V. (2008). Expanding oxygen-minimum zones in the tropical oceans. *Science*, 320(5876), 655-658.
- Sprangers, M., Dammers, N., Brinkhuis, H., van Weering, T. C., and Lotter, A. F. (2004). Modern organic-walled dinoflagellate cyst distribution offshore NW Iberia; tracing the upwelling system. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 128(1-2), 97-106.
- Schlanger, S. O., and Jenkyns, H. C. (1976). Cretaceous oceanic anoxic events: causes and consequences. *Geologie en Mijnbouw*, 55(3-4).
- Taylor, F. J. R. (1987). General group characteristics; special features of interest; short history of dinoflagellate study. *The biology of dinoflagellates*, 1-23.
- Van Helmond, N. A. M., Sluijs, A., Sinninghe Damsté, J. S., Reichart, G.-J., Voigt, S., Erbacher, J., Pross, J., and Brinkhuis, H. (2014). Freshwater discharge controlled deposition of Cenomanian–Turonian black shales on the NW European epicontinental shelf (Wunstorf, North Germany). *Climate Past Discussion* 10, 3755–3786.
- Williams, G. L., and Bujak, J. P. (1985). Mesozoic and Cenozoic dinoflagellates. In: H.M. Botli, J.B. Saunders and K. Perch-Nielsen (Editors). *Plankton Stratigraphy*. Cambridge University Press, 847-964.
- Williams, G. L., Brinkhuis, H. M. A. P., Pearce, M. A., Fensome, R. A., Weegink, J. W., and Exon, N. F. (2004). Southern Ocean and global dinoflagellate cyst events compared: index events for the Late Cretaceous–Neogene. In *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results (Vol. 189, 1-98)*.

- Williams, G.L., Fensome, R.A., and MacRae, R.A. (2017). The Lentin and Williams index of fossil dinoflagellates 2017 edition. American Association of Stratigraphic Palynologists Contributions Series, no. 48.
- Wood, G. D., Gabriel, A. M., and Lawson J. C. (1996). Palynological techniques processing and microscopy. In: J. Jansonius and D. C. McGregor. (Eds.) *Palinology: Principles and applications*, 1, 29-50.
- Zegarra, M., and Helenes, J. (2011). Changes in Miocene through Pleistocene dinoflagellates from the Eastern Equatorial Pacific (ODP Site 1039), in relation to primary productivity. *Marine Micropaleontology*, 81(3-4), 107-121.
- Zonneveld, K. A., and Pospelova, V. (2015). A determination key for modern dinoflagellate cysts. *Palynology*, 39(3), 387-409.
- Zhang, M., Dai, S., Du, B., Ji, L., and Hu, S. (2018). Mid-Cretaceous hothouse climate and the expansion of early angiosperms. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 92(5), 2004-2025.

Anexo 3.

Plancha n° 1:

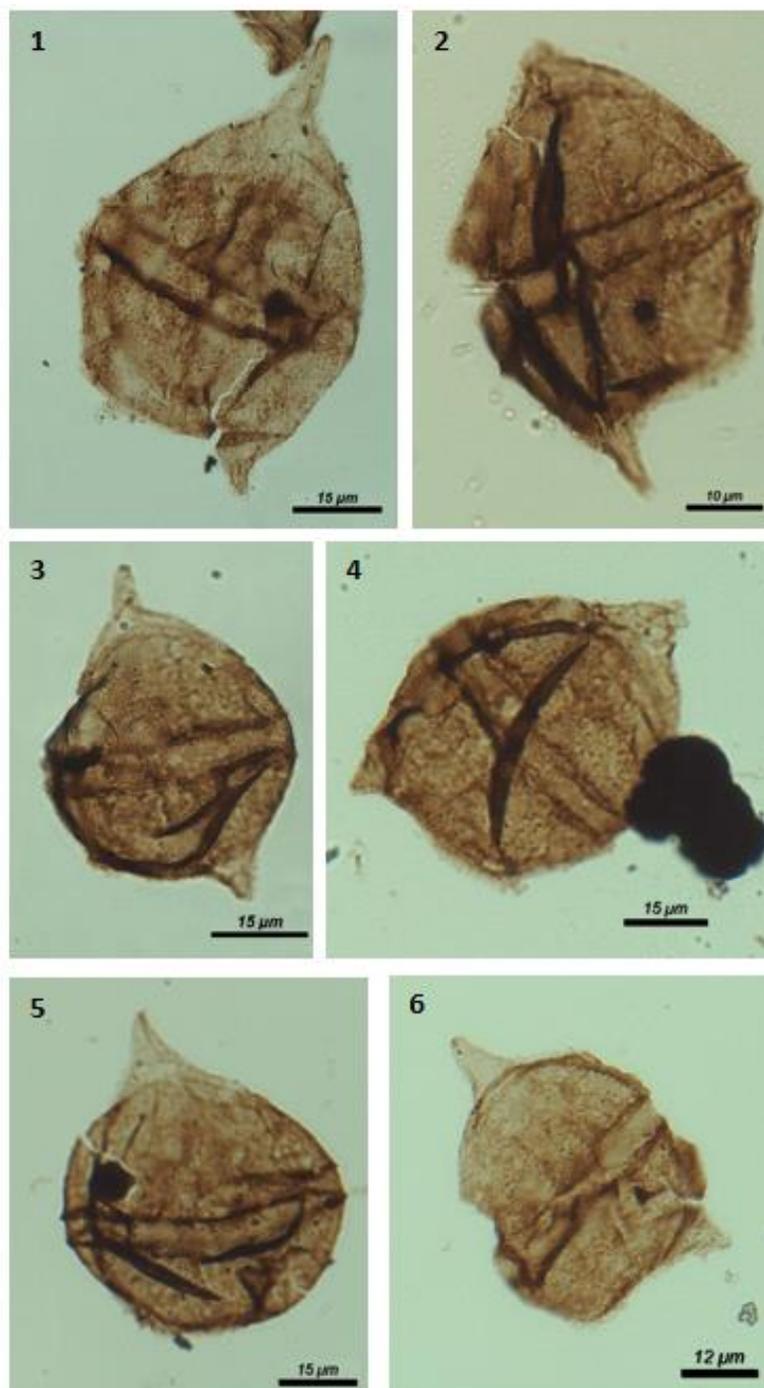
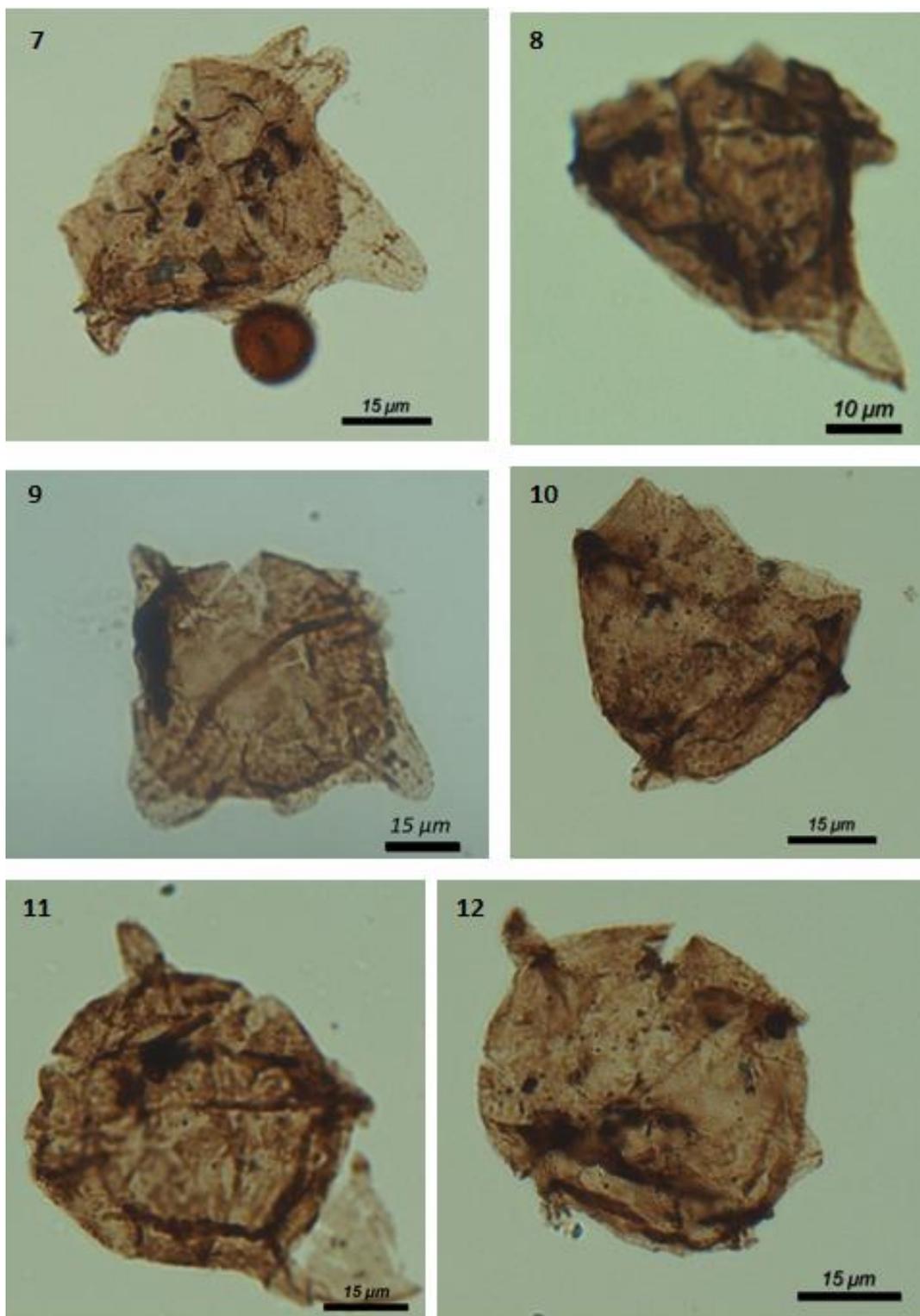


