

Uso de susceptibilidad magnética como proxy para la generación de modelos cicloestratigráficos en las perforaciones del proyecto Jepírachi, La Guajira, Colombia.

Estudiante: Erik Santiago Gil Peña

Asesora: María Isabel Marín Cerón

Universidad EAFIT

Escuela de Ciencias

Departamento de Ciencias de la tierra

Medellín

2020

PREFACIO

El presente trabajo de grado nace a partir de resultados experimentales sobre la susceptibilidad magnética normalizada a la masa (χ) en los núcleos extraídos del proyecto Jepírachi (Guajira), correspondientes a la Formación Castilletes. los cuales, al presentar valores positivos se podrían correlacionar con la identificación de ciclos orbitales que afectaron el clima y la producción de sedimentos en la cuenca durante el Optimo Climático del Mioceno. Este estudio se presenta en forma artículo para ser sometido al Boletín de Geología de la Universidad Industrial de Santander (UIS). Los resultados, forman parte de la producción científica del Semillero de Investigación en Geología Regional y Geoquímica, línea de investigación en técnicas magnéticas, del grupo de Investigación en Geología Ambiental e Ingeniería Sísmica de la Universidad EAFIT. A través de este trabajo agradezco al Geólogo Victor Piedrahita, investigador de la Universidad Nacional de Australia (ANU) por su asesoría en el procesamiento de los datos aquí presentados.

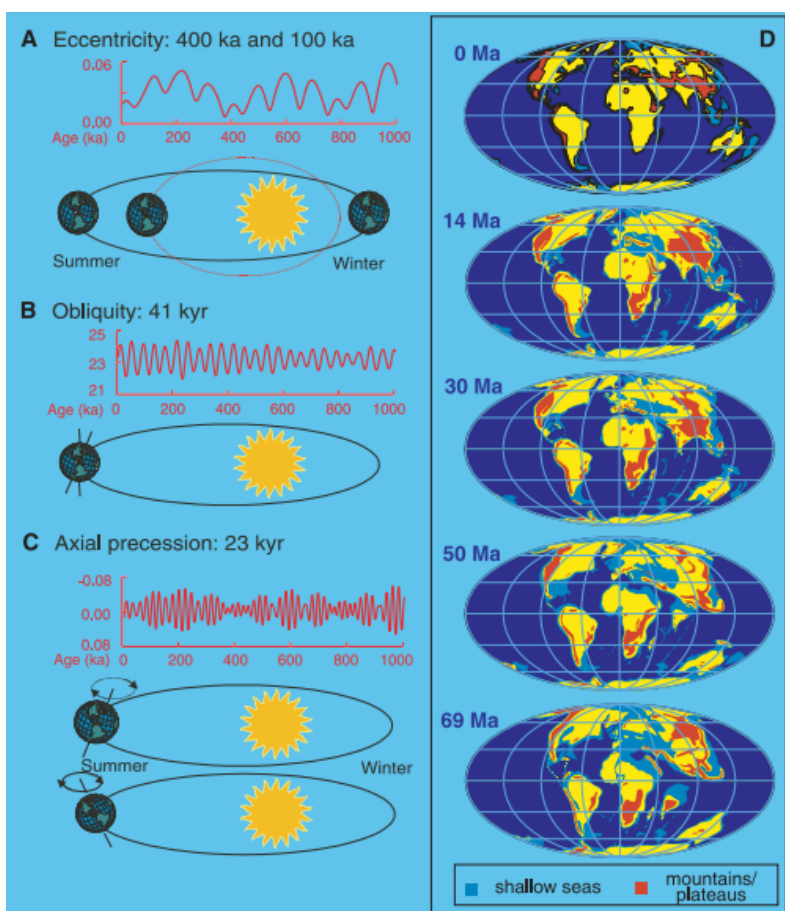
1. INTRODUCCION

La cicloestratigrafía es una subdisciplina de la estratigrafía que trata de la identificación, caracterización, correlación e interpretación de las variaciones cíclicas en el registro estratigráfico, con la aplicación de la geocronología, para mejorar la precisión y resolución en el marco temporal (Strasser et al., 2006). Los ciclos más importantes son los ciclos orbitales, precesión (~21 kyr), oblicuidad (~40 kyr), excentricidad (~100 kyr o ~400 kyr) (ciclos de Milankovic) (Figura 1); los cuales resultan de la perturbación de la órbita de la tierra y su eje de rotación (Strasser et al., 2006). La configuración orbital es uno de los principales factores que han controlado el clima en largos periodos de tiempo (≥ 1 ka), ya que la cantidad de radiación solar (insolación) recibida por la tierra, varía en función de la posición de esta respecto al sol (Berger, 1988). Los cambios periódicos en el clima debido a variaciones astronómicas definen la distribución de la radiación solar sobre la tierra, esto influye en el registro estratigráfico a través de oscilaciones en los sistemas de circulación climático y oceánico (Villamil, 1998).

La cicloestratigrafía en Colombia empieza a partir de estudios presentados para el entendimiento de alta resolución de secciones estratigráficas en el Cretáceo presentado por Villamil (1998), posterior a esto un modelado de edad para sedimentos lacustres del Pleistoceno realizado por Groot et al., (2014).

Teniendo en cuenta lo anterior, se consideró de gran interés emprender un proyecto experimental en los núcleos de perforación extraídos del Parque Eólico Jepírachi en el departamento de la Guajira que corresponden a la Formación Castilletes. El propósito de este trabajo es realizar un análisis de susceptibilidad magnética normalizada a la masa (χ), en los núcleos seleccionados para establecer si existe una relación con cambios orbitales en el norte Colombia. Estos núcleos están constituidos por rocas sedimentarios de la Formación Castilletes, la cual se compone de calizas, arcillas, areniscas calcáreas (Zuluaga et al., 2009). El registro de susceptibilidad magnética en las rocas de la Formación Castilletes es un indicador del clima importante, las rocas carbonatadas suelen registrar cambios climáticos, ya que están compuestas fundamentalmente por acumulaciones de organismos que son relativamente sensibles a cambios en la temperatura del océano y/o en la oxigenación (Rodríguez-Tovar, 2013).

A pesar de que la Formación Castilletes se definió desde el Mioceno al Plioceno (Moreno, 2014), este trabajo se concentra en el Óptimo Climático del Mioceno Medio (MMCO, por sus siglas en inglés) la duración de este se ha definido por varios autores entre 16-14,8 Ma (Flower y Kennet, 1994) 17-15 Ma (Böhme, 2003; Wan et al., 2009; Zachos et al., 2001) y 18-15 Ma (Sun y Zhang, 2008). El MMCO interrumpió el enfriamiento cenozoico a largo plazo, evidenciado en un crecimiento variable de CO₂ relacionado con un periodo cálido que marca una época de grandes cambios climáticos y oceanográficos globales (Methner et al., 2020).



. Figura 1. Componentes orbitales en el lado izquierdo, paleogeografía del Cenozoico en el derecho. A) Excentricidad. B) Oblicuidad. C) Precesión. D) reconstrucción geográfica en 5 intervalos en los últimos 70 Ma la tierra ha experimentado un cambio continuo, pasando de extremos de calor con expansión de polos a extremos de frío con masivas capas de hielo continentales en los casquetes polares. (Tomado de Zachos et al., 2001)

2. MARCO GEODINAMICO

La península de La Guajira está ubicada en el extremo septentrional de Suramérica, y su configuración tectónica actual es el producto de la interacción entre las placas Caribe, Nazca y Suramericana (Quintero, 2017) (Figura 2a). La evolución geológica de la región Caribe de Colombia está ligada, hasta finales del Cretácico y principios del Paleógeno, a los eventos que modificaron el extremo norte de la cordillera de Los Andes (Aponte, 2010). El empuje ejercido por la placa Caribe sobre el borde nororiental de la placa Suramérica en el Eoceno marca el comienzo de la separación y rotación en sentido este del bloque formado por la Sierra Nevada de Santa Marta y la península de la Guajira, dando origen al sistema de fallas de Oca-Cuisa en dirección E-W, y con esto la deformación del bloque y el arqueamiento de las estructuras regionales (López, 2005). La cuenca se divide en las subcuencas de la Baja y Alta Guajira por el trazo de la Falla Cuisa (Barrero et al., 2007) (Figura 2b).

