

Estudio Palinológico de un Núcleo en San Juan de Saco, Departamento de Atlántico.

Juan Diego Chacón Camargo

Trabajo de Grado para Optar el título de Geólogo

Director

Luis Enrique Cruz Guevara

Geólogo, Ph. D.

Codirector

Guillermo Rodríguez Forero

Geólogo, MsC.

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Fisicoquímicas

Escuela de Geología

Bucaramanga

2019

A Dios, por encaminarme en este viaje.

*A mis padres José Luis y Nancy por su infinito amor
y su apoyo incondicional a lo largo de toda mi vida.*

*A mi hermano Santiago, quien sigue mis pasos,
Por su amor y su invaluable compañía.*

Agradecimientos

El autor expresa sus agradecimientos a:

Ángela Manuela Sánchez, por ser un pilar en mi vida, quien me sostuvo, me apoyó y me motivó a seguir adelante.

Luis Enrique Cruz Guevara, por su entrega, su preocupación, por ser un excelente mentor y brindarme un gran apoyo en este proceso.

A Guillermo Rodríguez, por introducirme en el increíble mundo de la palinología, por su guía, valiosas enseñanzas, correcciones, sugerencias y por ayudarme a crecer tanto en el ámbito académico como personal, sin usted este trabajo no sería una realidad.

A Giovanni Bedoya, por compartirme sus conocimientos, amor por la palinología y por colaborar siempre que lo necesité.

A Carolina por su compañía, ayuda, y por sus incontables consejos, que fueron de gran ayuda en este proyecto.

Al grupo de investigación del Instituto Colombiano del Petróleo por sus invaluable enseñanzas, su apoyo incondicional y por hacer de mi estadía un recuerdo muy grato (Felipe de la Parra, Olga, Edwin, Jonathan, Claudia, Sofía, Carlos).

A mis amigos por su valiosa por estar presentes en todo este proceso, por su apoyo su compañía y su valiosa amistad.

A mi familia, por animarme, apoyarme, seguir de cerca mis pasos y recordarme una vez más la importancia y felicidad de tenerlos en mi vida.

Todos los que no logro mencionar, pero han sido de gran importancia durante todo este proyecto.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción.....	12
1. Planteamiento del problema	13
2. Objetivos	14
2.1 Objetivo general.....	14
2.2 Objetivos específicos	14
3. Metodología.....	15
3.1 Primera fase: Recopilación de información.	15
3.2 Segunda fase: Fase de laboratorio.....	15
3.3 Tercera Fase: Análisis de resultados.....	19
3.4 Cuarta fase: Elaboración del informe.....	20
4. Marco teórico.....	20
4.1 Geología regional.....	20
4.1.1 Geología estructural:	21
4.1.2 Estratigrafía:	24
4.2 Antecedentes.....	28
4.3 Palinología.....	30
4.4 Paleopalínología.....	31
4.5 Palinomorfos.....	32
4.6 Zonaciones palinológicas en el Norte de Suramérica, usadas en Colombia.	33
5. Resultados y discusión	36

5.1 Análisis palinológico y zonación bioestratigráfica	36
5.1.1 Zona T-17 - <i>Cyatheacidites annulatus</i>	38
.5.1.2 Zona T-18 - <i>Bombacacidites baculatus</i>	38
5.2 Paleoambiente.....	43
5.3 Análisis de máxima verosimilitud (Maximum likelihood).	44
6. Conclusiones.....	46
Referencias citadas	48

Lista de Figuras

Figura 1. Técnica de flotación con Cloruro de Zinc	17
Figura 2. Columna estratigráfica generalizada para el pozo San Juan de Saco EST-1. Los puntos rojos representan las muestras obtenidas.	18
Figura 3. Localización Pozo San Juan de Saco EST-1 perforado en zonas aledañas a la localidad de Saco, en el departamento de Atlántico.	22
Figura 4. Marco Tectónico de Colombia. BR=Serranía del Baudó, CB=Bloque Chocó, CC=Cordillera Central, EC=Cordillera Oriental, WC= Cordillera Occidental, GF= Falla de Guaicáramo, MA=Andes de Mérida, MB=Bloque Maracaibo, PR=Serranía del Perijá, RFS=Sistema de Fallas de Romeral, SLR=Serranía de San Lucas, SM=Macizo de Santander, SSM= Falla de Servitá – Santa María (Hincapié, y otros 2008)	23
Figura 5. Columna estratigráfica de la Formación Tubará.	25
Figura 6. Columna estratigráfica de las Gravas de Rotinet.....	27
Figura 7. Localidades de la Formación Tubará, estudiadas por Molinares y otros.....	30
Figura 8. Clases más comunes de palinomorfos.	33
Figura 9. Zonación palinológica propuesta para los Llanos y el Piedemonte Llanero.....	35
Figura 10. Diagrama de recobro de especímenes hallados en las 8 muestras analizadas. La mayoría de las muestras exhiben un recobro que sobrepasa los 100 morfotipos.	36
Figura 11. Carta de distribución de palinomorfos del pozo San Juan de Saco EST -1.	37
Figura 12. Zonación Palinológica del Pozo San Juan de Saco EST-1 y Zonación propuesta por Cárdenas et al. 2019.....	41

Figura 13. Estimación de edad estratigráfica mediante el Análisis de Máxima Verosimilitud para el Pozo San Juan de Saco EST-1.....	44
--	----

Lista de Tablas

<i>Tabla 1.</i> Muestras del pozo San Juan de Saco -EST1, empleadas para el estudio	17
<i>Tabla 2.</i> Horizontes de la Formación Tubará. Tomado y modificado de Anderson 1929.....	28

Resumen

TÍTULO: ESTUDIO PALINOLÓGICO DE UN NÚCLEO EN SAN JUAN DE SACO,
DEPARTAMENTO DE ATLÁNTICO.

AUTOR: JUAN DIEGO CHACÓN CAMARGO **

PALABRAS CLAVE: Palinología, Palinomorfos, Polen, Esporas, Formación Tubará, Datación relativa, Potencial palinológico, Análisis de máxima verosimilitud, Neógeno.

DESCRIPCIÓN

El área de estudio se encuentra ubicada en la cuenca Sinú – San Jacinto al Noroeste de Colombia, en las inmediaciones del corregimiento de Saco, Departamento de Atlántico. El objetivo del estudio consistió en evaluar el potencial palinológico y determinar la edad relativa para la Formación Tubará, a partir del análisis palinológico del núcleo recuperado del pozo San Juan de Saco EST-1. Asimismo, se realizó el análisis de máxima verosimilitud para comparar los resultados obtenidos en el análisis palinológico con el fin de soportar las interpretaciones realizadas.

El análisis palinológico permitió identificar un total 51 morfotipos, de los cuales 28 pertenecen a polen y 23 a esporas, con los cuales se realizó una carta de distribución con los taxa identificados. En las muestras analizadas se identificaron los taxa: *Cyatheacidites annulatus*, *Stephanocolpites evansii* a una profundidad de 247,41 m. La ocurrencia de estos taxa sugiere la Zona T-17 *Cyatheacidites annulatus* propuesta por Jaramillo *et al.*, (2011), a la cual le confiere una edad relativa del Mioceno Tardío a Plioceno Temprano (7.1 - 4.8 Ma). Igualmente, se identificaron los taxa: *Multimarginites vanderhamenii* y *Multiareolites formosus*, los cuales se observaron a 58,75 m de profundidad. La ocurrencia de estos taxa sugiere la Zona T-18 *Bombacacidites Baculatus* que posee una edad relativa de Plioceno - Pleistoceno (4.8 – 0 Ma) según Jaramillo *et al.* (2011) complementando con datos de Muller *et al* (1987).

Siendo así, se definió un intervalo único para la sección analizada, que abarca las zonas T-17 y T-18. Puesto que existe incertidumbre en cuanto al límite de éstas, debido al bajo recobro que exhibieron algunas muestras. Tras el análisis de máxima verosimilitud, se observó que las muestras exhiben valores de probabilidad intermedios. Sin embargo, estos resultados indican que las muestras se encuentran en intervalos de edad recientes, soportando los resultados obtenidos.

*Trabajo de Grado

**Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Geología. Director Luis Enrique Cruz Guevara.

Codirector: Guillermo Rodríguez Forero

ABSTRACT

TITLE: A PALYNOLOGICAL STUDY OF A CORE IN SAN JUAN DE SACO, ATLANTIC DEPARTMENT.

AUTHOR: JUAN DIEGO CHACÓN CAMARGO

KEYWORDS: Palynology, Palynomorphs, Pollen, Spores, Tubara Formation, Relative dating, Palynological potential, Maximum likelihood analysis, Neogene.

DESCRIPTION:

The study area is located in the Sinú - San Jacinto basin in Northwestern Colombia, in the immediate vicinity of Saco District, Atlántico Department. The objective of this study consisted in the evaluation of the palynological potential and determination of the relative age for the Tubara Formation, based on the palynological analysis of the recovered core from the San Juan de Saco EST-1's well. Furthermore, The maximum likelihood analysis was performed to compare the results obtained on the palynological analysis in order to support the interpretations that were made.

The palynological Analysis allowed to identify 51 morphotypes, which 28 of them belong to pollen and 23 spores, which were used to develop a distribution letter with the identified taxa. In the analyzed samples the *Cyatheacidites annulatus*, *Stephanocolpites evansii* were identified at a depth of 247,41 m. The occurrence of this taxa Suggest that the T- 17 *Cyatheacidites annulatus* zone proposed by Jaramillo *et al* (2011), which is conferred a relative age of a Late Miocene to an Early Pliocene. Likewise, the *Multiareolites formosus* and *Multimarginites vanderhamenii* were identified, which were observed at 58,75 m of depth. The occurrence these taxa suggest that the T-18 *Bombacacidites baculatus* zone possess a relative age of Pliocene - Pleistocene according Jaramillo *et al* (2011) complimenting with the Muller *et al* (1987) data.

Thus, a unique interval was defined for the analyzed section covering the T- 17 and T-18 zones, since uncertainty exists along their limits, this is because the low recovery exhibited by some of the samples. After the maximum likelihood analysis, it was observed that the samples exhibited intermediate probability values. However, these results indicate that the samples can be found in current ages, supporting the obtained results.