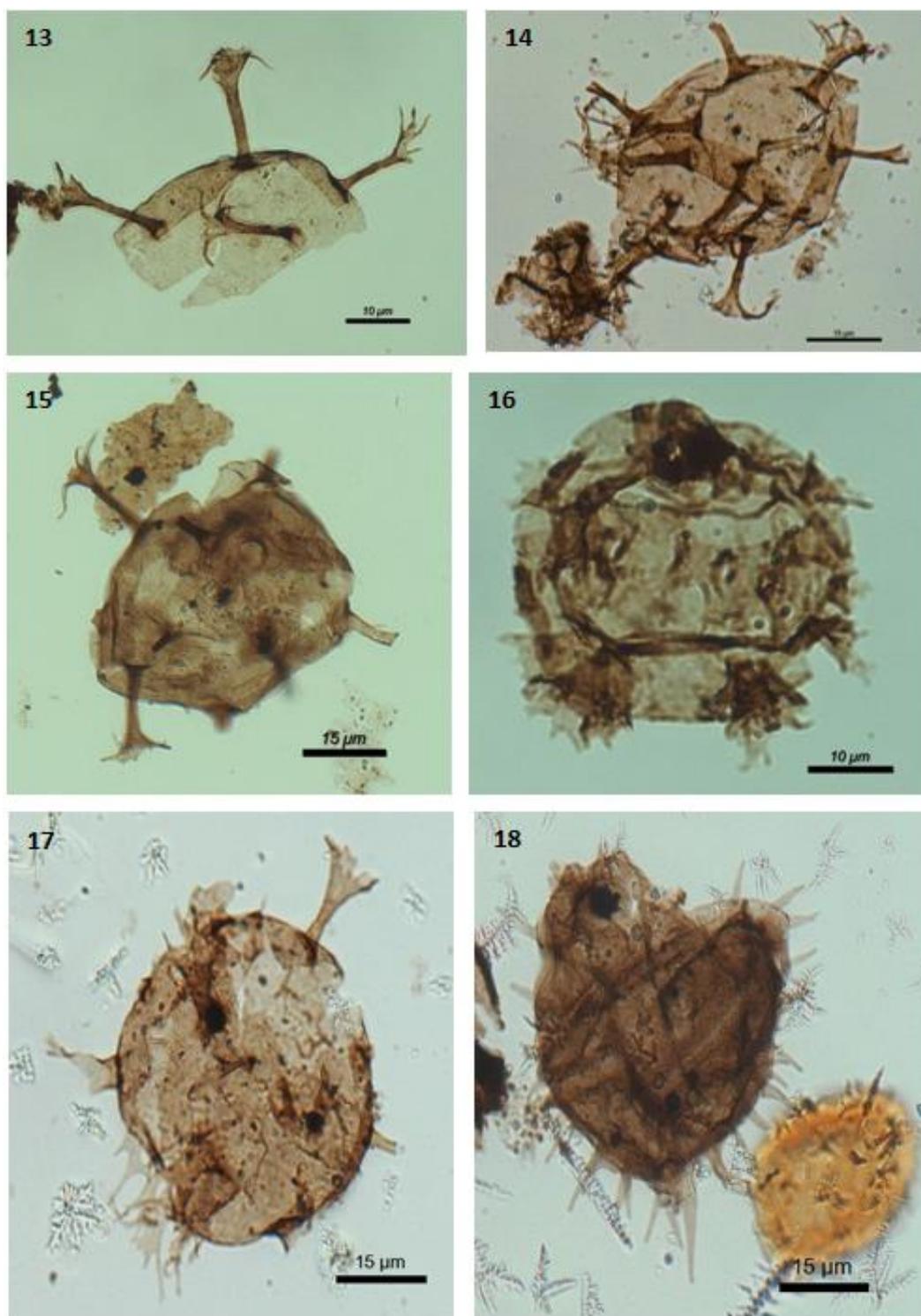
Figura 15. Fotografías de las especies y géneros identificados bajo el microscopio correspondientes al pozo ANH-CR-MONTECARLO-1X. Peridinales: 1-2: *Subtilisphaera* cf. *pirnaensis*, 3-4: *Subtilisphaera senegalensis*, 5: *Subtilisphaera* sp., 6: *Trithyrodinium* sp.