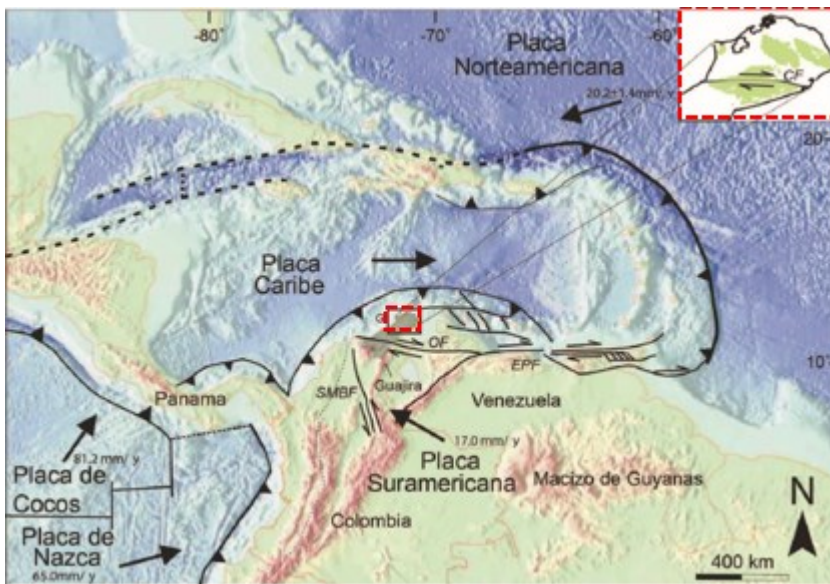


Figura 2a. SMBF: sistema de Fallas Santa Marta – Bucaramanga, CF: Falla Cuisa, OF: Falla Oca, EPF: Falla el Pilar, G: Alta Guajira. Tomado de Quintero (2017).

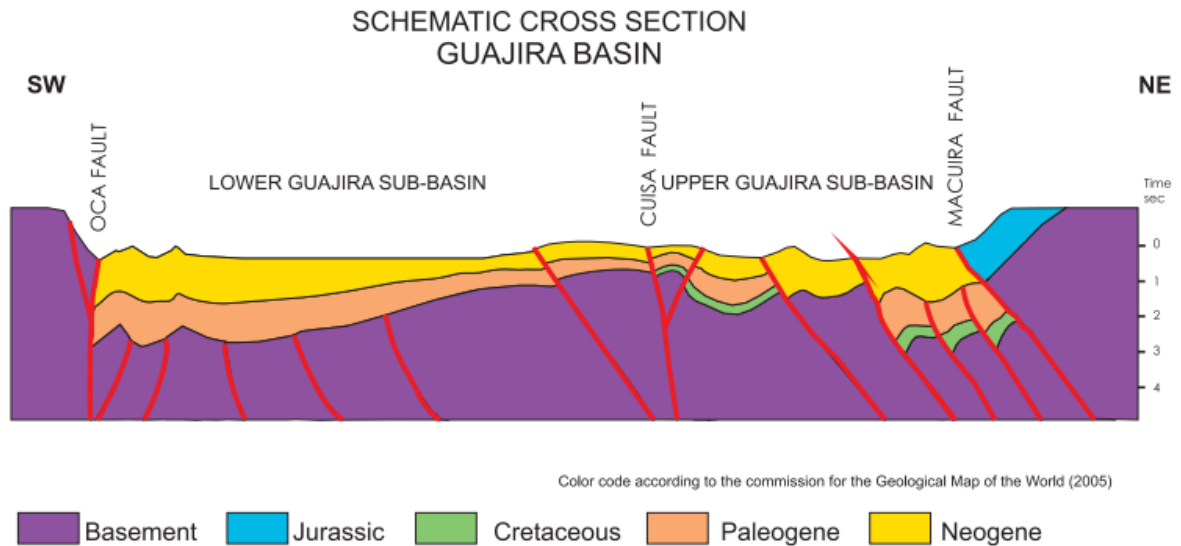


Figura 2b. Sección transversal cuenca de la Guajira. Tomada de Barrero et al. (2007)

En la Cuenca de la Guajira se reporta un basamento compuesto por rocas ígneas y metamórficas las cuales se consideran edad Precámbrica Paleozoica, sin existir evidencia fósil ni datación que soporte esta idea (Rollins, 1960). En superficie han sido reportadas y estudiadas en las serranías de Jarara, Macuira y Cocinas, variando en composición en cada localidad (Vargas et al., 2012). En general, las condiciones y ambientes de deposición de las unidades geológicas Mesozoicas y Cenozoicas son muy similares, en facies proximales marinas someras a continentales (Vargas et al., 2012). Durante el Cuaternario tiene lugar la fase final de sedimentación de la cuenca Guajira, con predominio del ambiente fluvial sobre el marino, constituyendo amplias terrazas y abanicos moldeados por las condiciones áridas (Aponte, 2010). Este registro litológico, además de permitir el análisis de condiciones sedimentológicas y tectónicas regionales, revela los ciclos que han configurado la distribución y disposición geológica de la zona. El basamento de la subcuenca Guajira está representado por la Serpentinita del Cabo de la Vela, suprayacida discordantemente por secuencias sedimentarias del Mio-Plioceno de la Formación Castilletes (objeto de interés del presente estudio), asociada a un ambiente de deposición marino somero, e intercalada con

facies continentales producidas por progradación de deltas y depósitos fluviales (Moreno, 2014). Zuluaga et al., (2009) propone una posible temperatura superior a la actual manifestado en un mayor tamaño de los fragmentos fósiles comparado con los organismos actuales de ambientes litorales, de aguas claras, condiciones en la presencia de las algas rojas y sedimentos depositados en un régimen energético alto.

3. MARCO CONCEPTUAL

La ciclo-estratigrafía se define como la rama de la estratigrafía que se encarga de estudiar los procesos sedimentarios cíclicos que se asocian directamente a cambios en la configuración orbital (Strasser et al., 2006). Esta herramienta de datación relativa ha permitido estimar, a través de modelos astro-cronológicos, periodos de tiempo a una resolución mayor a la permitida por métodos de datación radiométrica (Strasser et al., 2006). En el norte de Colombia (departamento de la Guajira; Figura 3a) cuenta con extenso registro de carbonatos de plataforma con edades que varían entre el Mesozoico y el Cenozoico. Estas rocas brindan una gran oportunidad para identificar la influencia de la configuración orbital en el clima del norte de Suramérica, una relación que no ha sido estudiada previamente. Un primer paso para determinar si hay una relación entre el clima y la configuración orbital en la parte norte de Colombia, es analizar si estas rocas realmente pueden tener algún proceso cíclico que haya sido grabado en el registro sedimentario. Los cambios climáticos afectan directamente diferentes procesos sedimentarios. Por ejemplo, la aceleración en el ciclo hidrológico durante periodos cálidos favorece el rápido transporte de materiales terrígenos (Noorbergen et al., 2018). Así mismo, periodos de calentamiento global favorecen la disolución de carbonatos (Galeotti et al., 2010).

Las rocas carbonatadas suelen registrar cambios climáticos, ya que están compuestas fundamentalmente por acumulaciones de organismos que son relativamente sensibles a cambios en la temperatura del océano y/o a cambios en la oxigenación (Rodríguez-Tovar, 2013). Registros de cambios en los procesos sedimentarios ligados a la configuración orbital han sido descritos globalmente en carbonatos, a partir de ciclos de disolución ligados a cambios en la insolación, y/o ciclos de dilución asociados con el aporte

de sedimentos continentales, evidenciando la relación entre clima y configuración orbital (e.g. Galeotti et al., 2010; Noorbergen et al., 2018).

La susceptibilidad magnética normalizada a la masa (χ) ha sido utilizada para identificar cambios cíclicos en carbonatos (Francescone et al., 2018). La susceptibilidad magnética en esta clase de rocas está determinada por una fracción de minerales magnéticos (que tienen una respuesta positiva frente a la aplicación de un campo magnético), mientras que los minerales carbonatos son diamagnéticos y cuentan con χ negativa, lo que sugiere una relación inversa entre los valores de χ y el contenido de CaCO_3 en rocas carbonatadas (Galeotti et al., 2010; Francescone et al., 2018). La bases de datos de χ se procesan a partir de análisis como Detrending (eliminación de tendencias para el análisis de series de tiempo), Espectral de Potencia (evalúa la distribución de la varianza de la serie de tiempo en función de la frecuencia) y Espectral Evolutivo (suma de funciones de forma dependientes de la frecuencia que fueron modulados por coeficientes dependientes del tiempo), con el objetivo de determinar los procesos sedimentarios cíclicos que se asocian directamente a cambios en la configuración orbital. Es importante mencionar que el siguiente trabajo no genera un modelo astrocronológico, los resultados están orientados a identificar cambios cíclicos en series de tiempo y estimar la influencia de la configuración orbital en el clima y sedimentos en latitudes tropicales.