*Bachelor Thesis

**Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Geología. Director Luis Enrique Cruz Guevara.
Codirector: Guillermo Rodríguez Forero

Introducción

La Formación Tubará (Anderson, 1929), es una unidad informal compuesta principalmente por sucesiones de areniscas y lodolitas, cuya edad ha sido debatida por múltiples autores a lo largo del tiempo, finalmente llegando a la edad actual definida como Plioceno Temprano con base en foraminíferos planctónicos (Molinares, et al, 2012). Esta formación esta reportada como reservorio de hidrocarburos y se encuentra ubicada en la Cuenca Sinú San Jacinto, esquina noroccidental Colombia y de Sur América (Agencia Nacional de Hidrocarburos, 2009). Presenta buen recobro de palinomorfos, cuerpos orgánicos microscópicos con paredes resistentes que se encuentran en los residuos de maceración palinológica y son el objeto de estudio palinológico.

Los palinomorfos incluyen: Polen, esporas, algas, hongos, dinoflagelados, entre otros. Los cuales son utilizados junto con otras herramientas para inferir edades relativas y condiciones paleoambientales de las unidades sedimentarias, así como para realizar modelos de evolución geológicos de una cuenca o zona de estudio, y esquemas de correlación locales y regionales (Traverse, 2007). Además del hecho que diversas especies vivieron en rangos de edad relativamente cortos, pueden marcar eventos importantes que sucedieron a lo largo del tiempo en una cuenca o incluso eventos globales, lo que las hace perfectas para realizar bioestratigrafía (Traverse, 2007).

Debido a su informalidad, la Formación Tubará carece de estabilidad en cuanto a su nomenclatura, edad y relaciones estratigráficas con unidades aparentemente coetáneas en otras localidades. En este estudio se pretende analizar el potencial palinológico y determinar la edad relativa de la Formación Tubará a partir del núcleo recuperado del pozo exploratorio San Juan de

Saco EST-1, perforado en las zonas aledañas a la población de Saco (Departamento de Atlántico)

1. Planteamiento del problema

La Formación Tubará ha sido reportada como unidad reservorio de hidrocarburos en la Cuenca Sinú - San Jacinto (Agencia Nacional de Hidrocarburos, 2009). A pesar de los estudios realizados anteriormente, la definición informal de la Formación Tubará ha hecho que ésta carezca de estabilidad en cuanto a su nomenclatura, edad y relaciones estratigráficas con unidades aparentemente coetáneas en otras localidades. Por esta razón, el estudio de la Formación Tubará en el área de San Juan de Saco, permitirá caracterizar el contenido palinológico de la unidad, esclarecer el rango cronológico que esta abarca, complementando la información que se tiene de la unidad para resolver sus inquietudes estratigráficas.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Evaluar el potencial palinológico para la sección Arroyo Saco, mediante el análisis de un núcleo del área de San Juan de Saco Departamento de Atlántico.

2.2 Objetivos específicos

- Seleccionar muestras pertenecientes al núcleo con base en las características litológicas para escoger la litología óptima para el estudio palinológico.
- Identificar taxonómicamente los palinomorfos presentes, utilizando microscopio óptico de luz transmitida.
- Asignar la edad relativa de la sección Arroyo Saco interpretando bioestratigráficamente la distribución palinológica.

3. Metodología

La elaboración del presente trabajo fue proyectada en cuatro fases que serán descritas a detalle a continuación:

3.1 Primera fase: Recopilación de información.

La primera fase consistió en la recopilación de recursos bibliográficos (libros, artículos y revistas) referentes a lo plasmado en el planteamiento del problema. Posteriormente se filtró la información obtenida, seleccionando principalmente referencias a los estudios palinológicos, litoestratigráficos y bioestratigráficos de las unidades del Neógeno Tardío (Mioceno – Plioceno) aflorantes en el área de San Juan de Saco.

3.2 Segunda fase: Fase de laboratorio.

Durante la fase de laboratorio, se realizó el procesamiento de las muestras de núcleo seleccionadas, en el Laboratorio de Procesamiento de Muestras Geológicas del Instituto Colombiano del Petróleo (Piedecuesta, Santander). La preparación se desarrolló siguiendo la metodología propuesta por Traverse (2007):

1. Selección de las muestras de núcleo con potencial palinológico (Figura 2). En la Tabla 1 se encuentra el listado de las muestras seleccionadas
2. Se tomaron 20 gr de cada muestra, y se trituraron hasta obtener partículas de aproximadamente 2 mm con el fin de separar los clastos del material orgánico.
3. Posteriormente, el material resultante del triturado se trasladó a un recipiente plástico, al cual se le agregó ácido clorhídrico (HCl) al 10% con el fin de descalcificar la muestra triturada. Este procedimiento se realiza durante 12 horas en una cabina de extracción (C4 cex 120).
4. Luego se neutralizó la solución con agua destilada, y se sometió a un proceso de centrifugado para separar en fases la solución. Finalmente se decantaron los resultantes.
5. Se agregó ácido fluorhídrico (HF) al 55% al material precipitado para desmineralizar la muestra, y se agitó constantemente para mejorar la reacción. A continuación, se dejó en reposo durante 4 horas hasta que finalizó la reacción.
6. La solución fue neutralizada nuevamente con agua destilada, y se volvieron a someter las muestras al proceso de centrifugado para su posterior decantación y lavado.
7. Seguidamente, se realizó una técnica de flotación que consiste en agregar Cloruro de Zinc a la solución. Posteriormente, se agitó para conseguir una mezcla homogénea, la cual se dispuso a un proceso de centrifugado (2000rpm) para separar los residuos inorgánicos del material orgánico de interés (Figura 1).
8. El material obtenido se tamizo a través de mallas de 150 μm y 10 μm , y se montaron en un vaso de precipitado.
9. Luego del filtrado exhaustivo se tomaron alícuotas de las muestras procesadas en viales únicos para cada muestra (sin oxidar).

10. Posteriormente, se oxidaron las muestras de los vasos de precipitados, usando ácido nítrico (HNO_3) y se volvió a neutralizar el material con agua destilada.
11. Tras la neutralización se dispusieron los portaobjetos con dos cubreobjetos, donde se colocaron las alícuotas para las muestras oxidadas y no oxidadas, se les agregó conservante (polivinílico) y se dejaron reposar en la plancha de calentamiento a 60°C para eliminar la fase líquida.
12. Posteriormente, se le agregó bálsamo de Canadá, y se aumentó la temperatura. A continuación, se voltearon los cubreobjetos y se dejaron reposar una hora a 120°C para asegurar que las muestras se adhirieran al portaobjetos. Finalmente se limpiaron y se dejaron enfriar, para comenzar el análisis microscópico. El cual consistió en realizar conteo de especímenes para cada placa, este análisis se realizó mediante el microscopio de luz transmitida donde se identificaron taxonómicamente los palinomorfos.



Figura 1. Técnica de flotación con Cloruro de Zinc, tomado y modificado de Traverse (2007)

Tabla 1.

Muestras del pozo San Juan de Saco -EST1, empleadas para el estudio

Muestra	1	2	3	4	5	6	7	8
Profundidad(m)	38,69	58,75	98	130	170,15	210,5	247,91	282,4

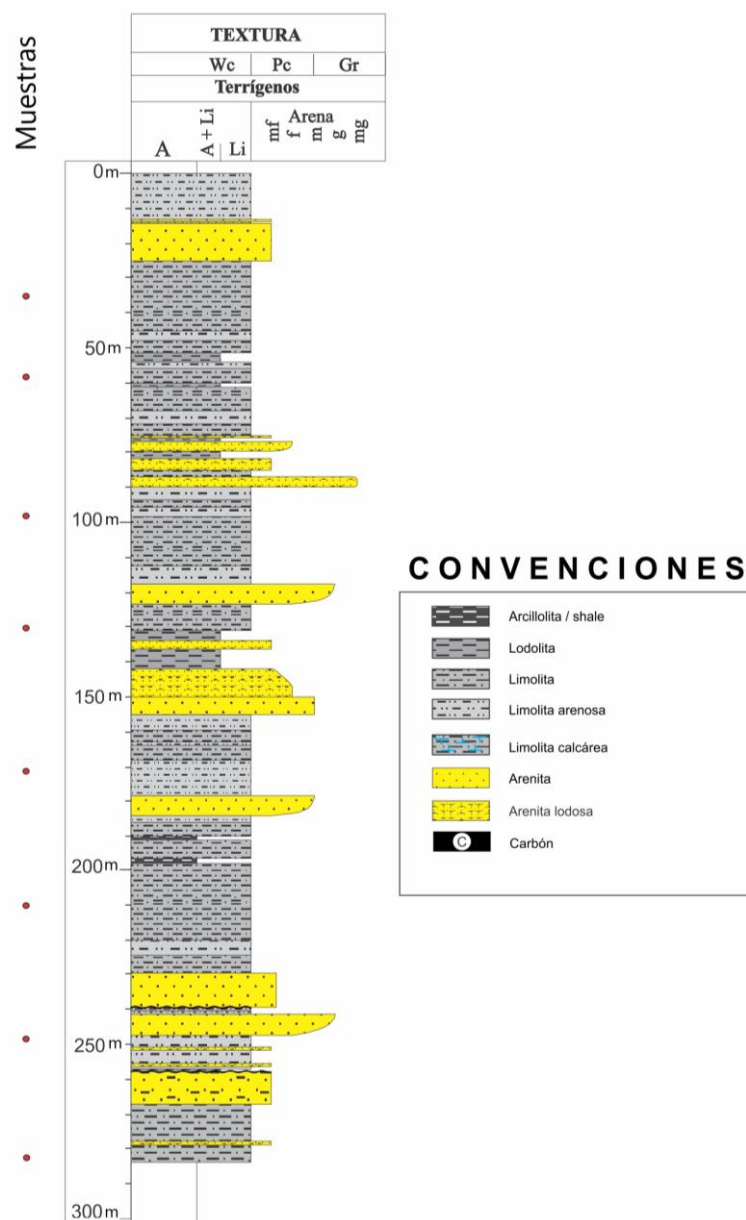


Figura 2. Columna estratigráfica generalizada para el pozo San Juan de Saco EST-1. Los puntos rojos representan las muestras obtenidas. Tomado y modificado de Cárdenas *et al.* (En progreso).