Plancha nº 2: continuación.



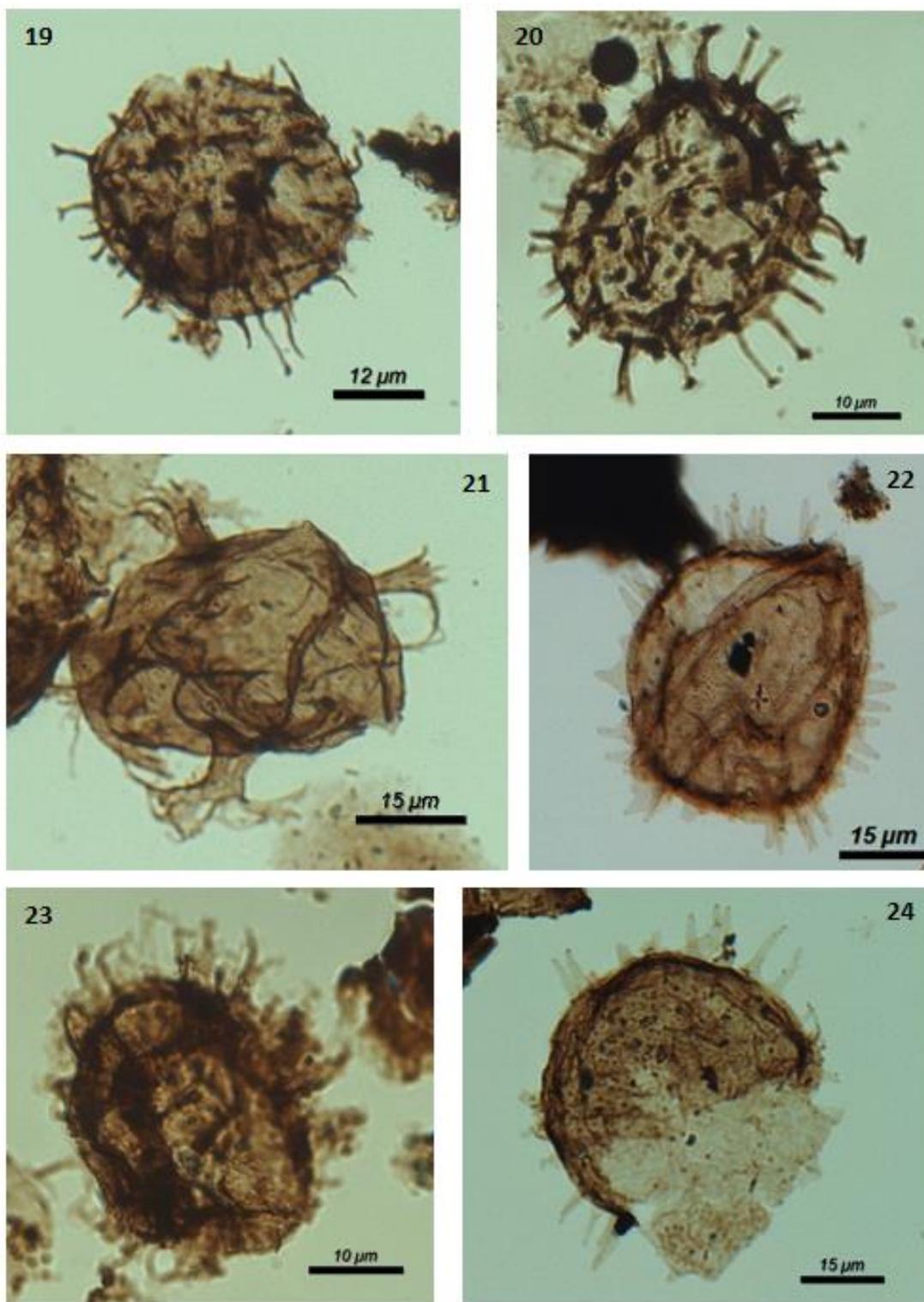
Ceratales: 7: *Muderongia australis*, 8: *Muderongia endovata*, 9: *Muderongia simplex*, 10: *Muderongia* sp., 11 - 12: *Odontochitina?* sp.

Plancha nº 3: continuación.



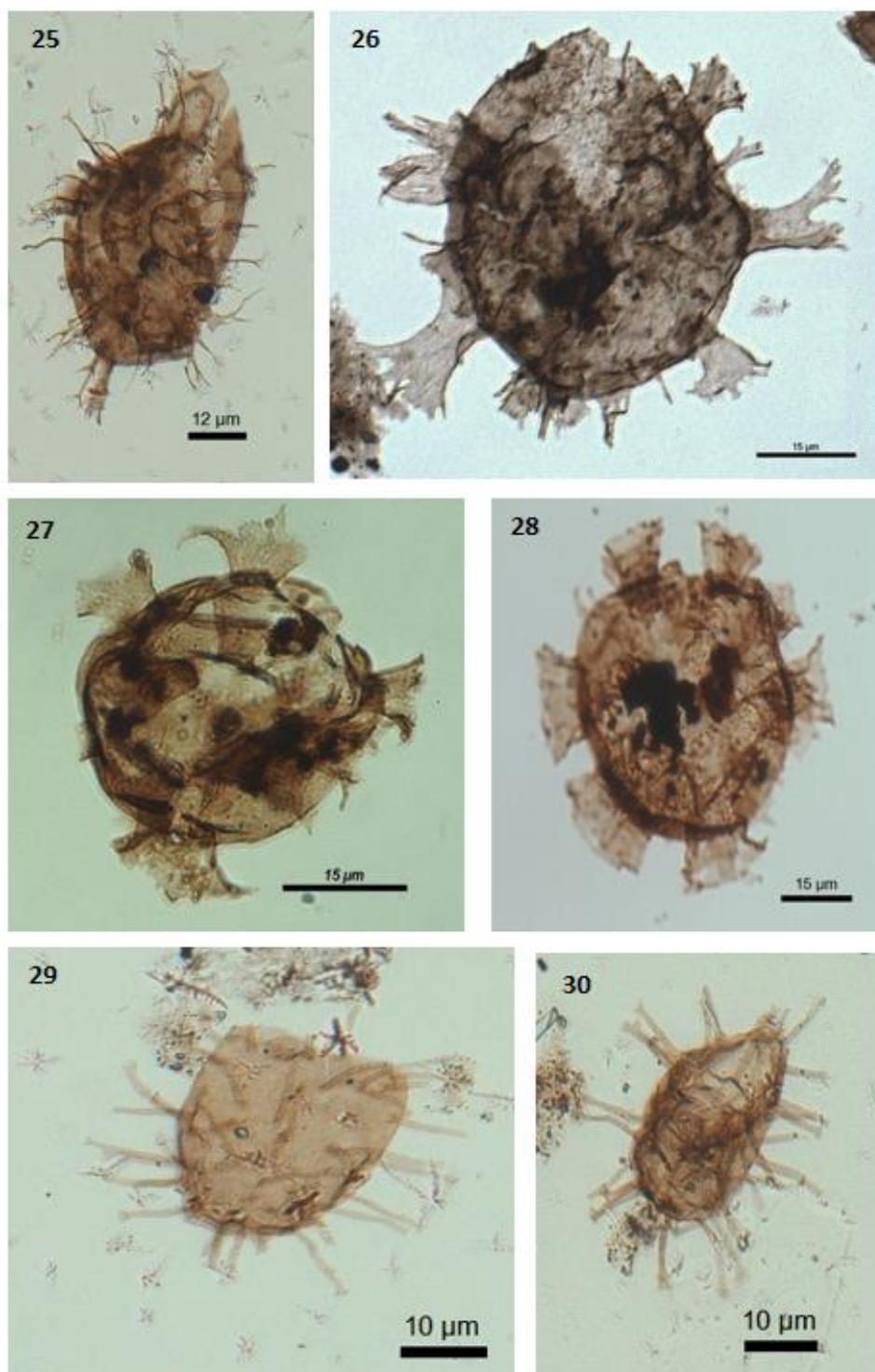
Gonyaulacales corados: 13: *Oligosphaeridium asterigerum*, 14: *Oligosphaeridium* cf. *asterigerum*, 15: *Oligosphaeridium* complex, 16: *Oligosphaeridium* complex *brevispinum*, 17: *Oligosphaeridium* cf. *complex*, 18: *Cleistosphaeridium?* sp.