LOCALIZACIÓN PARQUE EÓLICO JEPÍRACHI

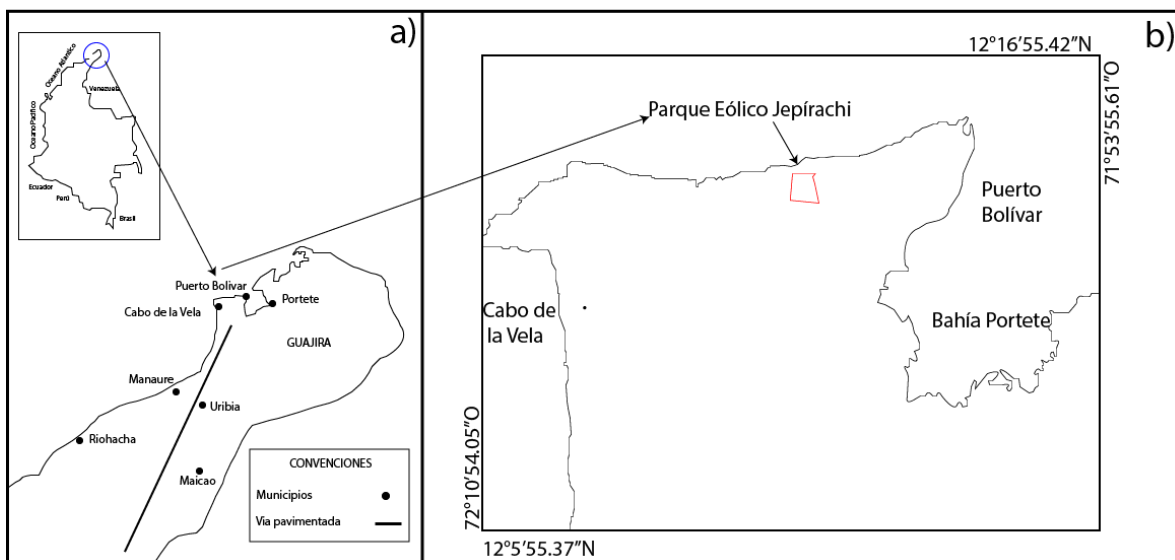


Figura 3. a) Mapa de Colombia indicando la región la norte de contiene al Parque eólico Jepírachi. b) Localización del Parque Eólico Jepírachi en la región del Caribe colombiano.

4. Metodología

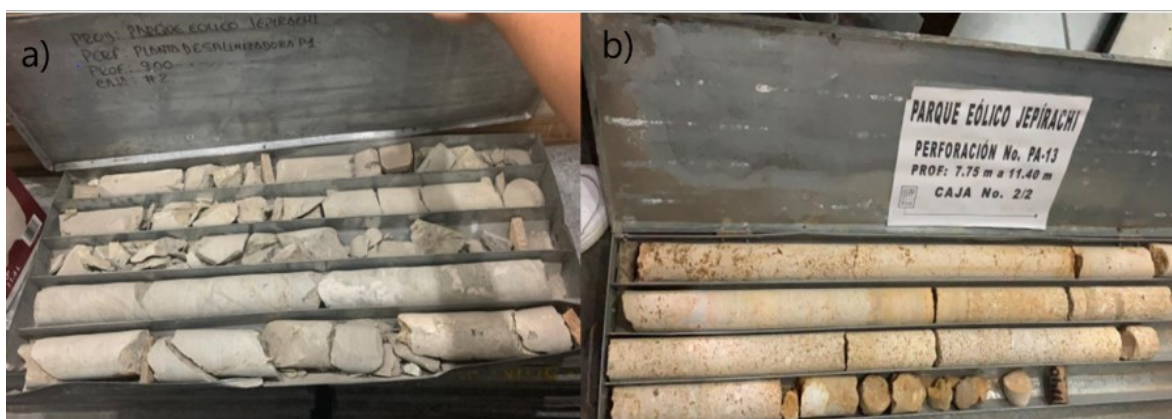


Figura 4. Núcleos Formación Castilletes Parque Eólico Jepírachi. a) Núcleo 1 b) Núcleo 2.

4.1. Descripción de núcleos

El **Núcleo 1**, forma parte de la perforación realizada para la cimentación de la planta desalinizadora, la cual fue incluida dentro de las medidas compensatorias del proyecto Parque Eólico Jepírachi realizado por EPM, para la zona. La planta se encuentra ubicada en la ranchería Kasiwolin (por razones de confidencialidad no se incluyó la ubicación exacta dentro del sumario entregado en el modelo de gestión de EPM). **El Núcleo 2**, corresponde a la perforación 13 que a su vez define la torre aerogeneradora con el mismo numeral, esta se definió dentro del plan de gestión del parque Eólico Jepírachi.

De acuerdo con las características de los núcleos 1 y 2, se hizo una correlación de estos con la sección tipo de la Formación Castilletes publicada por Moreno et al., (2015) y las

localidades de invertebrados que definieron edades a partir de dataciones con isótopos de $^{87}\text{Sr}/\text{Sr}^{86}$ presentadas por Hendy et al., (2015). Se indica un intervalo de profundidad de 40-50 metros donde están presentes las localidades 290455-290456 (16.07 a 16.33 Ma), otro intervalo de 270-280m con localidades 290461-290463 (15.14 a 15.43 Ma). Los datos presentados anteriormente se convierten en la información más importante para el modelamiento de las tasas de sedimentación y el análisis cicloestratigráfico que se mencionará a continuación con un método de validación de la técnica. Es importante mencionar que este proceso de toma de datos se realizó con el propósito de hacer un acercamiento de la zona de estudio al área de la cuenca Cocinetas que se encuentra mejor estudiada, sobre todo en la Formación Castilletes. Lo asumido anteriormente, se convierte de aquí en adelante en la información más importante para el modelamiento de las tasas de sedimentación y el análisis cicloestratigráfico que se mencionará a continuación como un método de validación de la técnica. Adicionalmente, se debe realizar una correlación bioestratigráfica e isotópica detallada que avale el modelo de edad que fundamenta un análisis de series de tiempo.

4.1.2. Preparación y análisis de susceptibilidad magnética

Después de concluir con el análisis descriptivo de las muestras se realizó la preparación para el análisis de la susceptibilidad magnética normalizada a la masa (χ). Del núcleo 1 (Figura 4a), se tomó el intervalo que garantizara el proceso de corte continuo y sin pérdida de material con una resolución de 3cm (desde los 11,64 metros a los 12,82 metros, para un total de 1,18 metros columna de sedimentos). Para el núcleo 2 (Figura 4b), se realizó el proceso de corte cada 1 cm con el fin de mejorar la resolución de la respuesta de los datos. El intervalo estudiado va desde el segmento 7,75 al 9,46 m (total de 1,71 metros). Posteriormente se utilizó la Sierra Manual de batería, con separación de 2 cm entre los discos. Debido a la fragilidad de la roca, cada núcleo fue cubierto con cinta de enmascarar, se marcó el tope y la base de cada muestra, y posteriormente, se utilizó una prensa manual, para obtener muestras volumétricas de 2 cm³.

Para el análisis del marcador de susceptibilidad magnética χ , se utilizó el instrumento Kappabridge (MFK1-FB), del laboratorio de Paleomagnetismo de la Universidad EAFIT. Su sensibilidad para medir la anisotropía de susceptibilidad magnética (AMS) y susceptibilidad magnética en masa en campos magnéticos variables débiles (rango de campo de 2 A / ma 700 A/ m, valores máximos) es muy alta. Este modelo es capaz de medir frecuencias básicas de 976 Hz hasta frecuencias adicionales de 3904 Hz y 15616 Hz. Los protocolos para el manejo del equipo se encuentran especificados en los protocolos del laboratorio. El proceso de medición comienza con la calibración del equipo: activación, especificación de volumen y rango de campo, calibración, corrección de holder, medición, peso y exportación de los datos arrojados por el Safyr6. (Los detalles del proceso se presentan en el (Anexo 1). Las mediciones se repitieron 5 veces en cada muestra para ambos testigos con el fin de garantizar valores fiables y repetibles estadísticamente para cada muestra.. Finalmente, los datos de las mediciones generales se exportaron desde el software Safyr 6 (página 1) a tablas Excel, especificando la columna de profundidad y el marcador de susceptibilidad magnética (página 2), los datos estadísticos del promedio y desviación estándar (página 3) para el núcleo 1 (Anexo 2) y el núcleo 2 (Anexo 3).