3.3 Tercera Fase: Análisis de resultados.

En esta etapa se organizó la información obtenida en las fases anteriores, posteriormente se realizó un diagrama de ocurrencia de las especies identificadas con sus respectivas profundidades mediante el software Stratabugs, así como una interpretación bioestratigráfica de los resultados obtenidos.

Se realizó el Análisis de Máxima Verosimilitud (Maximum Likelihood) que es un método probabilístico que demuestra como la abundancia de microfósiles puede ser usada para ubicar estratigráficamente muestras aisladas (provenientes de núcleos). Esto se logra, a partir de la comparación de las abundancias de especies de microfósiles obtenidas en las muestras aisladas, con los datos de un modelo de referencia existente.

Al situar una muestra aislada en una columna estratigráfica es posible representar de forma precisa la distribución de abundancias microfósiles. La representación compuesta de una cantidad determinada de muestras en una columna estratigráfica, proporciona un modelo de referencia de cambios en las asociaciones fósiles a lo largo del tiempo, en el cual las muestras aisladas pueden ser comparadas. El modelo de referencia contiene la información de rangos paleontológicos, datos de diversidad e incluye los taxa y datos de abundancia conocidos para todos los intervalos de tiempo geológico. Este método sigue la suposición de que los cambios en las abundancias son causados por cambios taxonómicos a través del tiempo. Por lo tanto, las comparaciones van a estar limitadas a estratos y muestras que compartan ambientes depositacionales similares.

La abundancia taxonómica del modelo proporciona datos comparativos contra los cuales las estimaciones de las muestras aisladas serán emparejadas. Cada taxon será modelado como una función de densidad de probabilidad. Esta densidad de probabilidad representa la probabilidad de encontrar un taxón particular en un tiempo específico. Una vez las funciones de densidad de probabilidad de cada una de las muestras analizadas sean calculadas, comenzara la estimación de la edad. Por consiguiente, el enfoque probabilístico proporcionado por el análisis de máxima verosimilitud, da como resultado estimaciones de la edad de la muestra (Punyasena et al., 2012).

3.4 Cuarta fase: Elaboración del informe.

Se realizó el informe final de trabajo de grado (Cuerpo del Trabajo), tras organizar los resultados obtenidos de la investigación.

4. Marco teórico

4.1 Geología regional

La pozo exploratorio analizado se encuentra en la cuenca Sinú – San Jacinto al noroeste de Colombia. Esta cuenca está limitada al norte con la costa Caribe, al oeste con el sistema de fallas de Uramita, al sur con las rocas cretácicas de la Cordillera occidental y al Este con el sistema de fallas de Romeral. (Barrero et al., 2007; Figura 3 y 4)

4.1.1 Geología estructural: La cuenca Sinú San Jacinto ha sido afectada por esfuerzos compresionales laterales normales al margen continental, los cuales están asociados a una interacción continua entre las cortezas Caribe oceánicas (Cuenca de Colombia) y del norte de Sur América Continental, como las fuerzas principales que han estado operando desde el Cretácico superior hasta el Holoceno (Duque-Caro, 1984). Como resultado de estas interacciones se formó una cuña de acreción y esta a su vez generó varios bloques tectónicos con una historia de sedimentación y deformación diferente, de la que se derivó la Serranía de San Jacinto o Cinturón Plegado de San Jacinto. (Barrero *et al.* 2007)

El Cinturón Plegado de San Jacinto, presenta una tendencia regional noreste-suroeste, iniciando al sur de la población de Montería y terminando al norte bajo el Río Magdalena. Al occidente limita con la Cuenca de Cartagena (Chevron, 1986) que actualmente se conoce como la cuenca Sinú Off-shore, y que está separada del cinturón plegado por la Falla Sinú (Duque-Caro, 1973). Al Oriente la Falla de Romeral separa al Cinturón Plegado de San Jacinto de la Cuenca El Plato. (Duque-Caro, 1984; Figura 4)

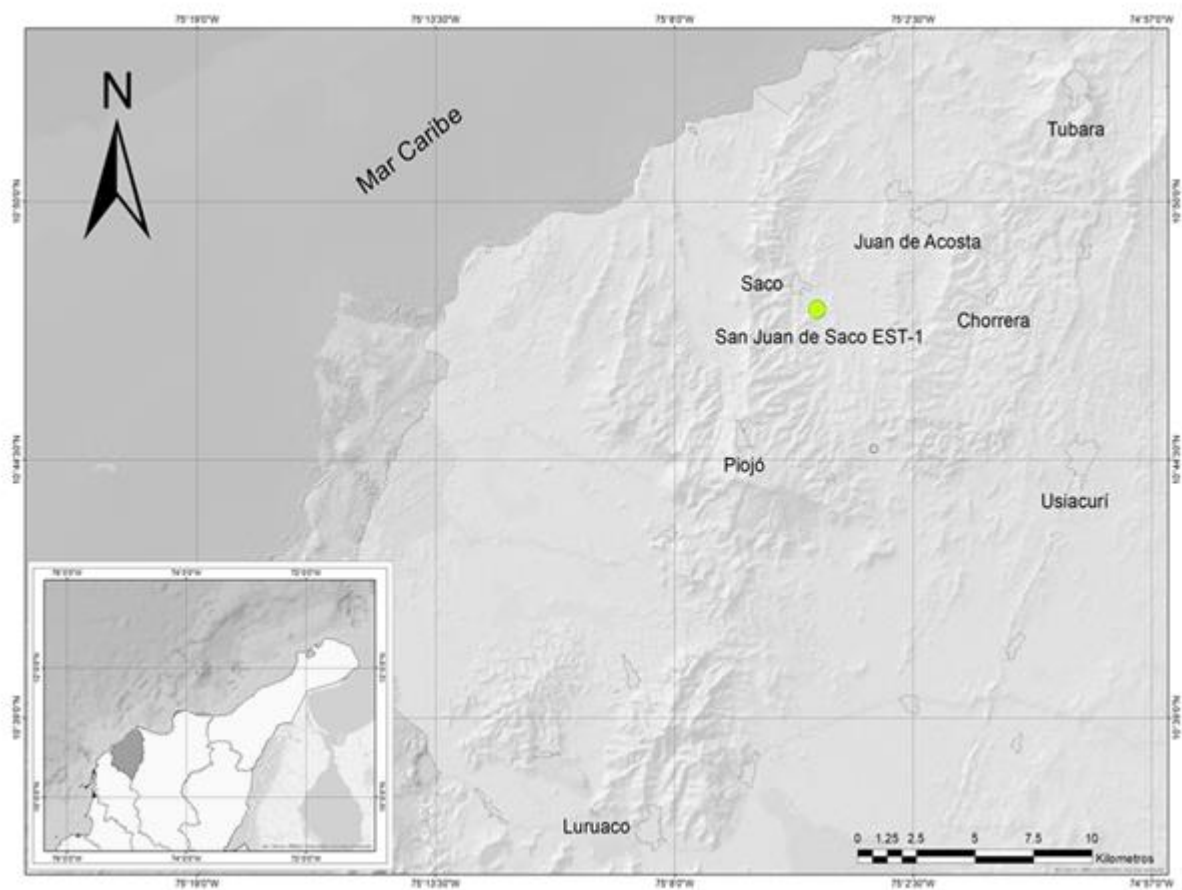
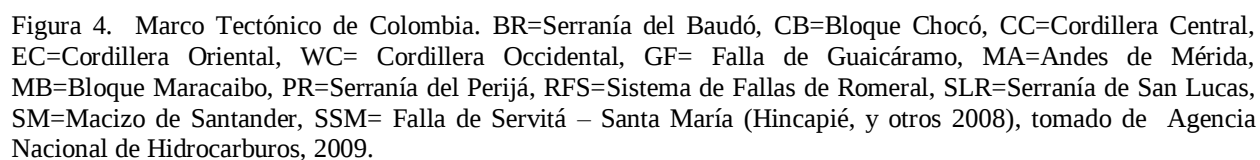


Figura 3. Localización Pozo San Juan de Saco EST-1 perforado en zonas aledañas a la localidad de Saco, en el Departamento de Atlántico. Tomado de Cárdenas et al. (En progreso).



4.1.2 Estratigrafía: la zona de estudio se encuentra en las inmediaciones del corregimiento de Saco, dentro de la cuenca Sinú - San Jacinto donde afloran las formaciones Hibácharo, Tubará y Conglomerados de Rotinet del Neógeno. A continuación, se incluye una breve descripción de cada una.

4.1.2.1 Formación Hibácharo (Ngh). Definida formalmente por Raasveldt (1953), suprayace en contacto concordante con la Formación Las Perdices, y el límite superior está definido en contacto discordante con la Formación Tubará.

En la sección Hibácharo – Torre de Telecom se midió 488 m, pero el espesor total es de alrededor de 800 m. La Formación Hibácharo está compuesta en su sección tipo por intercalaciones de arenitas y limolitas hacia la base; seguida de una intercalación de lodolitas carbonosas con arenitas con algunas capas de bioclásticas, con conchas gruesas de bivalvos; finalmente hacia el tope se encuentran capas de areniscas de grano fino con cemento calcáreo e intercalaciones de lodolitas calcáreas con conchas de bivalvos. Se le ha asignado una edad de Mioceno medio (Barrera, 2001; Figura 5).