Plancha nº 4: continuación.



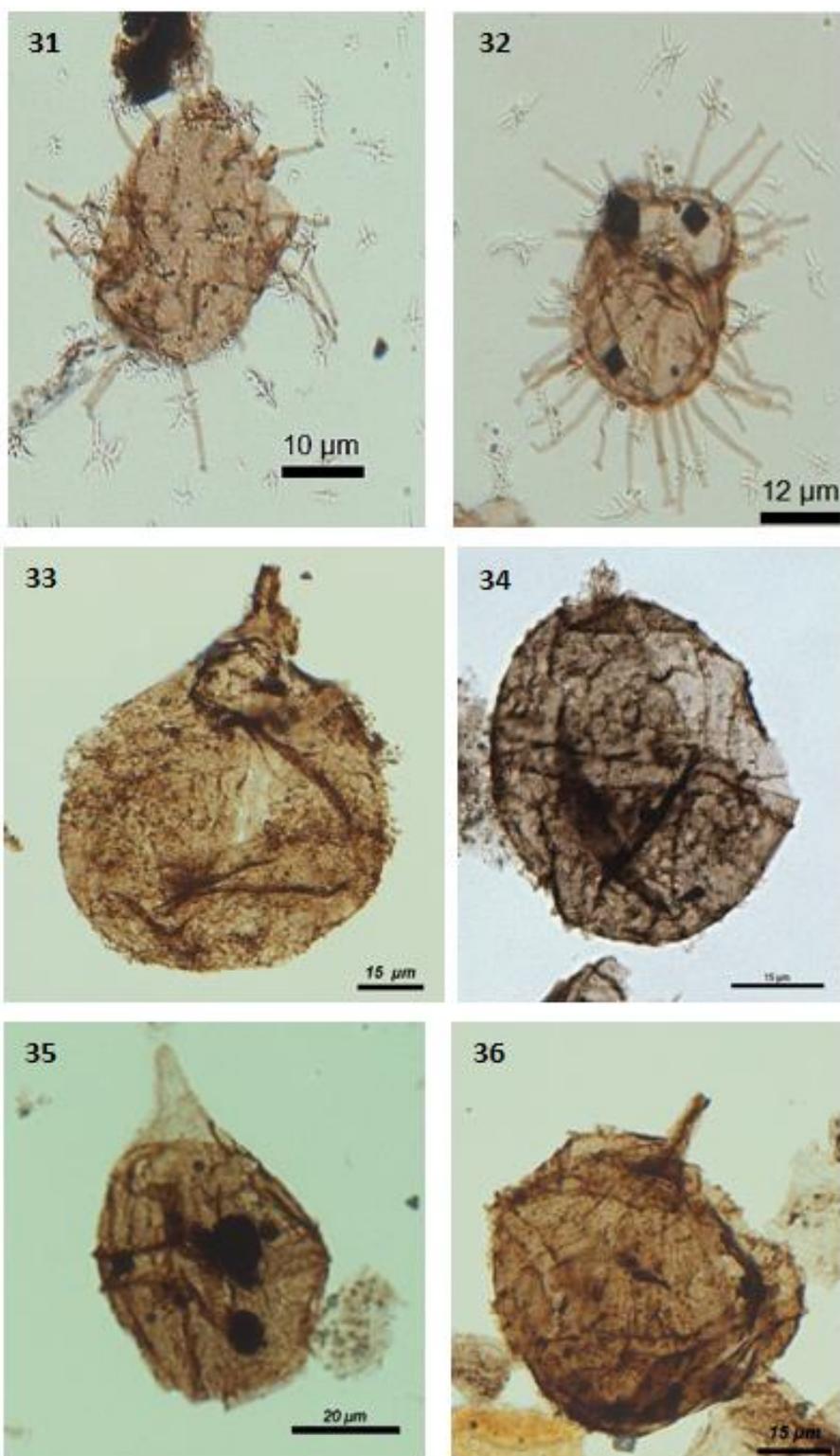
Gonyaulacales corados: 19: *Dapsilidinium? duma*, 20: *Dapsilidinium* sp., 21: *Polystephanephorus euryanthus*, 22: *Exochosphaeridium?* sp., 23: *Glaphyrocysta espiritosantensis*, 24: *Hystrichodinium?* sp.

Plancha nº 5: continuación.