4.1.3. Análisis cicloestratigráfico

El análisis cicloestratigráfico se realizó a partir de las bases de datos obtenidas en las mediciones de susceptibilidad magnética realizadas para cada núcleo. Estos datos fueron procesados en la interfaz del software Acycle (versión 2.0), donde se tuvo en cuenta la realización del promedio y desviación estándar para la medida de susceptibilidad. Los datos exportados al software se interpretaron a partir de los siguientes análisis de series de tiempo: Detrending, Espectral de Potencia y Evolutivo. Los datos se interpolaron para cada núcleo con un espaciado de 0.001 cm. Posteriormente, se calculó la tasa de sedimentación y duración de los ciclos a partir de los datos presentados por Hendy et al., 2015 y Moreno et al., 2015. (Anexo 4).

a. Detrending

Este análisis consiste en la eliminación de tendencias de los valores de los datos- Es un paso clave en el análisis de las series de tiempo. Las series de tiempo pueden tener tendencias seculares de gran amplitud e irregulares, permitiendo que la mayoría de los datos estén por encima o por debajo de la media general del valor (Rodionov, 2006). La eliminación de estas tendencias a largo plazo es un paso crítico para el análisis espectral de potencia para asegurar que la variabilidad de los datos oscile alrededor de una media de 0, para evitar frecuencias muy bajas o más altas del espectro (Kodama y Hinnov, 2015). El método de eliminación de tendencias escogido para este estudio es LOESS, que consiste en un método de regresión local suavizado que asigna menor peso a los valores atípicos en la regresión (Li et al., 2019).

b. Análisis Espectral de Potencia

La estimación espectral es un poderoso método de análisis de datos para las series de tiempo eléctricas, magnéticas y sísmicas (Park, 1987). El análisis espectral de potencia evalúa la distribución de la varianza de la serie de tiempo en función de la frecuencia (Li et al., 2019). El uso principal del análisis espectral de potencia es el reconocimiento de componentes periódicos o casi periódicos en una serie de datos (Weedon, 2003). El espectro de potencia se puede evaluar con varios métodos no paramétricos, los métodos más frecuentes utilizados son: el periodo-grama suavizado y el método multi-taper (MTM) (Li et al., 2019). Para este análisis se utilizó el método multi-taper (MTM). Este estimador logra el equilibrio óptimo entre resolución de frecuencia, intervalos de confianza para series de tiempo uniformemente espaciadas (Thomson, 1982).

Los filtros son herramientas esenciales para ayudar en el aislamiento de frecuencias específicas en series de datos paleoclimáticos (Li et al., 2019). El análisis espectral de potencia se realizó a partir de los datos suavizados (LOEES) y se sometieron a un proceso de filtrado. El algoritmo utilizado en este proceso fue el de Gauss, que consiste en la definición de una función de ganancia que indica cómo las amplitudes de los componentes de la serie de tiempo cambian en función de la frecuencia durante el filtrado (Li et al., 2019).

c. Análisis Espectral Evolutivo

El espectro de potencia puede variar con la profundidad o el tiempo, especialmente para series paleoclimáticas y cicloestratigráficas, la mayoría de los datos geocientíficos se asocian a una posible distorsión de las señales en función de la profundidad (Li et al., 2019). Cuando una serie de tiempo es mayor que la ciclicidad de interés entonces es posible generar un espectro de potencia de muchos segmentos, dado que cada segmento es lo suficientemente largo para la detección de todas las frecuencias del ciclo de interés, esto es conocido como análisis espectral evolutivo (Li et al., 2019). Este análisis se considera como una suma de funciones de forma dependientes de la frecuencia que fueron modulados por coeficientes dependientes del tiempo (Wang et al., 2018).

5. RESULTADOS

El núcleo 1 se caracteriza por sedimentos clásticos de tamaño de grano fino, de carácter limoso, presenta permeabilidad relativamente baja, y una coloración gris amarillento (5y 7/2) según la carta de clasificación de color de roca Munsell (2009) (Figura 5). El contenido de materia orgánica se presenta localmente a lo largo del núcleo (Figura 5a). Es importante mencionar la presencia de granos de cuarzo (Figura 5b), óxidos de hierro, carbonato de calcio, una textura ondulatoria (Figura 5c) y pirolusita (Figura 5d, Figura 5e).

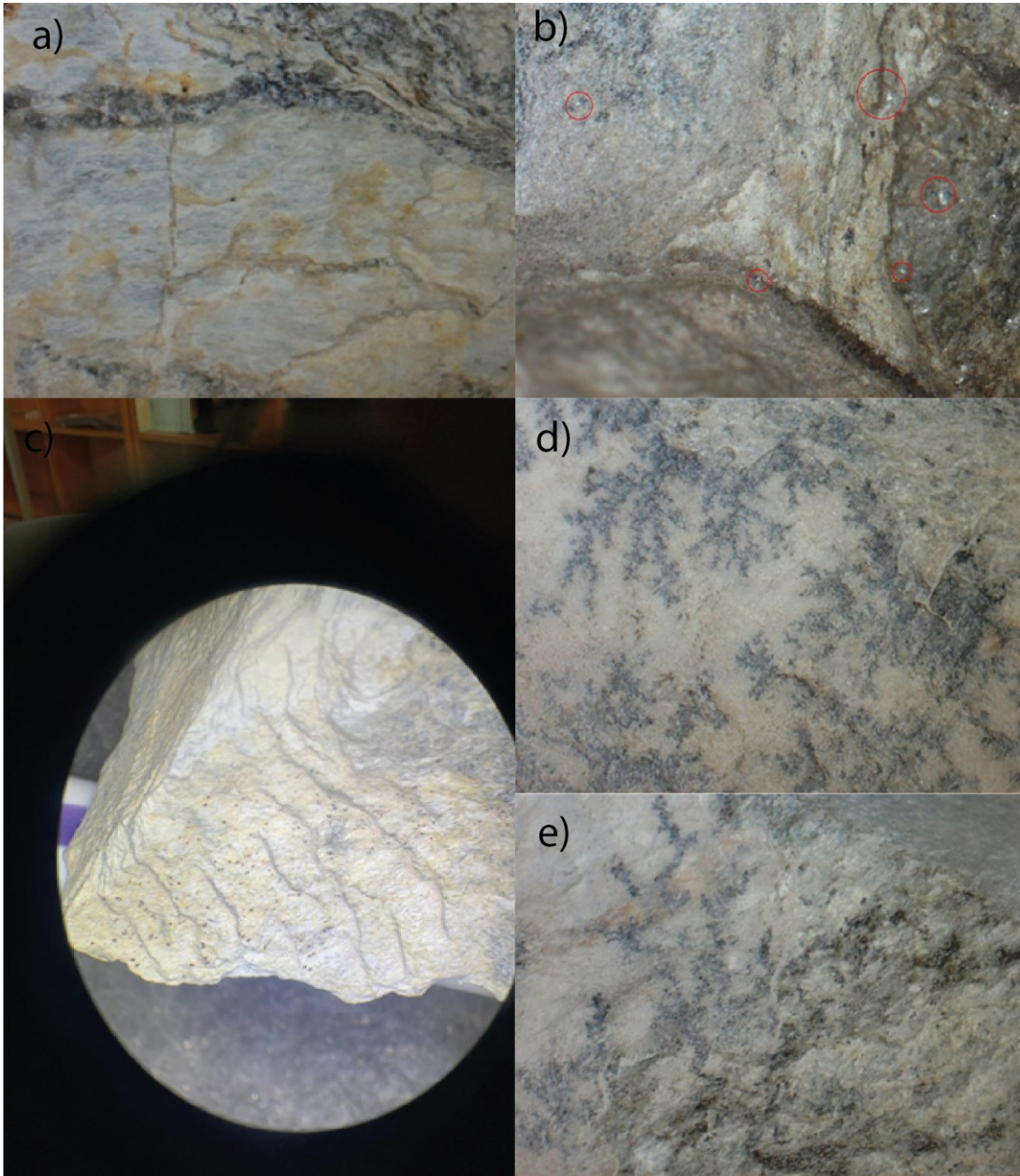


Figura 5. a) Presencia de materia orgánica b) Granos de cuarzo aislados c) Posible estructura ondulatoria d) Óxidos de manganeso pirolusita e) Pirolusita.