4.1.2.2 Formación Tubará (Ngt). Unidad litoestratigráfica propuesta por Anderson (1929), para denominar una secuencia de arenitas de cemento calcáreo intercaladas con lodolitas fisiles, seguida de interestratificaciones de arenitas con cemento silíceo y lodolitas carbonosas, y finalmente un paquete de arenitas líticas con conchas de bivalvos. El espesor parcial medido en la sección Arroyo de Gallinazo es de 206 m y en la sección Carretera de la Cordialidad es de 145 m faltando el techo. En la sección tipo, los contactos superior e inferior son discordantes con la

Formación Hibácharo y la Formación Gravas de Rotinet respectivamente. En otras localidades, el contacto superior es discordante con depósitos cuaternarios. (Barrera, 2001; (Figura 5)

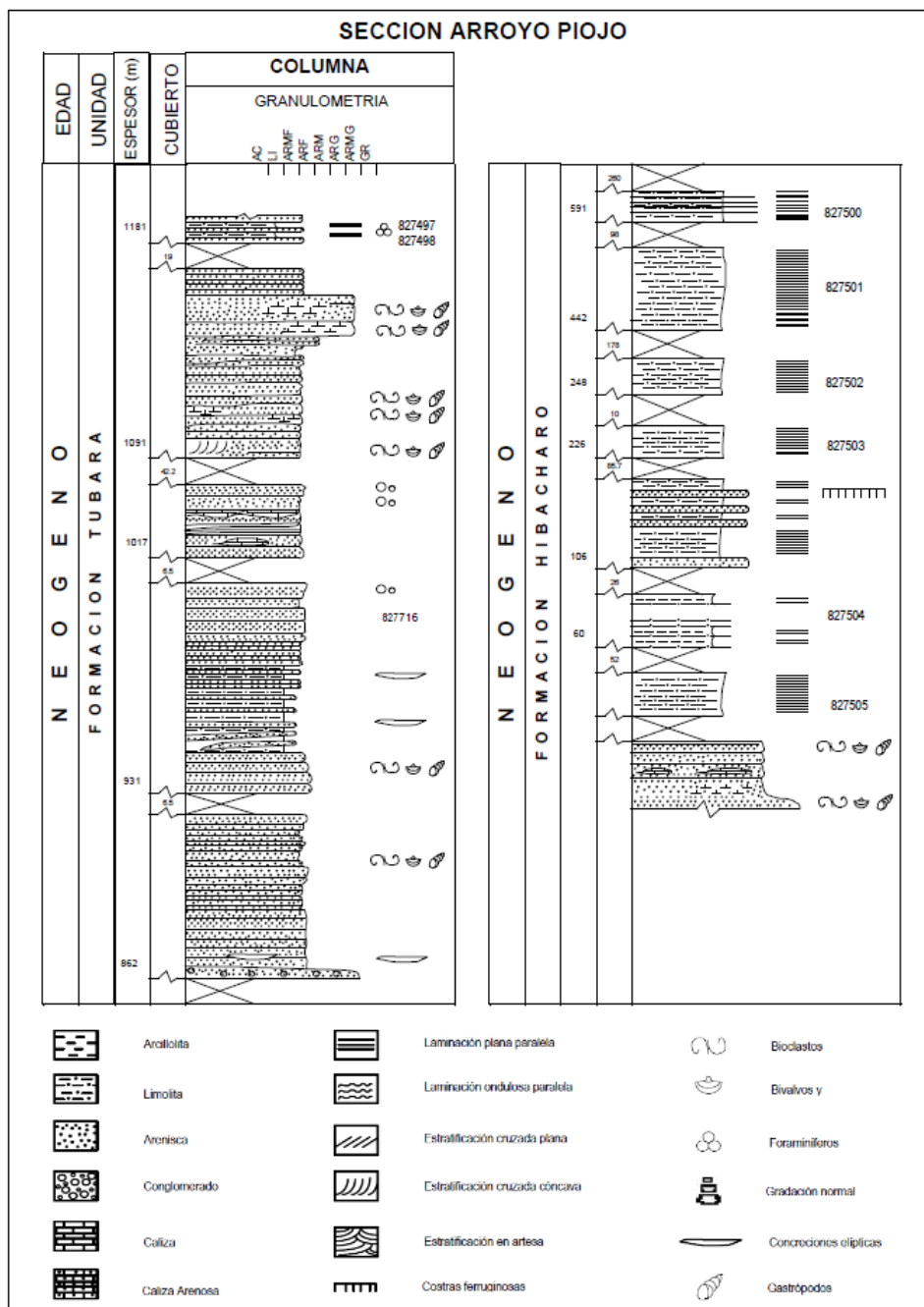


Figura 5. Columna estratigráfica de la Formación Tubará. Tomado de Barrera (2001).

4.1.2.3 Gravas de Rotinet (Qpr) La Formación Rotinet fue Descrita por Link en 1927. Yace discordante sobre las formaciones Hibácharo y Tubará, y el techo esta cubierto por depositos cuaternarios, el espesor medido en la sección compuesta de tres canteras es de 41 m.

Está compuesta a la base por gravas de cuarzo, chert, rocas volcanicas, neises y limolitas en capas guresas y macizas, esas se encuentran en intercalacion con areniscas de grano fino, seguida de una intercalacion de arenas de grano fino y medio con niveles de gravas, al tope esta compuesta por gravas en intercalacion con areniscas de grano fino a levemente conglomeráticas, y se le podría atribuir una edad de Pleistoceno (Barrera, 2001; Figura 6).

SECCION COMPUESTA CARRETERA LURUACO - ROTINET

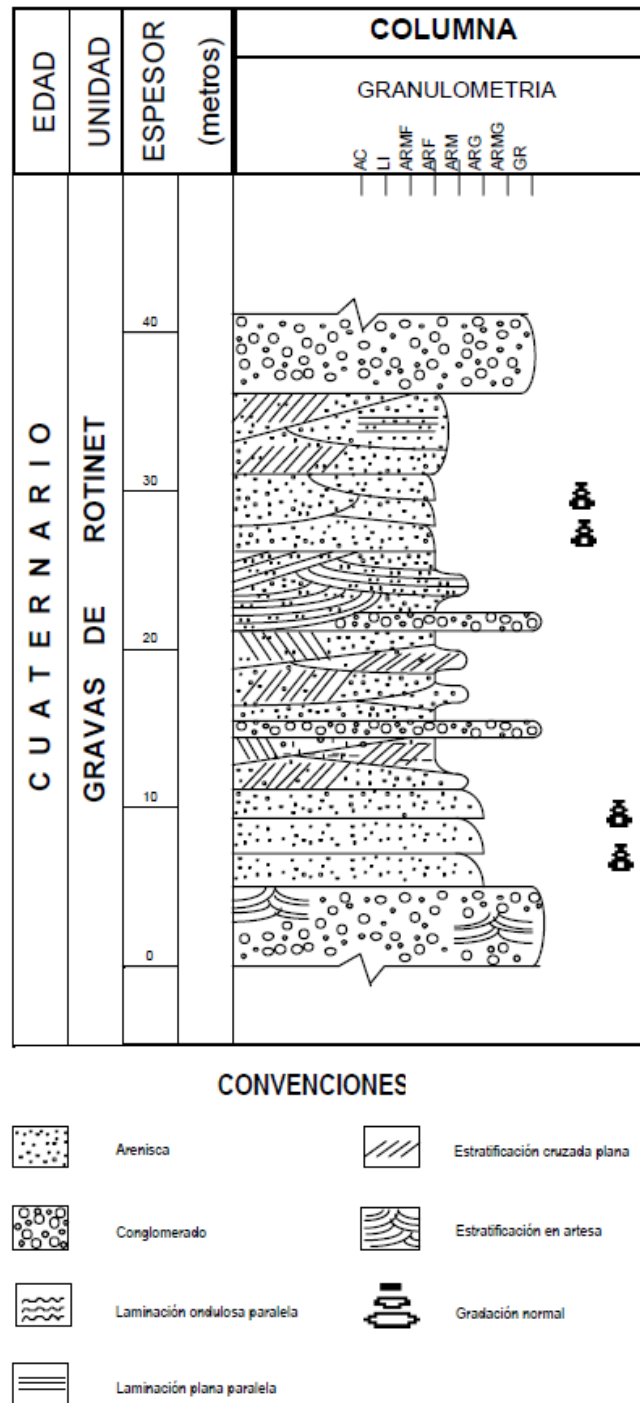


Figura 6. Columna estratigráfica de las Gravas de Rotinet. Tomado de Reyes & Zapata (2001)

4.2 Antecedentes

La Formación Tubará fue descrita por primera vez por Anderson (1929), quien presentó las notas preliminares de una sección del Mioceno del Norte de Colombia. El autor describe la formación mediante ocho horizontes identificados con las letras desde la M hasta la T, con un espesor total de aproximadamente 853 m (2.800 pies; Tabla 2.), y le asigna una edad de Mioceno según el contenido de foraminíferos encontrados. Aunque este autor no dispuso estos horizontes en una columna estratigráfica, la equivalencia entre horizontes y la escala cronoestratigráfica se puede apreciar en la Figura 7.

Tabla 2.

Horizontes de la Formación Tubará. Tomado y modificado de Anderson 1929.

Horizonte	Litología	Espesor (ft)
T	Tope de la sección, no representada localmente	2,650
S	Areniscas amarillentas con tamaño de grano medio, al tope de la Montaña Tubará	450
R	Areniscas amarillentas en el pueblo Tubará, con un contenido numeroso de moluscos	350
Q	Areniscas y Shales	350
P	Shale gris arenoso. Fosilífero en la ladera noroeste de la Montaña Tubara	400
O	Shales arenosos y areniscas discordantes con capas ferruginosas	400
N	Conglomerados con especies de <i>Turritela</i> , <i>Spondylus</i> y otros	550
M	Shales azules o grises, areniscas, conglomerados y capas de guijarros	300

Posteriormente De Porta et al. (1974), afirma que desde su descripción original la Formación Tubará se ha considerado de edad Mioceno, basado en la distribución de los foraminíferos. Esto se debe a la aparición de *Orbulina* spp., lo cual indica que la formación estudiada tiene una edad de por lo menos Mioceno medio (Serravaliano).

Otros autores le asignaron una edad diferente a la Formación Tubará. Royo y Gómez (1942), propone una edad del Langhiano-Tortoniano. Bürgl et al. (1955) colocan los horizontes M, N y O en el Burdigaliano, y los P y Q en el Helveliano. Redmond (1953) estableció dos zonas informales de foraminíferos a la parte superior del Mioceno medio y la Zona II al Mioceno superior. Posteriormente, Van den Bold (1966) estudio los ostrácodos presentes en las Zonas I y II de Redmond (1953), y les asigna una edad de Mioceno tardío.