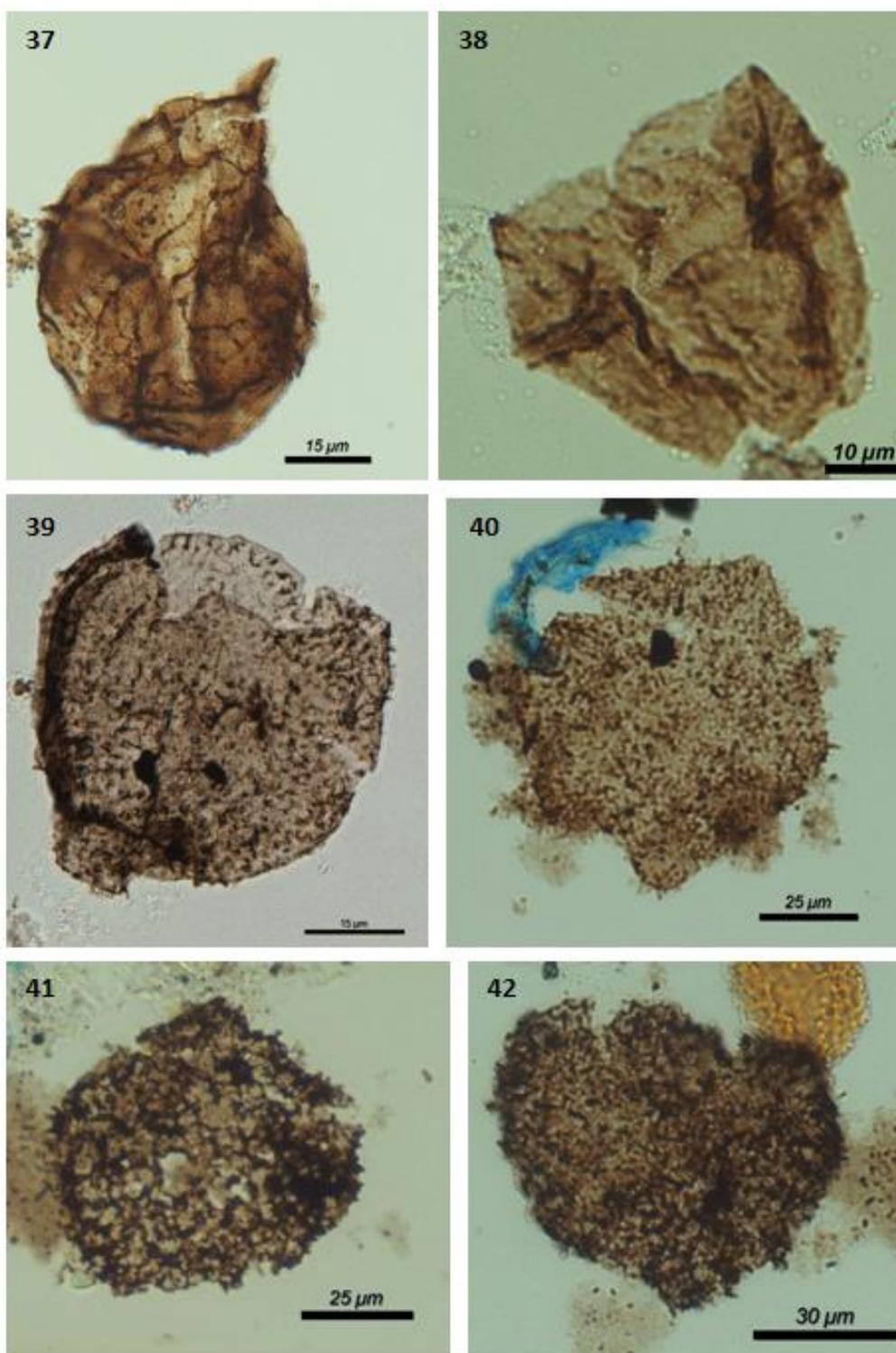
Gonyaulacales corados: 25: *Coronifera oceánica*, 26: *Oligosphaeridium* sp., 27: *Oligosphaeridium poculum*, 28: *Hystrichosphaeridium tubiferum* subsp. *brevispinum*, 29: *Tanyosphaeridium regulare*, 30: *Tanyosphaeridium variecalamus*.

Plancha nº 6: continuación.



Gonyaulacales corados: 31: *Tanyosphaeridium xanthiopyxides*, 32: *Tanyosphaeridium* sp. Gonyaulacales proximados: 33: *Apteodinium* sp., 34: *Criboperidinium* sp., 35: *Psaligonyaulax deflandrei*, 36: *Criboperidinium intricatum*.

Plancha nº 7: continuación.



Gonyaulacales proximados: 37: *Cribroperidinium muderongense*. Areoligeroideos: 38: *Circulodinium?* sp., 39: *Circulodinium distinctum*, 40: *Tenua hystrix*, 41: *Pseudoceratium securigerum*, 42: *Cyclonephelium vannophorum*.

Anexo 4.

Plancha n° 1:

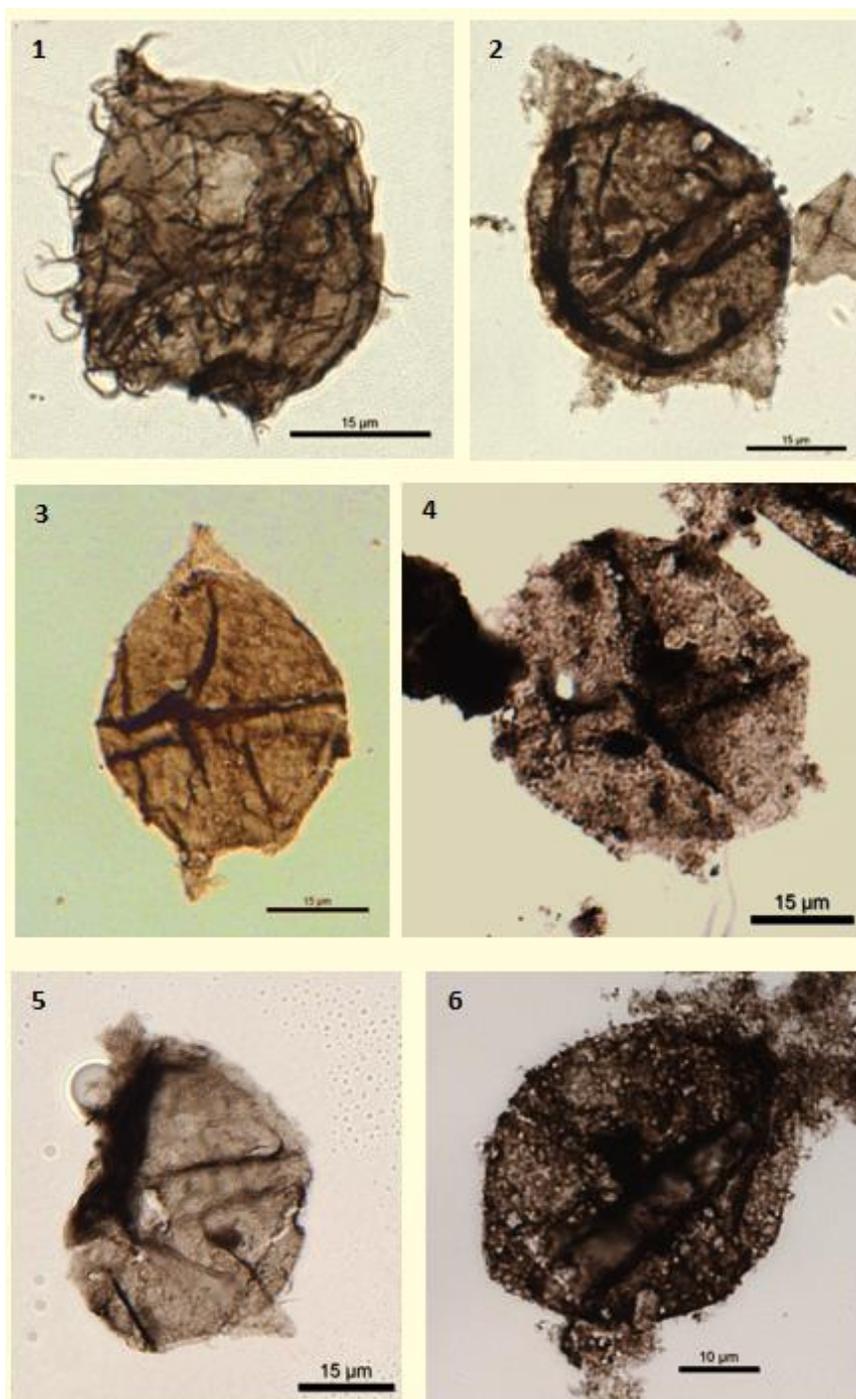
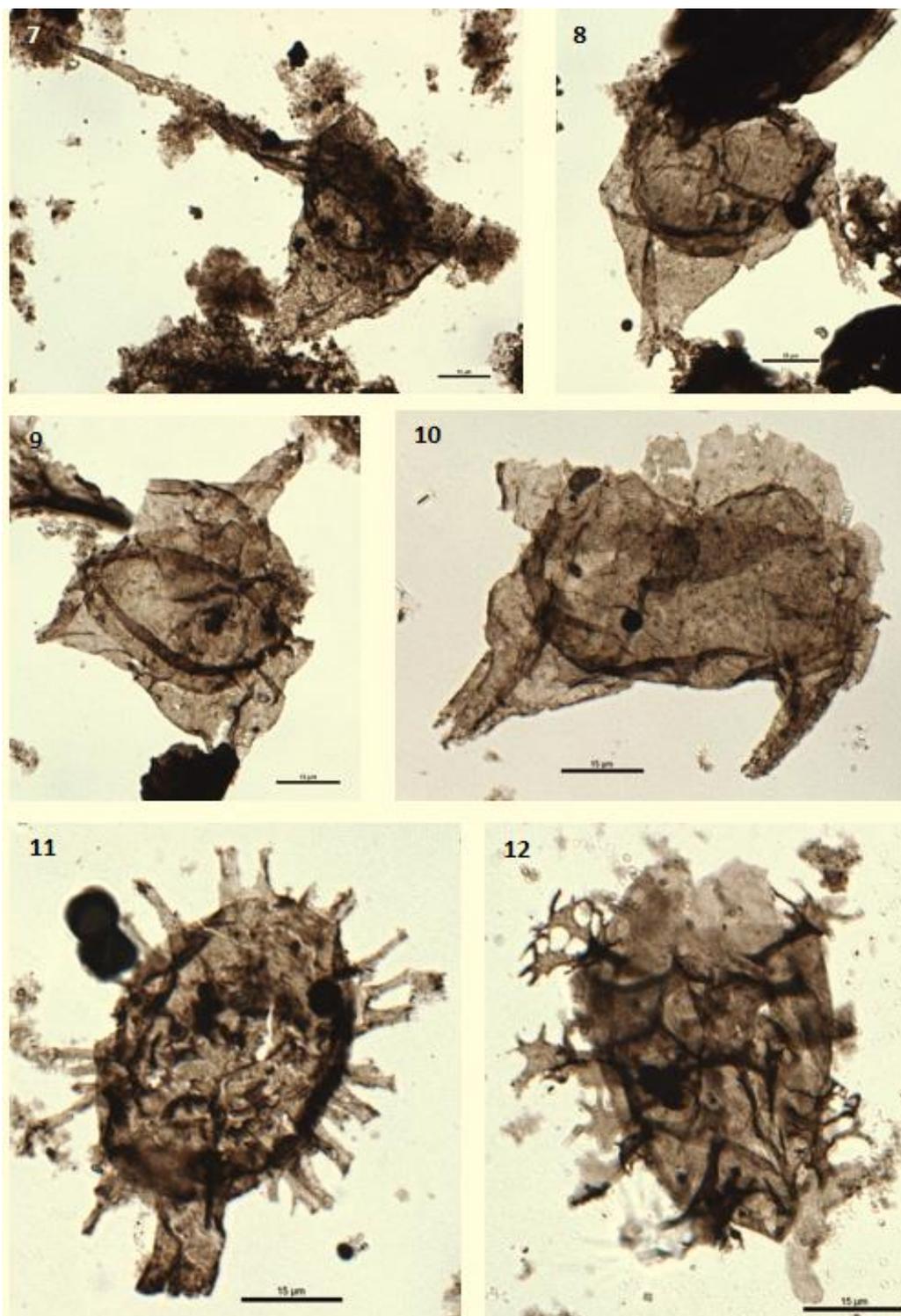