Los sedimentos del **núcleo 2** (Figura 4b) se caracterizan por una matriz calcárea que envuelve un contenido de fragmentos líticos y bioclastos (Figura 6a), y se clasifica como wackestone. Estos sedimentos presentan una permeabilidad baja y una coloración naranja muy pálido (10YR 8/2) según la carta de clasificación de color de Munsell (2009). Se observan fragmentos de bivalvos (Figura 6b) (Figura 6c), y fragmentos de vidrio volcánico (Figura 6d). La sección estudiada también se caracteriza por estructuras claras de bioturbación.

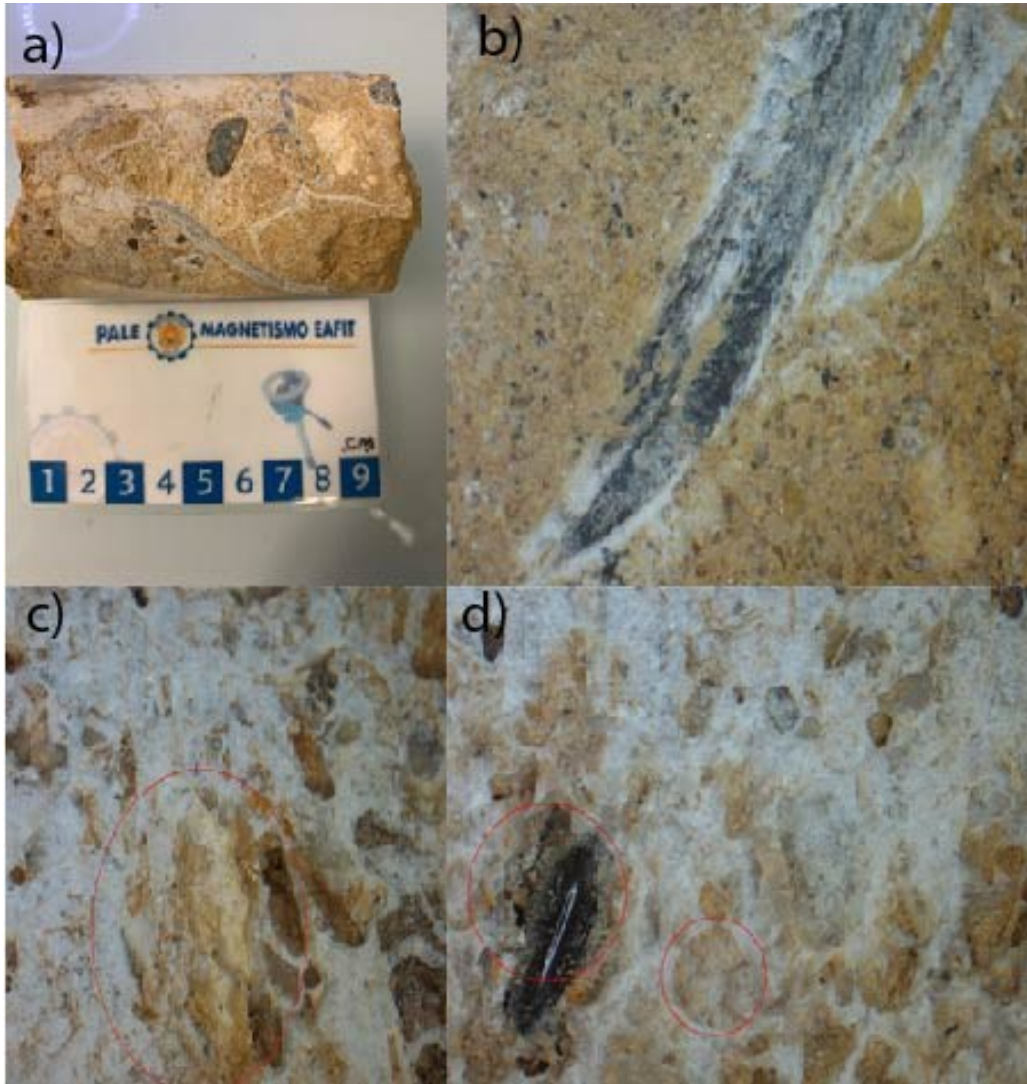


Figura 6. a) Dimensión del núcleo 2 b) Corte longitudinal de un bivalvo c) Presencia de bivalvos y/o fragmentos líticos d) vidrio volcánico y/o bioclastos.

5.1 Análisis ciclo-estratigráfico

5.1.1 Núcleo 1

Se calculó la primera frecuencia desde 9.25 ± 1.25 (Figura 7c) como resultado a esta se observa una ciclicidad continua, pero hay un desfase entre los datos y los ciclos. La segunda frecuencia se calculó desde 5.66 ± 3.8 (Figura 7d), esta define mejor manera la ciclicidad de los datos. Luego, se definieron ciclos asociados a los siguientes picos de frecuencia en el dominio de profundidad: 11.66 m, 11.77 m, 11.86 m, 11.97 m, 12.10 m, 12.20 m, 12.36 m, 12.56 y 12.73 m. El análisis espectral evolutivo (Figura 7e) se realizó en el intervalo que corresponde a 5.66 ± 3.8 , en el que se evidencia la continuidad de la frecuencia predominante en la columna.