En estudios mas recientes, Molinares et al. (2012) realizó un estudio micropaleontológico detallado de la fauna de foraminíferos planctónicos y bentónicos de la Formación Tubará, así como de la litología de esta unidad. En él, se describen las localidades de la Formación Tubará empleadas en estudios previos realizados por otros autores. Estas localidades incluyen la de Arroyo Saco, Arroyo Piedras, Uisacuri, Puerto Colombia y el Flanco Este del Sinclinal de Tubará (Figura 7).

Ma	Edad	Zonas		Secciones					Litoestratigrafía			
		Berggren et al 1995	Blow 1969						Bueno 1970	Bürglet al; 1955	Anderson 1929	
1	Gelasian	Plioceno		Arroyo Saco	Usiacuri	Pto. Colombia	Arroyo Piedras	Eastern flank Tubara Syncline	Formación Saco	Estratos de Tubará - Saco - Juan de Acosta - Chorreras	S R Q P O M N Grupo Tubará	
2			PL 6									
3			PL 5									
4			PL 4									
5	Zanclean	Plioceno	PL 3	N 20					Formación Tubará			
6			PL 2									
7	Messinian	Mioceno Tardío	PL 1	N 19					Formación Piojó	Formación Piojó		
8				N 18								
9	Tortoniano	Mioceno Tardío	M 14	N 17	Cibarco Anticline							
10			b									
11	Serravalliano	Mioceno Medio	M 13	N 16								
12			a									
13	Langhiano	Mioceno Medio	M 12	N 15					Formación Gallinazo	Estratos de Perdices-Hibacharo-Gallinazo		Grupo Las Perdices
14			M 11	N 14								
15			M 10	N 13								
16			M 9	N 12								
17			M 8	N 11								
18			M 7	N 10								
19												
20												
21												
22												
23												
24												
25												
26												
27												
28												

Figura 7. Localidades de la Formación Tubará, estudiadas por Molinares y otros. Tomado y modificado de Molinares et al. (2012)

4.3 Palinología

Erdtman (1952), define el termino palinología como la ciencia que estudia las paredes de esporas y granos de polen, sin tener en cuenta su interior vivo. La palinología se basa principalmente en la morfología de las paredes de las esporas y granos de polen, algunos de los rasgos morfológicos más representativos son: la unidad polínica, el tipo, número y posición de las aberturas, la estructura de la pared, la forma y tamaño del grano, entre otros.

Los caracteres mencionados son regulados genéticamente, mientras que su tamaño puede variar dependiendo el método de preparación utilizado (Erdtman, 1969)

Debido a su rápido desarrollo la palinología ha demostrado ser de utilidad en diversas áreas entre las cuales se pueden citar: Palinotaxonomía (estudio de la taxonomía vegetal con base en la morfología polínica. Ayuda a determinar líneas de evolución y filogenia); Aeropalinología (estudio del contenido esporopólinico del aire y su relación con la sedimentación pólinica.); entre otros. Para estudios Geológicos, Paleontológicos, Paleoambientales, bioestratigráficos y de evolución se utiliza la rama de la palinología denominada Paleopalinología.

4.4 Paleopalinología

La paleopalinología, es una rama de la palinología que se encarga del estudio de los microfósiles orgánicos que se encuentran en las rocas sedimentarias. Estos microfósiles están compuestos de moléculas orgánicas que poseen una gran resistencia a los ácidos. Cualquier organismo capaz de soportar el proceso de macerado y montaje de muestras palinológicas o el residuo visible tras utilizar ácido fluorhídrico y ácido clorhídrico, es llamado palinomorfo (polen, esporas, algas, hongos, dinoflagelados, restos de plantas, entre otros)

Estos palinomorfos representan partes de los ciclos de vida de varias plantas y animales incluyendo su evolución. Como resultado los palinomorfos pueden ser característicos de un rango de tiempo bastante estrecho y, por lo tanto, son útiles para la datación relativa (geocronología).

Por otra parte la paleopalinología es particularmente adecuada para la correlación, porque los palinomorfos de un tipo u otro se encuentran en rocas sedimentarias de todas las edades desde

hace aproximadamente dos mil millones de años hasta el presente, y en todo tipo de entornos, desde agua dulce, depósitos lacustres a sedimentos marinos profundos. (Traverse, 2007)

4.5 Palinomorfos

Comúnmente los palinomorfos se encuentran en un rango de tamaño de 5-500 μ m, y se pueden apreciar registros fósiles desde el Proterozoico hasta la actualidad (Traverse, 2007), estos pueden ser continentales (como el polen o las esporas), marinos (como los dinoflagelados).

El grano de polen es un elemento microscópico reproductivo masculino de las plantas superiores (angiospermas y gimnospermas). Mientras que las esporas son las unidades reproductivas sexuales o asexuales de las criptógamas y los hongos (Punt et. al, 2007; Figura 8).

Otros palinomorfos marinos incluyen:

- Quitinozoos, cuya procedencia no es del todo conocida. La hipótesis más aceptada está relacionada con los graptolites debido a su similitud química.
- Escolecodontes, que son partes quitinosas de estructuras bucales de anélidos marinos.
- Algas microscópicas, las cuales están distribuidas en colonias que se encuentran en una amplia gama de ambientes acuáticos de agua dulce a salobre.
- Quistes de dinoflagelados, principalmente marinos, pero también asociados a ambientes de agua dulce.
- Revestimientos orgánicos de foraminíferos, asociados exclusivamente a ambientes marinos.

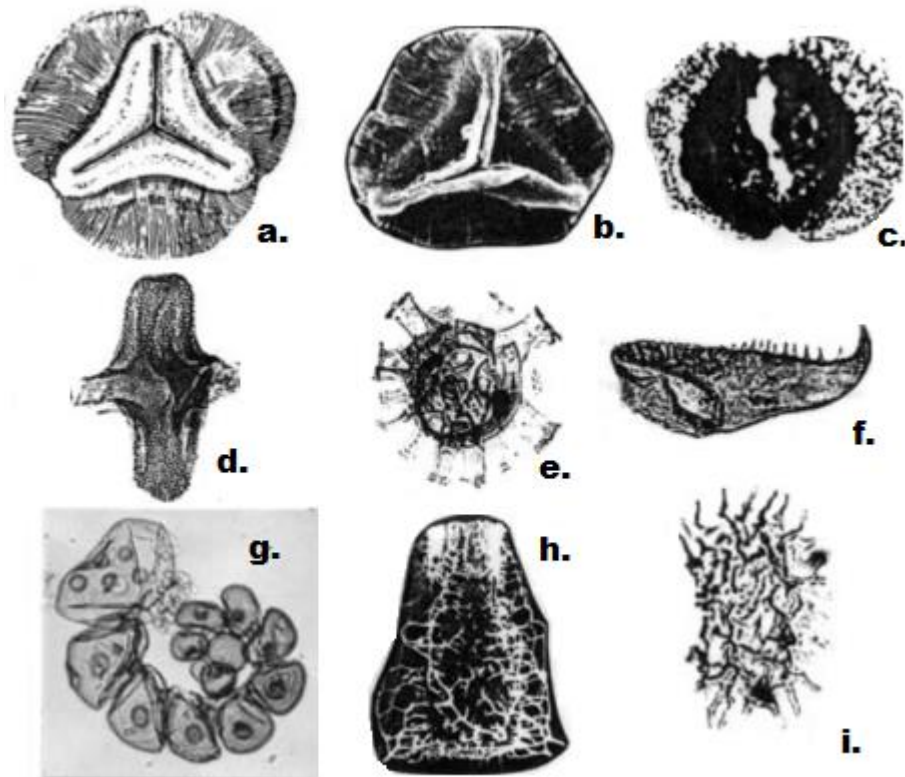


Figura 8. Clases más comunes de palinomorfos. (a) Espora del carbonífero. (b) *Reinschospora speciosa*., Mississippiano superior, Iowa. Longitud 65 μm . (c) *Platysaccus nitidus* triásico superior, Texas. Longitud 55 μm . (d) *Aquilapollenites trialatus*, Cretácico superior, Alaska. Longitud 95 μm . (e) Quiste de Dinoflagelado: *Hystriocholpoma unispinum*, Cretácico inferior, Isla Ellef Ringnes, Ártico, Canadá. Diámetro 85 μm . (f) Escolecodonto: *Arabellites sp.*, Ordovícico superior, Oklahoma. Longitud 150 μm . (g) Foraminífero, sedimento reciente, Banco de Gran Bahamas. Longitud 200 μm . (h) Quitinozoo, *Herochitina sp.*, Ordovícico superior, Inglaterra., Longitud 200 μm . (i) Comunidad de algas (Tipo especial de colonia): *Pediastrum sp.*, Plesitoceno superior, Mar Negro. Longitud 50 μm . Tomado y adaptado de (Traverse, 2007).

4.6 Zonaciones palinológicas en el Norte de Suramérica, usadas en Colombia.

Numerosos trabajos palinológicos se han desarrollado Suramérica. El primero de ellos fue realizado por Van der Hammen (1954), quien describió la flora colombiana presente desde el Maastrichtiano hasta el Cenozoico temprano. Posteriormente Van der Hammen (1957), propuso

una zonación para el Paleógeno y Neógeno de Colombia, integrando los datos obtenidos en sus trabajos previos.

Otras zonaciones palinológicas fueron propuestas por autores como Germeraad et al. (1968), quien realizó una zonación para el Cretácico superior – Cuaternario de las áreas tropicales de Suramérica, África y Asia; Regali et al. (1974), estableció 6 super zonas y 24 zonas para el Cretácico del Noreste de Brasil; Lorente (1986) realizó un estudio palinológico donde describió la palinología y las palinofacies del Cenozoico en Venezuela y Müller et al. (1987), propone una zonación para el Cretácico y Cenozoico Terciario del Noroeste de Sur América. Posteriormente Hoorn 1994, realizó un estudio palinológico donde se describe la palinoestratigrafía y los paleoambientes en el Noroeste de la Amazonía.

Para esta investigación en particular, se sigue la zonación propuesta por Jaramillo *et al.* (2011) que consta de 18 zonas palinológicas, obtenidas a partir del análisis de la información de palinomorfos obtenida en 70 localidades de los llanos orientales colombianos, aplicable en otras cuencas colombianas. Cada una de estas zonas, tiene una asociación de palinomorfos específica y un marco temporal definido (Figura. 9).