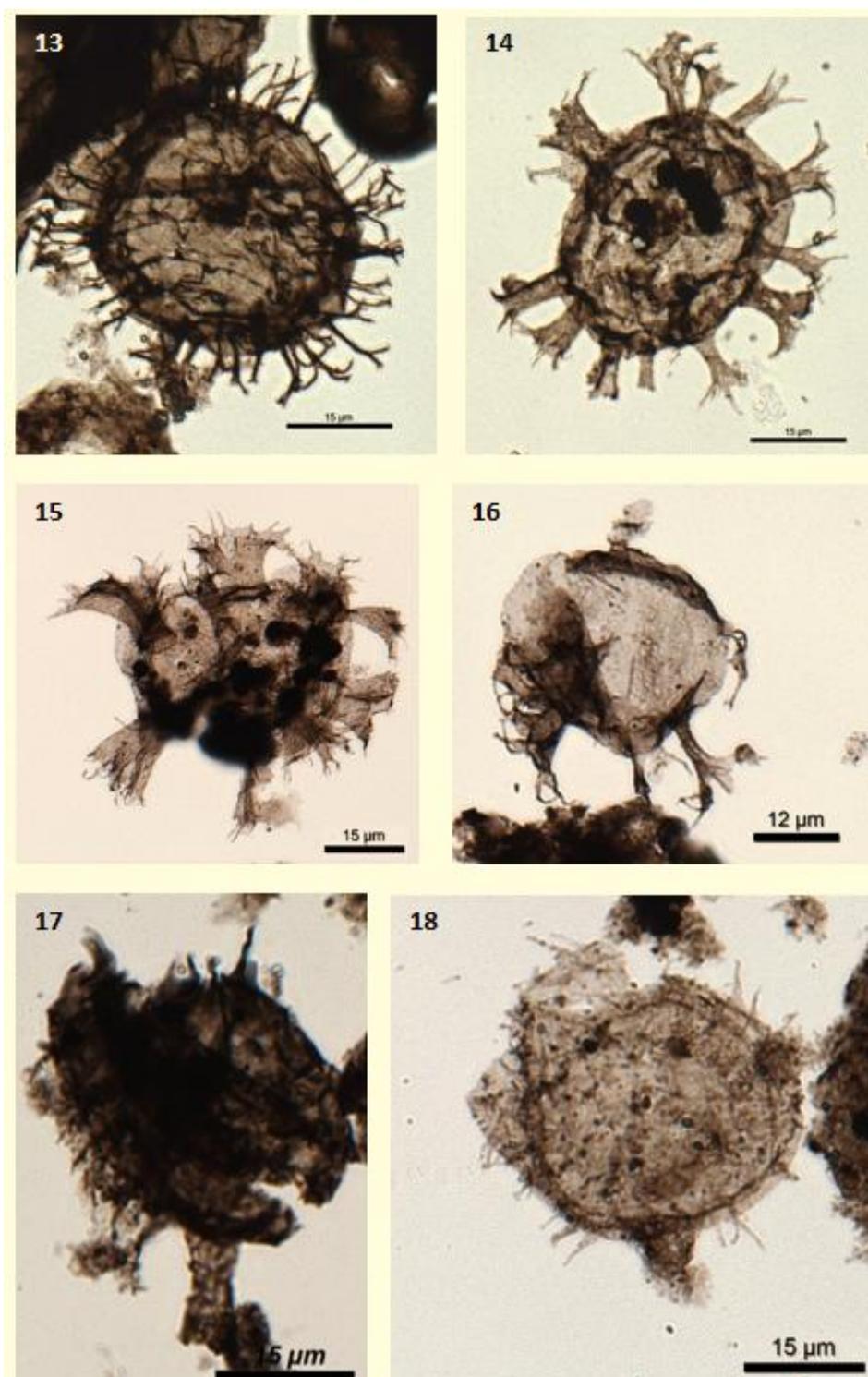
Figura 16. Fotografías de las especies y géneros identificados bajo el microscopio correspondientes al pozo ANH-CON-06-ST-S. Peridinales: 1: *Palaeohystrichophora infusorioides?*, 2: *Subtilisphaera pirnaensis*, 3: *Subtilisphaera senegalensis*, 4: *Subtilisphaera* cf. *senegalensis*, 5: *Subtilisphaera* sp., 6: *Subtilisphaera?* sp.

Plancha nº 2: continuación.



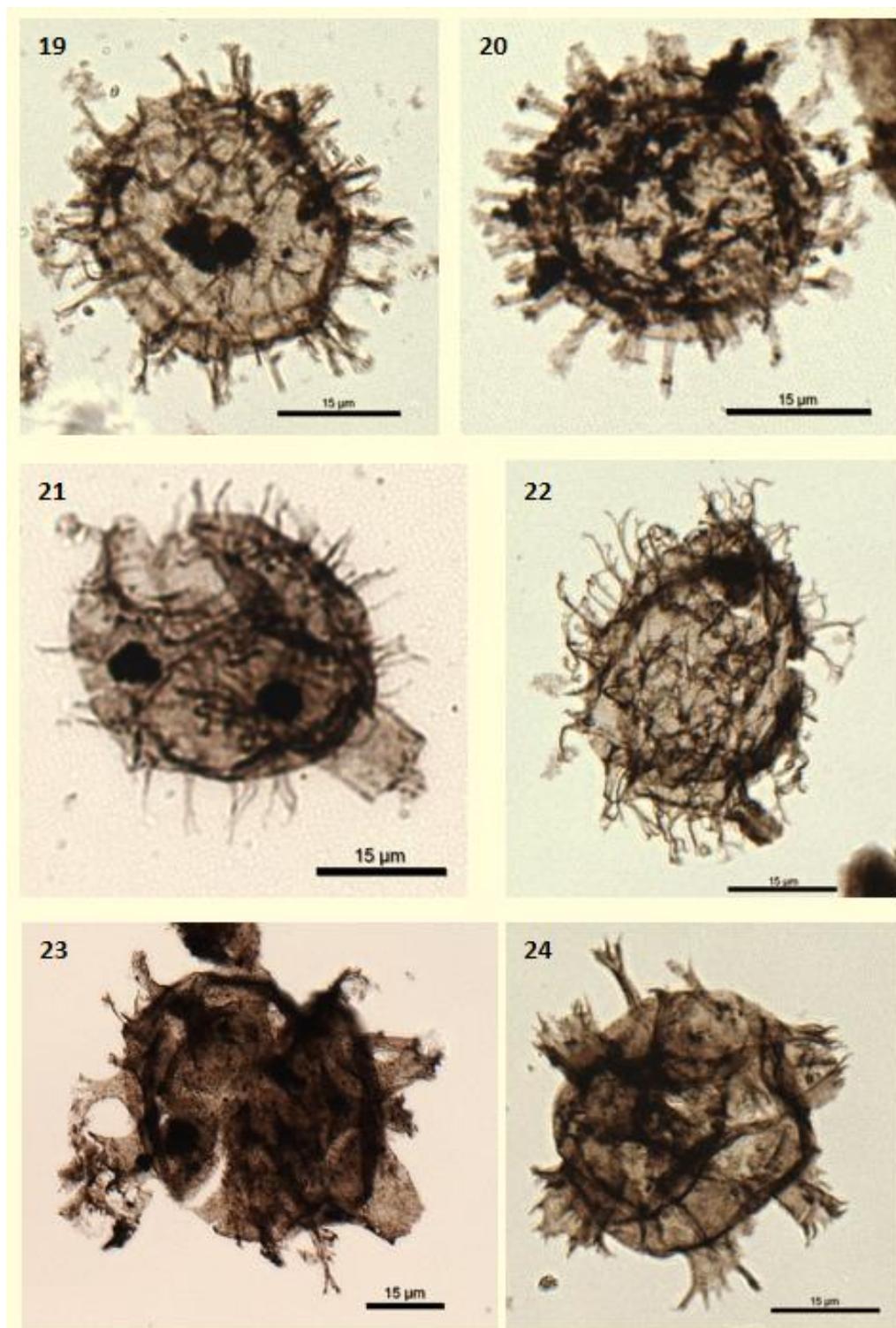
Ceratales: 7: *Odontochitina diducta*, 8: *Muderongia imparilis*, 9: *Muderongia?*, 10: *Odontochitina* sp. Gonyaulacales corados: 11: *Coronifera albertii*, 12: *Oligosphaeridium asterigerum*.

Plancha nº 3: continuación.