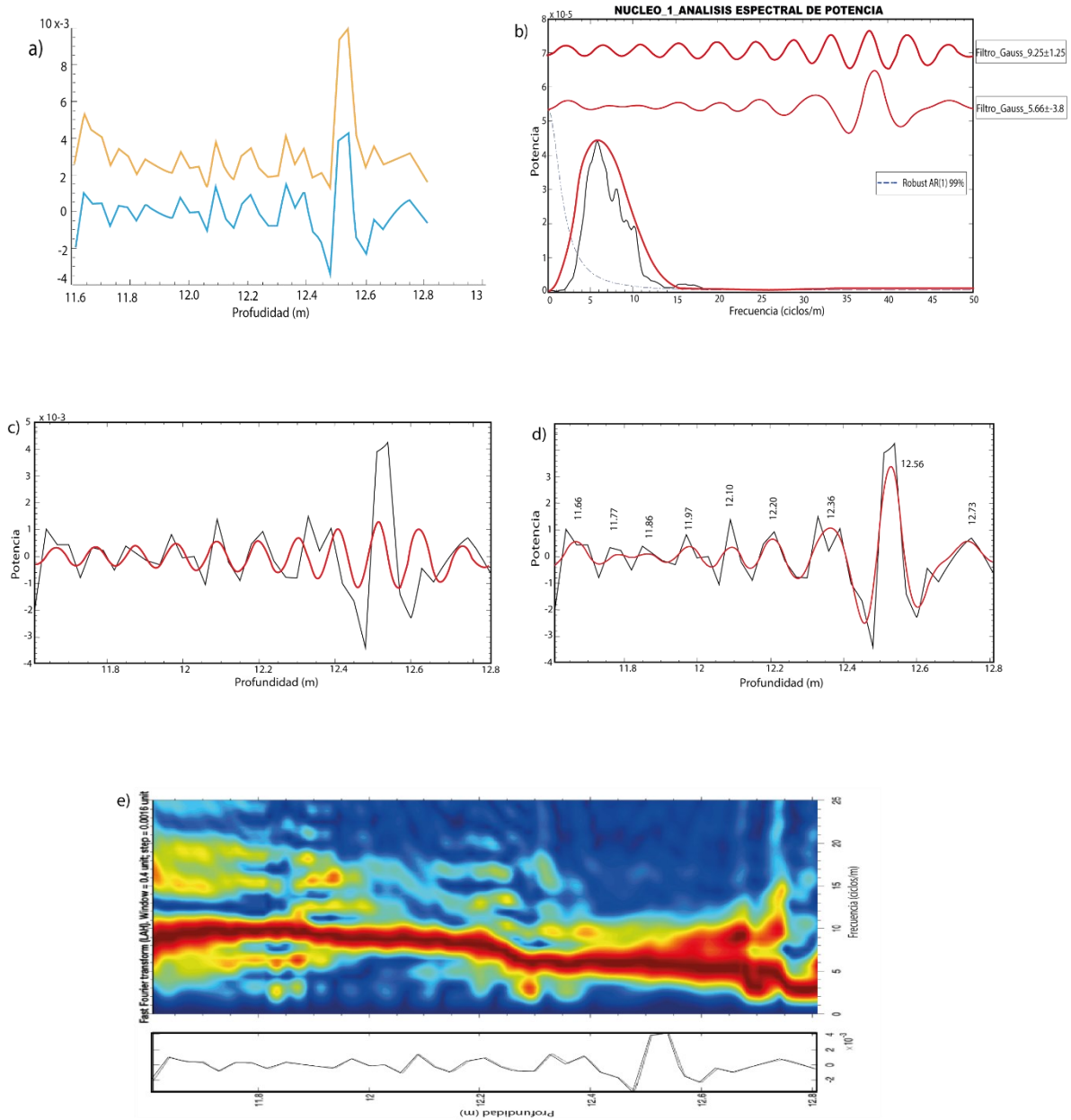


Figura 7. a) Análisis de eliminación de tendencias b) Análisis espectral de potencia c) Filtro gaussiano para frecuencias 9.25 ± 1.25 ciclos/m d) Filtro gaussiano frecuencia 5.66 ± 3.8 ciclos/m. e) Análisis evolutivo de potencia.

5.1.2 Núcleo 2

. Inicialmente se realiza el análisis de eliminación de tendencias irregulares y de amplitudes variables con el método LOESS, presenta una mejor distribución respecto a los datos iniciales (Figura 8a). El análisis espectral de potencial del método Multi-taper (MTM) permite evidenciar 3 picos de frecuencias, estos picos se encuentran sobre el umbral de confianza del 99% (Figura 8b).

El análisis de filtrado se realizó para cada frecuencia independiente donde se utilizó el método gaussiano para cada una. La frecuencia 1 se definió desde 7.94 ± 2.44 (Figura 8c) evidencia picos de frecuencia. La frecuencia 2 se definió desde 20.9 ± 4.6 (Figura 8d) en esta evidencia una serie de ciclos con longitudes y amplitudes de onda variables, La frecuencia 3 se definió desde 41.5 ± 5 (Figura 8e) se presenta una ciclicidad continua. El análisis espectral evolutivo (Figura 8f) evidencia la presencia de las 3 frecuencias asociadas a los datos de susceptibilidad magnética, definiendo su continuidad, para este caso la frecuencia que presenta mayor desarrollo es la 1 7.94 ± 2.44 .

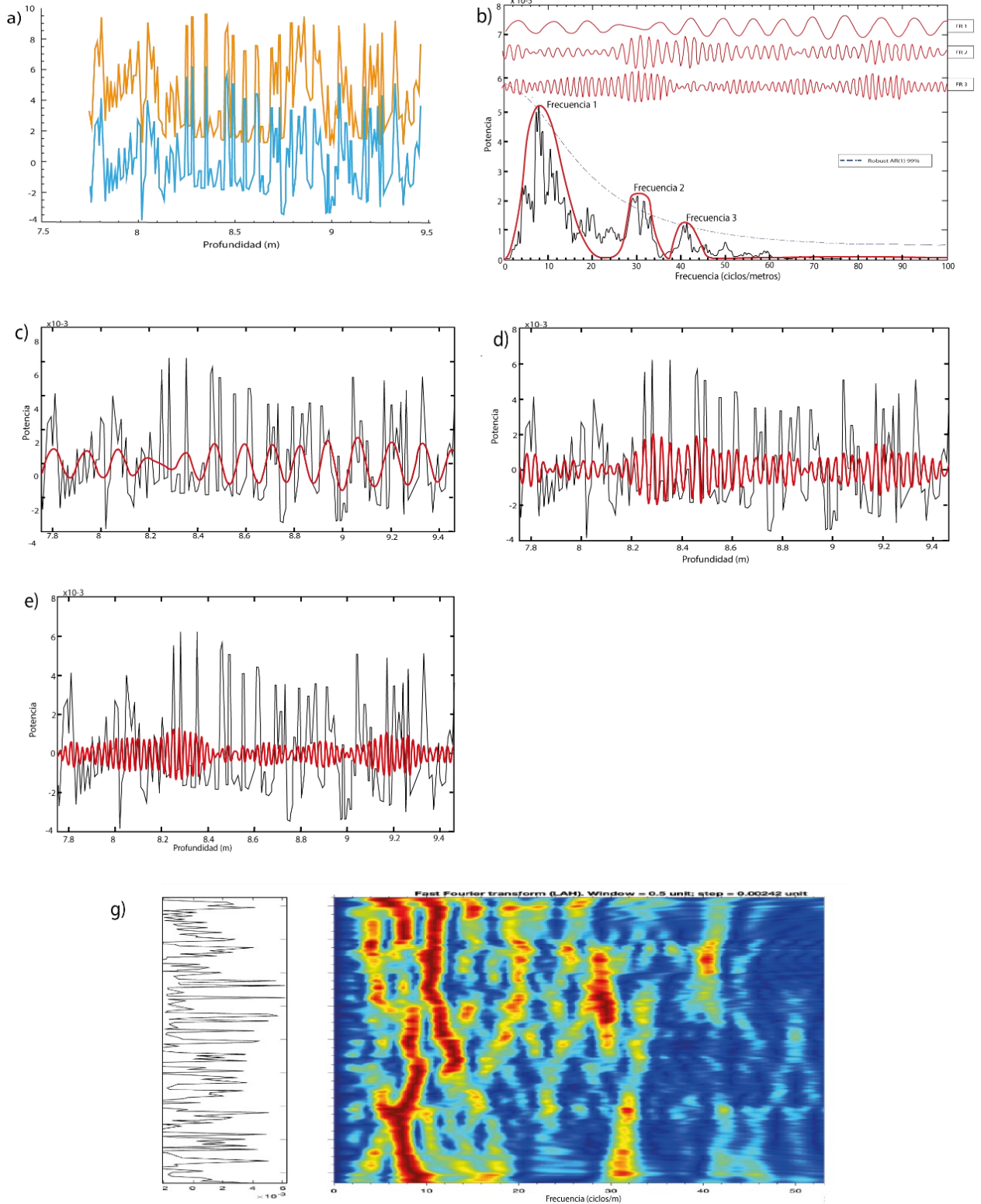


Figura 8. a) Análisis de eliminación de tendencias b) Análisis espectral de potencia c) Frecuencia 1_Filtro gaussiano 7.94 ± 2.44 (ciclos/m) d) Frecuencia 2_Filtro gaussiano

6. DISCUSIÓN

. El análisis espectral de potencia (Figura 7b, Figura 8b) a partir de los datos que se sometieron a eliminación de tendencias irregulares y variables (Detrending), muestra una periodicidad que se asocia a frecuencias continuas evidenciados en el gráfico evolutivo de potencia para cada núcleo (Figura 7e, Figura 8e).

Las frecuencias para cada núcleo (Figura 9b) definió picos para el núcleo 1 de 5.8582 (ciclos/m) y el núcleo 2 de 7.8317 (ciclos/m), determinando la duración de los ciclos a partir de la tasa de sedimentación (Anexo 4). Se evidenciaron ciclos para la sección 1 de 40kyr (pico núcleo1), 30.64kyr (pico núcleo2) y la sección 2 de 49kyr (pico núcleo1) 37.11kyr (pico núcleo2) en rangos de 290kyr-240kyr, estos responden a un comportamiento orbital (oblicuidad). En rangos menores a 200 kyr y mayores a 100 kyr se observan ciclos con duraciones de 18.77kyr, 25.6kyr (pico núcleo1), 14.06kyr, 19.17kyr (pico núcleo 2) sección 1 y 27kyr, 23.9kyr (pico núcleo1), 20.42kyr, 17.88kyr (pico núcleo 2) para la sección 2, estas duraciones se asocian con ciclos orbitales de precesión. Esta respuesta cíclica se puede relacionar con la evolución del clima global durante el Cenozoico, en especial con el Mioceno que marca una época de grandes cambios climáticos y oceanográficos globales, este periodo irrumpió el enfriamiento del Cenozoico a largo plazo con un periodo cálido de 17 a 15 Ma conocido como el Optimo climático del Mioceno Medio (Methner et al., 2020) que a su vez se relaciona con la temporalidad de las rocas de la Formación Castilletes.