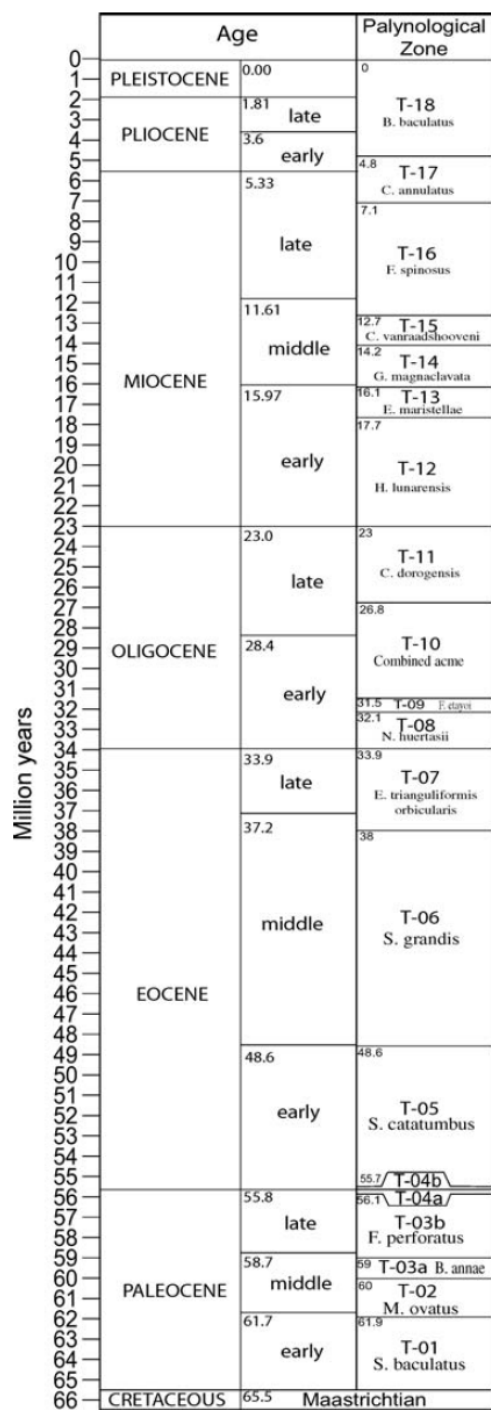


Figura 9. Zonación palinológica propuesta para los llanos y el piedemonte llanero. Tomado de Jaramillo et al. (2011)

5. Resultados y discusión

5.1 Análisis palinológico y zonación bioestratigráfica

En general el recobro de especímenes fue bueno, se obtuvo un conteo total de 791 palinomorfos en las ocho muestras analizadas, de las cuales dos de estas no alcanzaron el conteo de 200 palinomorfos. Se identificaron en total 51 morfotipos, de los cuales 28 pertenecen a polen y 23 a esporas (Figuras 10 y 11).

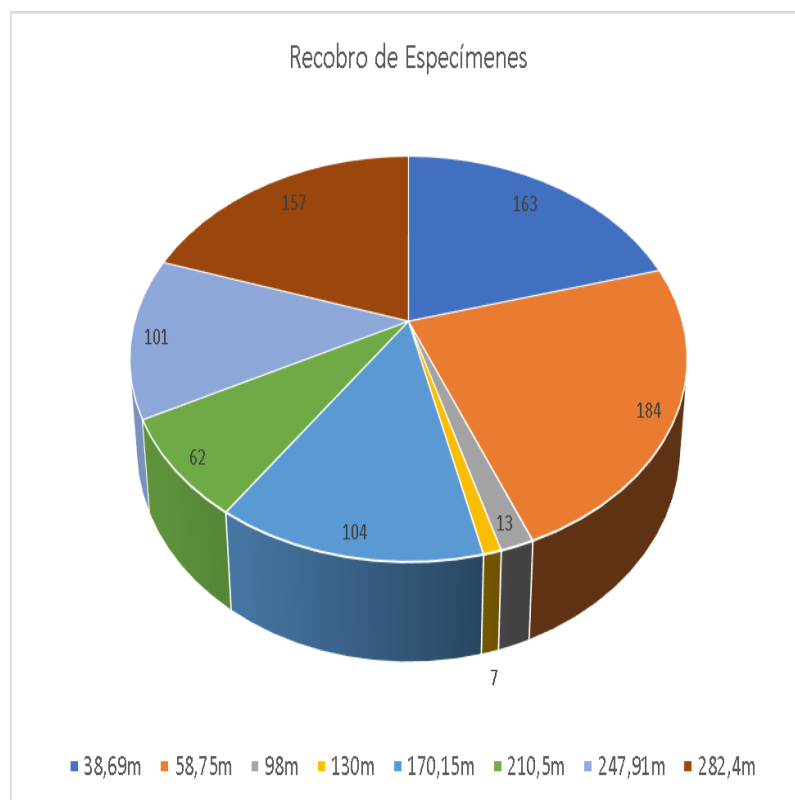


Figura 10. Diagrama de recobro de especímenes hallados en las 8 muestras analizadas. La mayoría de las muestras exhiben un recobro que sobrepasa los 100 morfotipos.



De acuerdo con la zonación propuesta por Jaramillo *et al.* (2011) y complementando con los datos de la zonación propuesta por Müller *et al.*, (1987), se propone la zonación descrita a continuación para la sección estudiada.

5.1.1 Zona T-17 *Cyatheacidites annulatus*. Se identificaron los taxa *Cyatheacidites annulatus* que es recurrente en la mayoría de las muestras analizada menos en la muestra de 130 m; y *Stephanocolpites evansii* el cual apareció por primera vez, a 247,41 m de profundidad.

La ocurrencia de estos taxa sugiere la presencia de la Zona T17 propuesta por Jaramillo *et al.* (2011), la cual le confiere una edad relativa del Mioceno Tardío a Plioceno Temprano (7.1 - 4.8 Ma). En esta zona se registra la primera aparición (FAD) de *Cyatheacidites annulatus* y la última aparición (LAD) de *Rhoipites 'gigantiporus'*, *Psilastephanoporites tesseroporus* y *Stephanocolpites evansii*. (Lámina 1)

.5.1.2 Zona T-18 *Bombacacidites baculatus* Se identificaron los taxa *Multimarginites vanderhamenii* y *Multiareolites formosus*, los cuales se observaron por primera vez, a 58,75 m de profundidad Según Jaramillo *et al.* (2011), la zona T-18 tiene una edad relativa de Plioceno - Pleistoceno (4.8 – 0 Ma).

En esta zona, se registra la última aparición (LAD) de múltiples taxa, entre estos se encuentran *Multimarginites vanderhamenii*, *Crassoretitrites vanraadshooveni*, *Grimsdalea magnaclavata*, y la primera aparición (FAD) de *Echitricolporites mcneillyi* (Lamina 1.).

El taxon *Multiareolites formosus* no se contempla en la zonación propuesta por Jaramillo *et al.* (2011), sin embargo, en la zonación propuesta por Müller *et al.* (1987) este morfotipo está definido como marcador del Plioceno (aproximadamente 5 Ma). Por lo anterior, realizando una

correlación de edades en los estudios propuestos por estos autores, se podría afirmar que debido a la aparición de esta especie el intervalo se encuentra en la Zona T-18.

Cabe destacar la existencia de retrabajamiento (Reworking), es decir, morfotipos de edad más antigua al intervalo de tiempo definido para la sección estudiada. Lo anterior es evidenciado por la presencia de taxa como *Cyclusphaera scabrata* (Reworking) (LAD 16.92 Ma) y *Cicatricosporites dorogensis* (Reworking) (LAD 23.03 Ma) en las profundidades 38.69 m y 98 m respectivamente. La interpretación palinológica de muestras con presencia de material redepositado es compleja.

Usualmente los palinomorfos retrabajados se consideran como un ruido molesto que incomoda la asignación de edad, pero también se puede extraer información acerca de evolución geológica de la cuenca de depósito. (Dueñas & Van der Hammen, 2007; Lámina 1).

Existe cierta incertidumbre con respecto a los límites de las zonas establecidas, debido a que las muestras analizadas en el intervalo de 210,5 – 98 m no exhiben morfotipos como *Stephanocolpites evansii*, *Rhoipites 'gigantiporus'* o *Psilastephanoporites tesseroporus* que puedan acotar de manera contundente la zona T-17.

De la misma forma ocurre con la zona T-18. Debido a que las muestras 98 m y 130 m exhibieron un recobro extremadamente bajo, no fue posible identificar taxones clave como *Echitricolporites mcneillyi* o *Multiareolites formosus*, cuya aparición soportaría el inicio de esta zona a una profundidad mayor.

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, se optó por disponer las zonas de forma que se ajusten mejor a los datos obtenidos en el estudio. Siendo así, se definió un intervalo único

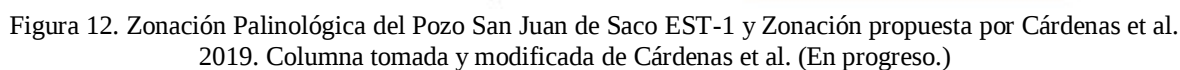
para el pozo analizado que abarca las zonas T-17 y T-18, ya que no se tiene certeza del límite de estas zonas según la asociación identificada en este estudio. (Figura 12).