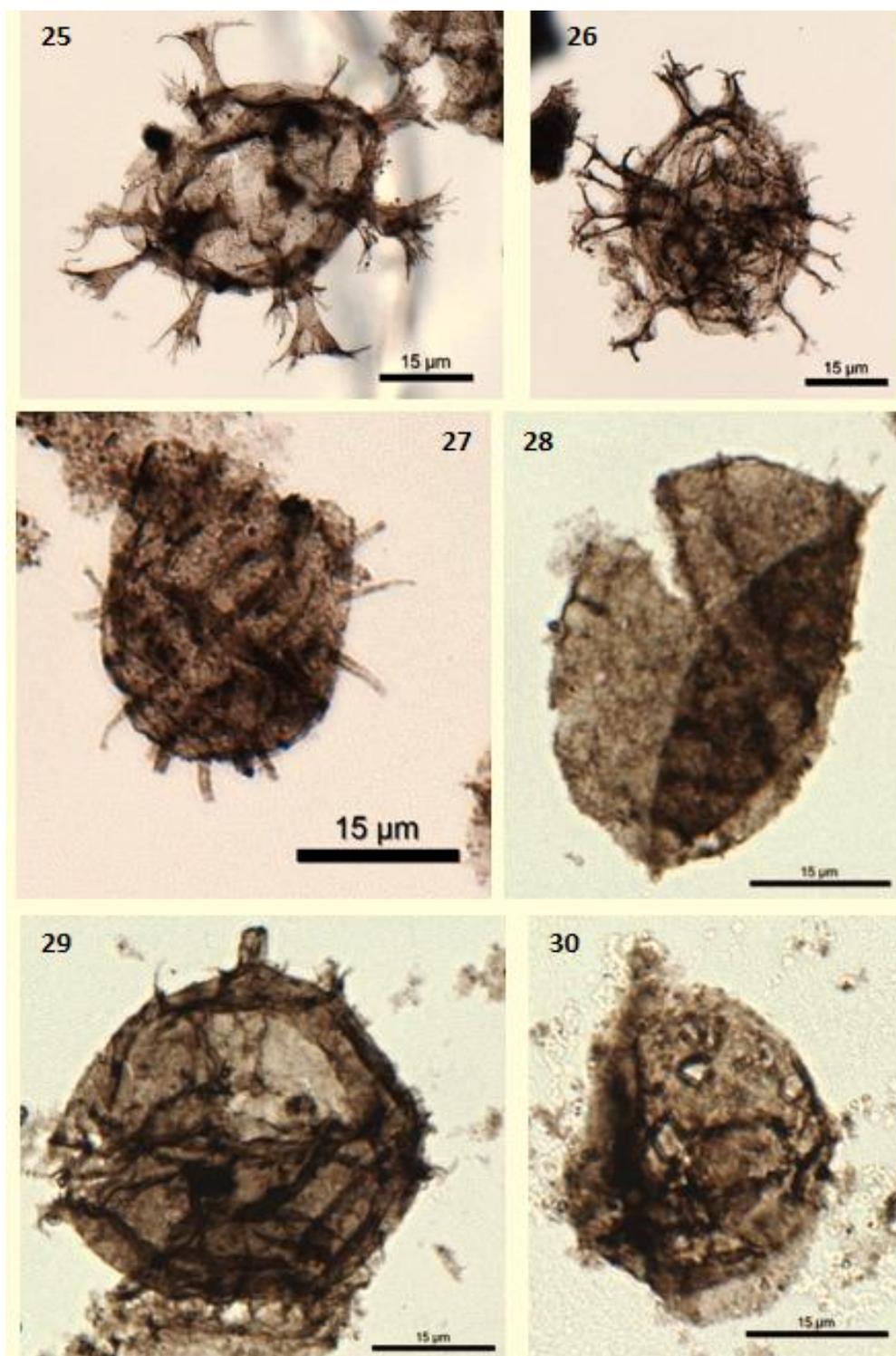
Gonyaulacales corados: 13: *Spiniferites* aff. *aracajuensis*, 14: *Oligosphaeridium* complex, 15: *Oligosphaeridium* complex *brevispinum*, 16: *Oligosphaeridium* cf. *Complex*, 17: *Coronifera?* sp., 18: *Coronifera* sp.

Plancha nº 4: continuación.



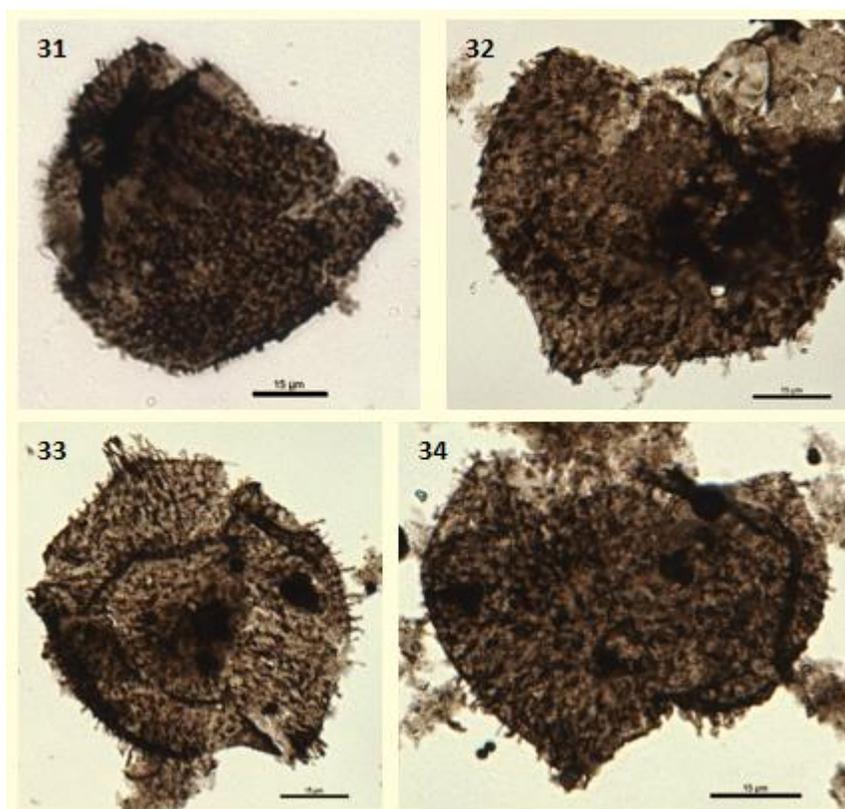
Gonyaulacales corados: 19: *Cleistosphaeridium?*, 20: *Dapsilidium? sp.*, 21: *Coronifera monstruosa*, 22: *Coronifera oceánica*, 23: *Oligosphaeridium? sp.*, 24: *Oligosphaeridium sp.*

Plancha nº 5: continuación.



Gonyaulacales corados: 25: *Oligosphaeridium pulcherrimum*, 26: *Spiniferites* sp., 27: *Tanyosphaeridium* sp.
 Gonyaulacales proximados: 28: *Apteodinium* sp., 29: *Cribroperidinium*?, 30: *Psaligonyaulax* sp.

Plancha nº 6: continuación.



Areoligeroides: 31: *Circulodinium brevispinatum*, 32: *Cyclonephelium*, 33: *Circulodinium distinctum*, 34: *Tenua*.