La Figura 9c, evidencia como se encuentran relacionados los dos núcleos a partir los resultados de filtrado con el método gaussiano aislando las frecuencias en los picos definidos para el análisis cíclico que superan el umbral de confianza del 99%. La banda amarilla muestra ciclos de menor longitud y amplitud que se pueden relacionar con comportamiento orbital de precesión y la banda azul con oblicuidad. Sin embargo, al relacionar la sección 1 y 2 no se presenta un comportamiento orbital, esto se puede atribuir a que las frecuencias presentadas en el análisis espectral de potencia para cada núcleo se hicieron a partir de

espesores de 1,21 m (núcleo 1), 1,72 m (núcleo 2) y no son suficientes para calcular ciclos con diferencias de espesores de gran magnitud para este caso 229 m. por otro lado la Formación Castilletes está depositada en un ambiente marino somero a un ambiente fluvio deltaico con alta influencia fluvial (Moreno et al.,2015), estas características transitorias son fundamentales para las mediciones orbitales en el registro de roca, ya que se hace necesario tener una mayor cantidad de registro para tener una mejor resolución en los datos y un acercamiento más preciso.

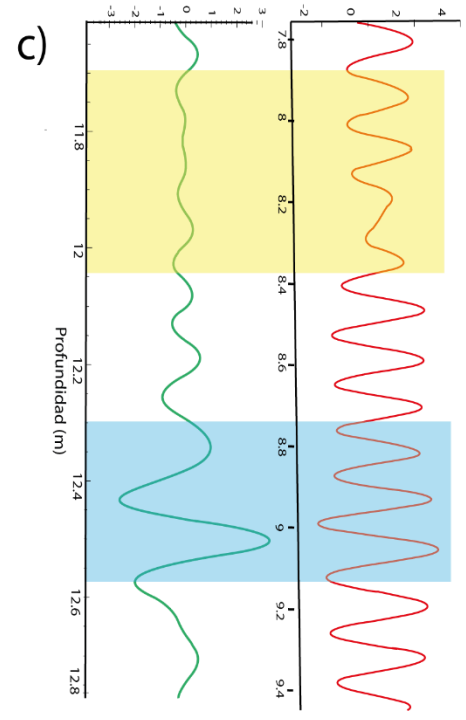
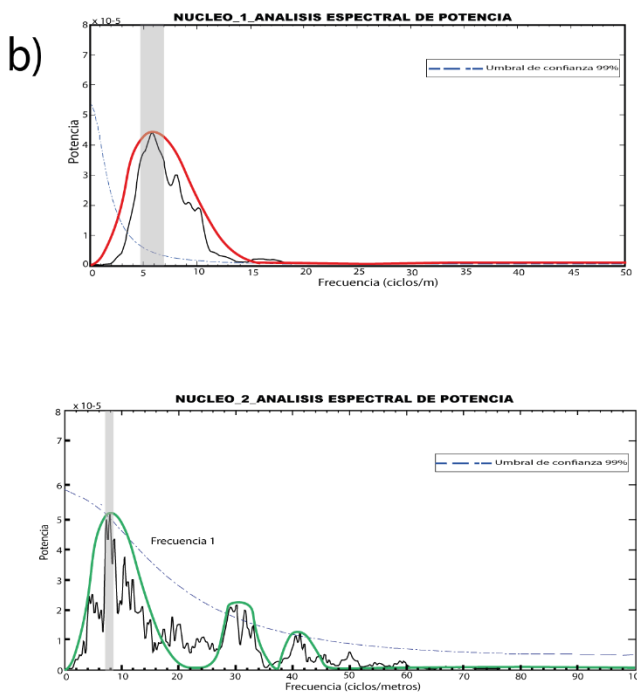
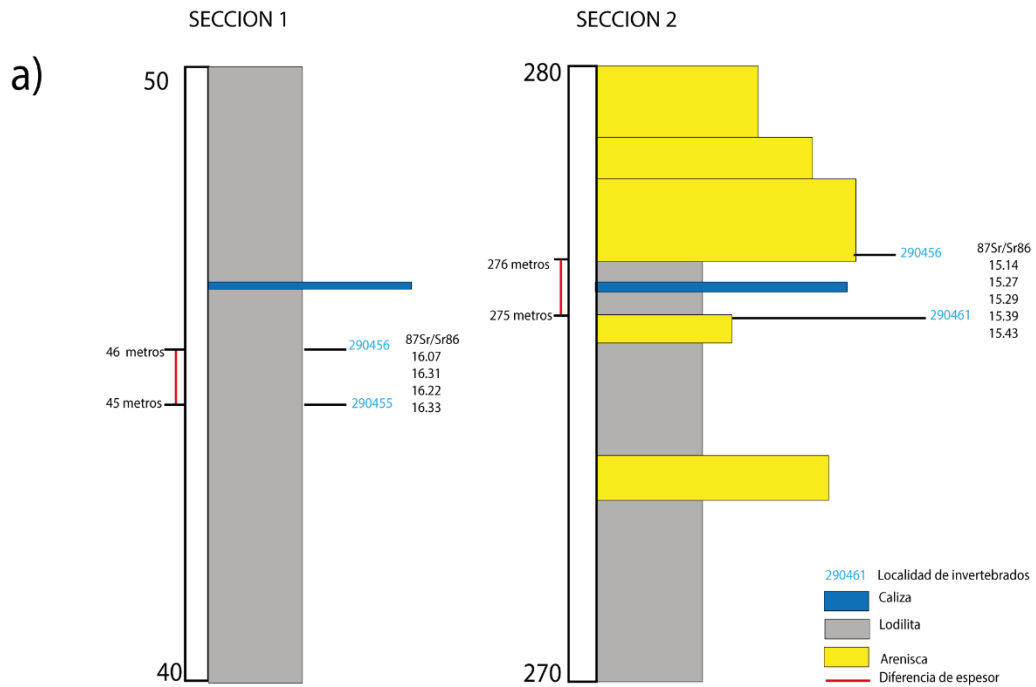


Figura 9. a) Columnas estratigráficas (sección 1 y sección 2) b) diagramas espectrales de potencia, la barra gris hace referencia al pico de frecuencia que se utilizó en el análisis c)

diagramas con filtro de gauss, franja amarilla evidencia los ciclos que están asociados a precesión, franja azul ciclos asociados a oblicuidad.

CONCLUSIONES

La Formación Castilletes presenta ciclicidad a partir de la respuesta del marcador de susceptibilidad magnética χ , evidenciado en los diagramas espectrales de potencia a partir de frecuencias que superan el umbral de confianza del 99% para cada núcleo. La interpretación realizada a partir de edades presentes en las localidades de invertebrados demostró ciclos orbitales para la sección 1 de 40-30.64kyr (oblicuidad) 25.6-19.17kyr (precesión) y la sección 2 de 49-37.11kyr (oblicuidad) 23.9-17.88kyr (precesión) en intervalos de profundidad de 1 metro. donde la susceptibilidad magnética normalizada a la masa (χ) asociada a valores positivos son correlacionables con la identificación de ciclos orbitales que afectaron el clima y la producción de sedimentos en la Formación Castilletes. Sin embargo, se hace necesario un levantamiento bioestratigráfico e isotópico detallado, con el fin de correlacionar completamente los núcleos analizados con el trabajo realizado por Moreno et al (2015).

REFERENCIAS

Aponte, M., 2010. Organización espacial de la región geográfica de la Alta Guajira colombiana. *Perspectiva Geográfica* 15, 157-176.

Barrero D., Pardo A., Vargas A., Martínez J., 2007. Colombian Sedimentary Basins: Nomenclature, Boundaries and Petroleum Geology, a New Proposal. *Agencia Nacional de Hidrocarburos* 1, 92.

Berger, A., 1988. Milankovitch theory and climate. *Reviews of geophysics* 26, 624-657.

Böhme, M., 2003. The Miocene Climatic Optimum: evidence from ectothermic vertebrates of Central Europe. *Palaeogeography. Palaeoclimatology. Palaeoecology* 195, 389-401.