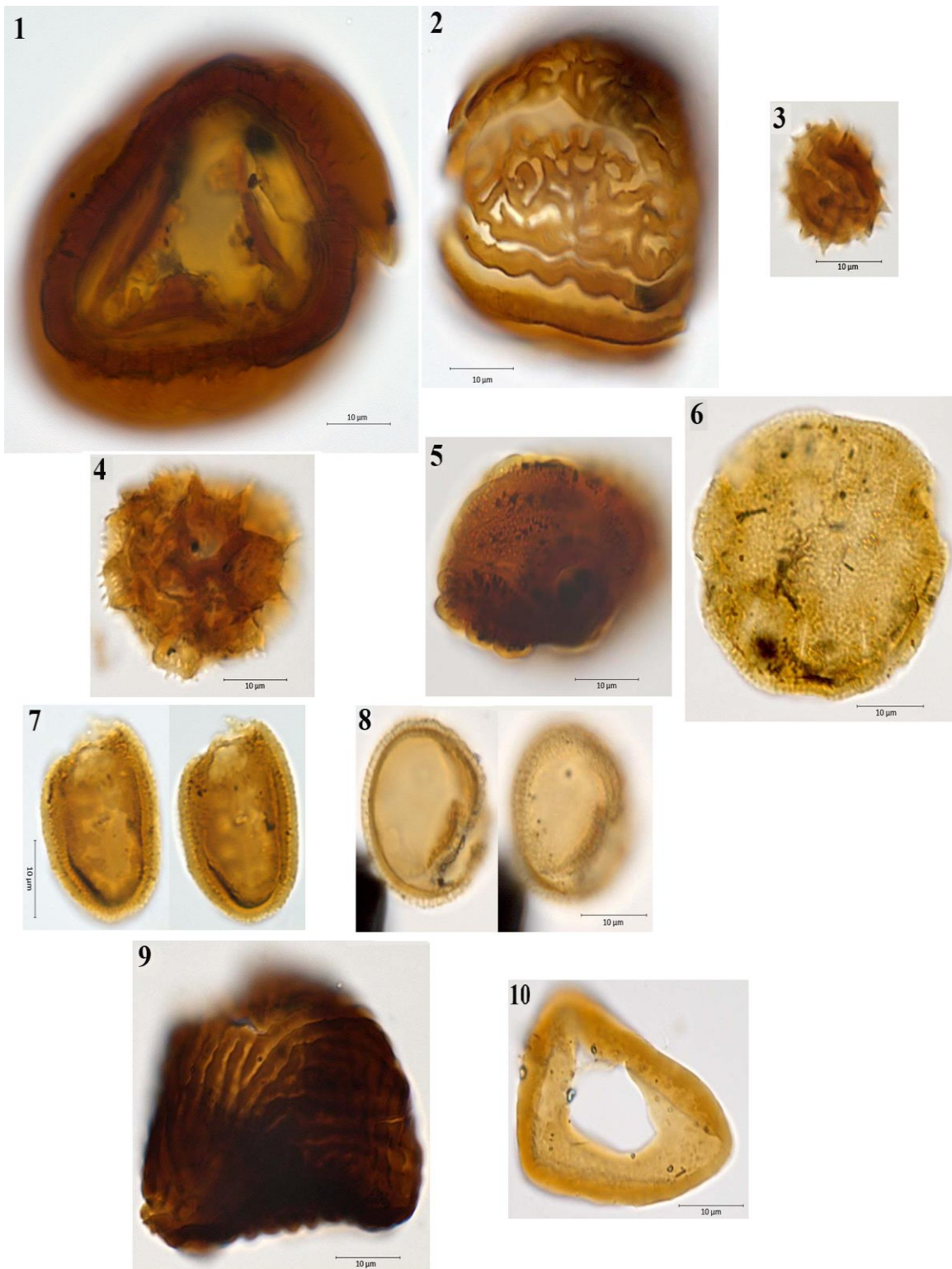
Asimismo, estos datos fueron comparados con los resultados obtenidos por Cárdenas et al. (en progreso), quien realizó un estudio detallado de la fauna de foraminíferos planctónicos y bentónicos del pozo exploratorio San Juan de Saco EST-1. La identificación taxonómica de los foraminíferos planctónicos presentes en 56 muestras de núcleo, permitió definir un modelo de edad para este pozo.

Dentro de la secuencia, se diferencian dos intervalos según los cambios faciales y las primeras apariciones de foraminíferos planctónicos marcadores. El primer intervalo (282,40 – 131,2 m) se caracteriza por la ocurrencia de *Streptochilus globigerum*, cuya primera aparición data de hace 5,72 – 6,60Ma (Resig, 1989).

El tope del intervalo I, se reconoce por la primera aparición en la muestra 125,84 m del foraminífero *Globorotalia crassaformis*, que es marcador del Plioceno temprano y es reportada por primera vez hace 4,3 Ma. La presencia de *G. crassaformis* marca el inicio del intervalo II, el cual se extiende hasta el tope del pozo (Figura 12; Wade et al., 2011).

Las conclusiones alcanzadas por Cárdenas et al. (en progreso), soportan los resultados obtenidos en la presente investigación, sin embargo, existen discrepancias en lo que se refiere a la ubicación del límite del Plioceno, esto se puede atribuir en parte, al bajo recobro de las muestras en el intervalo de profundidades de 130 a 98 m como se mencionó anteriormente.





Lamina 1. Palinomorfos utilizados en la interpretación bioestratigráfica, cada espécimen esta seguido por su número de muestra y coordenada England Finder (EF). Figura 1, *Cyatheidites annulatus* Cookson (1947) muestra 38,69 , EF: E26, Figura 2, *Nijssenosporites fossulatus* Rull et al (1999), muestra 38,69, EF :J30-4, Figura 3,

Echitricolporites spinosus Van der Hammen (1956), muestra 170,5, EF: N47-1, Figura 4, *Fenestrites spinosus* Van der Hammen (1956), muestra 170,15 , EF: W40-2, Figura 5, *Multimarginites vanderhammenii* Germeraad et al. (1968), muestra 58,75, EF: R39, Figura 6, *Stephanocolpites evansii* Muller et al. (1987), muestra 247,91 , EF: R58-4, Figura 7, *Multiareolites formosus* Muller et al. (1987), muestra 58,75 , EF: Q16, Figura 8, *Clavainaperturites microclavatus* Hoorn (1994b), muestra 38,69 , EF: N26, Figura 9, *Cicatricosisporites dorogensis* Potonie y Gelletich (1933), muestra 58,75, EF: F37-2, Figura 10, *Cyclusphaera scabrata* Jaramillo y Dilcher (2001), muestra 38,69 . EF: D57-3.

5.2 Paleoambiente

Según los resultados obtenidos tras análisis palinológico del núcleo San Juan de Saco EST-1, se puede decir hay una predominancia de palinomorfos terrestres evidenciado en las abundancias de morfotipos como lo son el polen y las esporas. En contraste, no fue posible observar palinomorfos de origen marino como: Quitinozoos; Escolecodontes; Quistes de dinoflagelados entre otros. Sin embargo, los resultados adquiridos de la zonación propuesta por Cárdenas et al (en progreso) fueron obtenidos mediante el análisis de Foraminíferos, que son herramienta clave para interpretar ambientes marinos.

Con el fin de encontrar una explicación a lo que se mencionó anteriormente, se propone un ambiente marino marginal con un gran aporte de sedimentos. Debido a que son ambientes cercanos a la costa es posible obtener aportes continentales. Estos aportes pueden generarse, por ejemplo, mediante el transporte de sedimentos a través de canales distributarios de ríos cercanos esto puede explicar la aparición de taxa retrabajados que usualmente indican ambientes con alta energía; incluso es posible encontrar flora cerca de la línea de costa, soportando la aparición de la palinoflora continental, y foraminíferos marinos.

5.3 Análisis de máxima verosimilitud (Maximum likelihood).

Adicionalmente, con el fin de soportar los resultados obtenidos tras la interpretación bioestratigrafía de las muestras analizadas en el pozo San Juan de Saco EST-1, se realizó el análisis de máxima verosimilitud. En éste, se compararon los datos obtenidos en el presente estudio con la sección de referencia propuesta por Jaramillo *et al.* (2011) para los Llanos Colombianos (Figura 13).

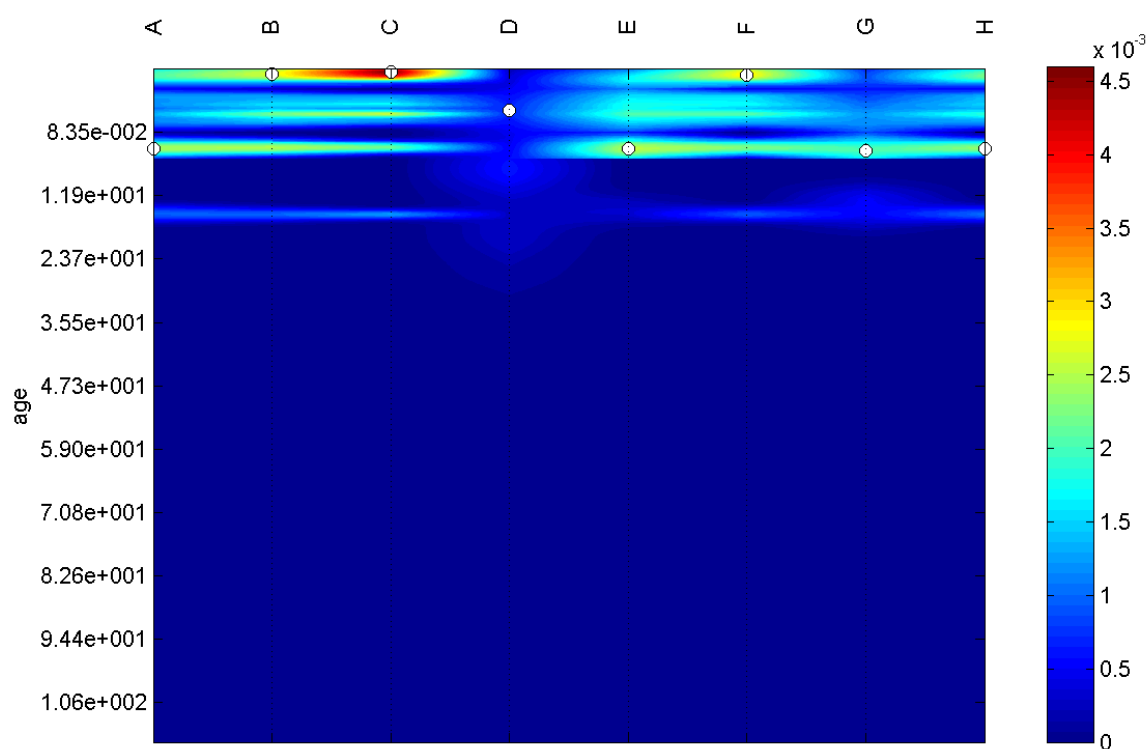


Figura 13. Estimación de edad estratigráfica mediante el Análisis de Máxima Verosimilitud para el Pozo San Juan de Saco EST-1. Las letras A hasta la H representan cada una de las muestras analizadas, y las estimaciones de máxima verosimilitud se indican mediante círculos blancos rellenos cuyos límites de confianza son del 95% (Punyasena et al. 2012).