- Burgl, H., 1960. Geología de la península de la Guajira. Boletín Geológico 6, 129-168.
- Carrillo J. D., Amson E., Jaramillo C., Sánchez R., Quiroz L., Cuartas C., Sánchez-Villagra, M. R., 2018. The Neogene record of northern South American native ungulates. *Smithsonian Contributions to Paleobiology* 101, 1-67.
- Francescone, F., Lauretano, V., Bouligand, C., Moretti, M., Sabatino, N., Schrader, C., Catanzariti, R., Hilgen, F., Lanci, L., Turtù, A., Sprovieri, M., Lourens, L. J. and Galeotti, S., 2019. A 9 million-year-long astrochronological record of the early–middle Eocene corroborated by seafloor spreading rates. *Geological Society of America Bulletin* 131, 499-520.
- Flower, B.P., Kennett, J.P., 1994. The Middle Miocene Climatic Transition - East Antarctic Ice-Sheet Development, Deep-Ocean Circulation and Global Carbon Cycling. *Palaeogeography. Palaeoclimatology. Palaeoecology* 108, 537-555.
- Galeotti, S., Krishnan, S., Pagani, M., Lanci, L., Gaudio, A., Zachos, J. C., Lourens, L., 2010. Orbital chronology of Early Eocene hyperthermals from the Contessa Road section, central Italy. *Earth and Planetary Science Letters*, 290(1-2), 192-200.
- Goldner, A., Herold, N., Huber, M., 2014. The challenge of simulating the warmth of the mid-Miocene climatic optimum in CESM1. *Climate of the Past* 10, 523-536.
- Hendy, A.J.W., Jones, D.S., Moreno, F., Zapata, V., Jaramillo, C., 2015. Neogene molluscs, shallow-marine paleoenvironments, and chronostratigraphy of the Guajira Península, Colombia. *Swiss Journal of Palaeontology*
- Hinnov L.A., Wu H., Fang Q., 2016. Reply to the comment on “Geologic evidence for chaotic behavior of the planets and its constraints on the third-order eustatic sequences at the end of the Late Paleozoic Ice Age”. *Palaeogeogr. Paleoclimatol. Paleoecol.*, 461 (2016), pp. 475-480.

Kodama K.P., Hinnov L., 2015. Rock Magnetic Cyclostratigraphy. Wiley-Blackwell Fast-Track Monograph. New Analytical Methods in Earth and Environmental Science Series, p. 176.

López, E., 2005. Evolución tectónica de la región Caribe de Colombia. Instituto de Investigación e Información Geocientífica, Minero Ambiental y Nuclear.

Lozano E., Zamora N., 2014. COMPILACIÓN DE LA CUENCA DE LA GUAJIRA.

Methner, K., Campani, M., Fiebig, J., Löffler, N., Kempf, O., Mulch, A., 2020. Middle Miocene Long-term continental temperature change in and out pace with marine climate records. *Sci Rep* **10**, 7989. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-64743-5>

Mingsong Li., Hinnov, L., Lee, K., 2019. Acycle: Time-series analysis software for paleoclimate projects and education. *Computers and Geosciences* **127**, 12-22.

Moreno Bernal J. W., 2014. Fossil crocodylians from the high Guajira Peninsula of Colombia, and the history of Neogene crocodylian diversity in tropical South America.

Moreno, J.F., Hendy, A.J.W., Quiroz, L., Hoyos, N., Jones, J.D., Zapata V., Zapata, S., Ballen, G.A., Cadena, E., Cárdenas, A.L., Carrillo-Briceño, J.D., Carrillo, J.D., Delgado-Sierra, D., Escobar, J., Martínez, J.I., Martínez, C., Montes, C., Moreno, J., Pérez, N., Sánchez, R., Suárez, C., Vallejo-Pareja, M.C., y Jaramillo, C., 2015. Revised Stratigraphy of Neogene strata in the Cocinetas Basin, La Guajira, Colombia. *Swiss Journal of Paleontology* **134**, 5-43.

Noorbergen, L. J., Abels, H. A., Hilgen, F. J., Robson, B. E., de Jong, E., Dekkers, M. J., Krijgsman, W., Smit, J., Collinson, M. E. and Kuiper, K. F., 2018, Conceptual models for short-eccentricity-scale climate control on peat formation in a lower Palaeocene fluvial system, north-eastern Montana (USA). *Sedimentology* **65**, 775-808.

Pierce, E.L., van de Flierdt, T., Williams, T., Hemming, S.R., Cook, C.P., Passchier, S., 2017. Evidence for a dynamic East Antarctic ice sheet during the mid-Miocene climate transition. *Earth Planet. Sci. Lett.* **478**, 1-13.

Pinilla Agudelo, G., Zuluaga Ramírez S., 2014. Notas sobre la vegetación desértica del parque Eólico Jepírachi, alta Guajira, Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales* 38, 43-52.

Quintero Ortiz C. A., 2017. Tectónica Transpresiva en el Margen septentrional de la Serranía de Cosinas en la Alta Guajira (Colombia) (Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Colombia-Sede Bogotá).

Rodionov, S.N., 2006. Use of prewhitening in climate regime shift detection. *Geophys. Res. Lett.* 33.

Rollins, J. F., 1965. Stratigraphy and structure of the Goajira Peninsula, Northwestern Venezuela and northeastern Colombia. *University of Nebraska Studies*, 30, 1-102.

Rodríguez-Tovar., 2013. The fossil record as a tool in cyclostratigraphy: the incidence of Milankovitch-scale paleoenvironmental changes of paleocommunities. *Boletín Geológico y Minero.*, 124, 151-167

Strasser A., Hilgen F. J., Heckel P.H., 2006. Cyclostratigraphy—concepts, definitions, and applications. *Newsletters on Stratigraphy* 42, 75-114.

Sun, J.M., Zhang, Z.Q., 2008. Palynological evidence for the Mid-Miocene Climatic Optimum recorded in Cenozoic sediments of the Tian Shan Range, northwestern China. *Global Planet. Change* 64, 53-68.

Thomson D.J., 1982. Spectrum estimation and harmonic analysis. *Proc. IEEE*, 70, 1055–1096.

Vargas C. A., Montes L. A., Ortega C., 2012. Geología estructural y estratigrafía del área Majayura (Guajira). *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales* 36, 385-398.

Wan, S., Kürschner, W.M., Clift, P.D., Li, A., Li, T., 2009. Extreme weathering/erosion during the Miocene Climatic Optimum: Evidence from sediment record in the South China Sea. *Geophys. Res. Lett.* 36, L19706, doi:10.1029/2009GL040279.

Wang H., Xu Z., Wu T., Mao., J. 2018. Evolutionary power spectral density of recorded typhoons at Sutong Bridge using harmonic wavelets. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 177, 197-212.

Weedon G.P., 2003. *Time Series Analysis and Cyclostratigraphy: Examining Stratigraphic Records of Environmental Cycles*. Cambridge University Press, pp. 259

You, Y., Huber, M., Müller, R.D., Poulsen, C.J., Ribbe, J., 2009. Simulation of the Middle Miocene Climate Optimum. *Geophys. Res.Lett.*36, L04702, cdoi:04710.01029/02008GL036571.

Zachos, J.C., Pagani, M., Sloan, L., Thomas, E., Billups, K., 2001. Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present. *Science* 292, 686-693.

Zachos, J., Flower, B. Paul, H., 1997. Orbitally paced climate oscillations across the Oligocene/Miocene boundary. *Nature* **388**, 567–570 <https://doi.org/10.1038/41528>

Zan, J.B., Fang, X.M., Yan, M.D., Zhang, W.L., Lu, Y., 2015. Lithologic and rock magnetic evidence for the Mid-Miocene Climatic Optimum recorded in the sedimentary archive of the Xining Basin, NE Tibetan Plateau. *Palaeogeog. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 431, 6-14.

Zhao, H., Sun, Y.B., Qiang, X.K., 2017. Iron oxide characteristics of mid-Miocene Red Clay deposits on the western Chinese Loess Plateau and their paleoclimatic implications. *Palaeogeog. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 468, 162-172

Zuluaga, C.A., Ochoa, A., Muñoz C.A., Guerrero N.M., Martínez A.M., Medina P.A., Pinilla A., Ríos P.A., Rodríguez B.P., Salazar, E.A., Zapata, V.L., 2009. Memoria de las planchas 2, 3, 5 y 6 (con parte de las planchas 4, 10 y 10Bis). Proyecto de investigación “Cartografía e historia geológica de la Alta Guajira, implicaciones en la búsqueda de recursos minerales”, Acuerdo Específico No.030 de 2006. INGEOMINAS, Bogotá, 533p.