También es necesario indicar que las zonas con tonalidades más cálidas (amarillas, naranjas, rojas) poseen una mayor confiabilidad, es decir, un valor de probabilidad más alto en contraste con las zonas cuyas tonalidades son azuladas. Estas tonalidades son determinadas a partir de

comparaciones de las abundancias, es decir, si la abundancia de morfotipos comparados concuerdan o no con la abundancia de especímenes encontrados en la sección de referencia para una edad específica. Por lo tanto, si estos valores concuerdan habrá un valor de probabilidad más alto. (Punyasena et al. 2012).

En general las muestras exhiben valores de probabilidad intermedios, estos resultados indican que las muestras se encuentran en intervalos de edad relativamente jóvenes, Lo que está en concordancia con los resultados obtenidos mediante la interpretación bioestratigráfica a partir de palinomorfos.

Sin embargo, como se mencionó en apartados anteriores, aún se tiene incertidumbre acerca de los límites de las zonas propuestas. Por ejemplo, si analizamos la muestra que corresponde con la letra D (130 m), se puede inferir un valor de probabilidad bajo (Azul oscuro) por lo tanto no es confiable la interpretación de esta edad. Esto se puede dar por diferentes razones: bajo recobro, lo que conlleva a la incertidumbre de la probabilidad; cantidad de muestras, ya que se puede obtener mayor confiabilidad en los resultados al poseer una sección con mayor resolución de muestreo; entre otras.

6. Conclusiones

El análisis palinológico del núcleo del pozo San Juan de Saco EST-1, permitió identificar el potencial palinológico de la sección analizada perteneciente a la Formación Tubará. En total, se reconocieron 51 morfotipos, de los cuales 28 pertenecen a polen y 23 a esporas.

De acuerdo con los palinomorfos identificados, se puede inferir una edad relativa para la Formación Tubará de Mioceno tardío – Plioceno temprano, en correspondencia con la presencia de las zonas T-17 *Cyatheacidites annulatus* y T-18 *Bombacacidites baculatus* (Jaramillo et al., 2011) en el intervalo estudiado.

La comparación de la zonación de palinomorfos propuesta para el pozo San Juan de Saco EST-1, está en concordancia con el modelo bioestratigráfico planteado (a partir de foraminíferos bentónicos) por Cárdenas et al. (en progreso) para el mismo intervalo.

Adicionalmente, el análisis de Máxima Verosimilitud realizado en las muestras de la sección analizada, arrojó intervalos de edad relativamente jóvenes, lo que soporta los resultados obtenidos mediante la interpretación bioestratigráfica a partir de palinomorfos.

Para la sección analizada se sugiere un ambiente marino marginal, evidenciado en la presencia de palinomorfos continentales y foraminíferos bentónicos.

Como fue evidenciado en los resultados de la investigación, es posible encontrar errores al momento de realizar interpretaciones paleoambientales cuando se utiliza una única herramienta bioestratigráfica. Por lo tanto, al momento de realizar interpretaciones es de vital importancia integrar todas las herramientas disponibles con el fin de dar con la interpretación adecuada.

Referencias citadas

- Agencia Nacional de Hidrocarburos. (2009). *Reconstrucción de la Historia Termal en los Sectores de Luruaco y Cerro Cansona - Cuenca del Sinú- San Jacinito y el Piedemonte Occidental de la Serranía del Perijá Entre Codazzi y la Jungla de Ibirico - Cuenca de Cesar- Ranchería*. Bogota.
- Anderson, F. (1929). Marine Mioceneand related deposits of North Colombia. *California Academy of Science*, 73-213.
- Barrera, R. (2001). *Geología de las Planchas 16-17 Galerazamba y Barranquilla*. Ingeominas.
- Barrero, D., Pardo, A., Vargas, C. A., & Martinez, J. F. (2007). *Colombian Sedimentary Basins: Nomenclature, Boundaries and Petroleum Geology, A New Proposal*. Bogotá: ANH and B&M Exploration Ltda.
- Cárdenas Gómez, C. P., Cárdenas Rozo, A. L., & Rincon Martinez, D. A. (2019). *Dinámica Costera durante el Mioceno Tardío - Plioceno Temprano al Norte del Cinturon Plegado Sinú - San Jacinto, Colombia*.
- Comisión Norteamericana de Nomenclatura Estratigráfica. (2010). *Código Estratigráfico Norteamericano*. México, D.F.
- Coochson, I. C. (1947). Plant microfossils from the lignites of Kerguelen Archipelago. *B.A.N.Z. Antarctic Research Expedition 1929-1931 Reports*, 2(8), 127- 142.
- De Porta, J., Caceres, C., Etayo, F., Hoffstetter, M., & Navas, J. (1974). *Léxico Estratigráfico Internacional. América Latina, Colombia, Terciario y Cuaternario*. París: Centre National de la Recherche Scientifique.

- Dueñas, H. J., & Van der Hammen, T. (2007). SIGNIFICADO GEOLÓGICO Y ASOCIACIONES PALINOLÓGICAS DE LAS FORMACIONES DIABLO INFERIOR (MIOCENO TARDÍO) Y SAN FERNANDO SUPERIOR (MIOCENO MEDIO), PIEDEMONTE CUENCA DE LOS LLANOS ORIENTALES, COLOMBIA. *Ciencias de la Tierra*, 481-488.
- Duque-Caro, H. (1984). Estilo Estructural, Diapirismo y Episodios de Acrecimiento del Terreno Sinú-San Jacinto en el Noroccidente de Colombia. *Boletín Geológico*, 27 - No. 2, 1-29.
- Erdtman, G. (1952). Pollen morphology and plant taxonomy angiosperms.
- Erdtman, G. (1969). Handbook of palynology -morphology-taxonomy-ecology. .
- Fonnegra, R. (1996). *Introducción a la Palinología Metodos de Estudio Palinologico*. Universidad de Anquioquia.
- Germeraad, J. H., Hopping, C. A., & Muller, J. (1968). Palynology of Tertiary Sediments From Tropical Areas. *Review of Paleobotany and Palynology.*, 6, 189-348.
- Hoorn, C. (1994). An environmental reconstruction of the palaeo-Amazon River system (Middle - Late Miocene, northwest Amazonia). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 112(3), 127-238.
- Hoorn, C. (1994). Miocene palynostratigraphy and paleoenvironments of northwestern Amazônia: evidence for marine incursions and the influence of Andean tectonics. *Free University of Amsterdam*, 156.
- Jaramillo, C. A., & Dilcher, D. L. (2001). Middle Paleogene palynology of central Colombia, South America: a study of pollen and spores from tropical latitudes. *Palaeontographica. Palaeontographica, Abt. B*, 87-213.

- Jaramillo, C., Rueda, M., & Torres, V. (2011). A Palynological Zonation for the Cenozoic of the Llanos and Llanos Foothills of Colombia. *Palinology*, 46-48.
- Lorente, M. A. (1986). Palynology and palinofacies of Upper Tertiary in Venezuela. *Dissertationes Botanicae*, 222.
- Molinares, C. E., Martinez, J. I., Fiorini, F., Escobar, J., & Jaramillo, C. (2012). Paleoenvironmental Reconstruction for the Lower Pliocene Arroyo Piedras section. *Journal of South American Earth Sciences*, 1-14.
- Muller, J., De Di Giacomo, E., Erve, A., & Maraven, S. A. (1987). A palynological zonation for the Cretaceous, Tertiary and Quaternary of northern South America. *American Association of Stratigraphic Palynologists*, 7- 76.
- Potonie, R., & Gelletich, J. (1933). Pteridophyte spores of some Eocene Browncoal from Dorog, Hungary. *Sitzungsberichte der Gesellschaft Naturforschender Freunde zu Berlin*, 517-528.
- Punt, W., Hoen, P., Blackmore, S., Nilsson, S., & Le Thomas, A. (2007). Glossary of pollen and spore terminology. *Review of Palaeobotany and Palynology* , 1-81.
- Punyasena, S. W., Jaramillo, C., De la Parra, F., & Du, Y. (2012). Probabilistic correlation of single stratigraphic samples :A generalized approach for biostratigraphic data. *AAPG Bulletin*, 235-244.
- Regali, M. S., Uesugui, N., & Santos, A. S. (1974). Palinologia dos Sedimentos Meso-Cenozóicos do Brazil. *Boletim Técnico do Petrobras*, 177-191.
- Resig, J. M. (1989). Stratigraphic Distribution of Late Neogene Species of the Planktonic Foraminifer *Streptochilus* in the Indo-Pacific. *Micropaleontology*, 49-62.

- Reyes Torres, G. A., & Zapata García, G. (2001). *Geología de la Plancha 24 Sabanalarga*. Ingeominas.
- Rull, V., & Vegas - Vlarrubia, T. (1999). Surface palynology of a small coastal basin from Venezuela and potential paleoecological applications. *Micropaleontology*, 45(4), 365-393.
- Toto, E. A., & Kellogg, J. N. (1992). Structure of the Sinú-San Jacinto Fold belt -- An Active Accretionary Prism in Northern Colombia. *Journal of South American Earth Sciences*, 5, No.2, 211-222.
- Traverse, A. (2007). *Paleopalynology* (Segunda ed.). Pennsylvania: Springer.
- Van der Hammen. (1954). El Desarrollo de la Flora Colombiana en los Periodos Geológicos: Maestrichtiano hasta el Terciario más Inferior (Una investigación Palinológica de la Formación Guaduas y equivalentes). *Boletín Geológico*, 2 (1), 49-106.
- Van Der Hammen. (1956). Description of some genera and species of fossil pollen and spores. *Boletín Geológico*, 103-109.
- Wade, B. S., Pearson, P. N., Berggren, W. A., & Pälike, H. (2011). Review and Revision of Cenozoic Tropical Planktonic Foraminiferal Biostratigraphy and Calibration to the Geomagnetic Polarity and Astronomical Time Scale. *Earth-Science Reviews*, 111-142.