

CICLICIDAD EN LA FORMACIÓN CERREJÓN

Morón, S.¹ ; Montes, C. ²; Jaramillo, C.³ ; Bayona, G.⁴ ; Sánchez, C.⁵

RESUMEN

El patrón de sedimentación de la Formación Cerrejón es característicamente repetitivo y monótono. Presenta un espesor estratigráfico de aproximadamente 1000 m y una longitud en rumbo de al menos 30 km a lo largo del Valle del Cesar – Ranchería. Esta monotonía ha sido utilizada para definir ocho asociaciones de litofacies y tres secuencias típicas con las que es posible describir la totalidad de esta unidad. El arreglo vertical de dichas asociaciones de litofacies permite establecer los patrones de apilamiento, pero no el mecanismo generador de la repetición y arreglo vertical de estos ciclos. Este estudio pretende reconocer patrones de ciclicidad y así establecer las posibles relaciones causales de estos ciclos, para lo cual se utilizó modelamiento sintético como primera aproximación. Los resultados de este modelamiento sugieren que con subsidencia tectónica, tasas de sedimentación constantes y una variación rítmica en el nivel de base puede reproducirse el patrón progradacional puntuado de la Formación Cerrejón. Únicamente subsidencia tectónica o termal, compactación diferencial, o fenómenos autocíclicos podrían difícilmente generar el patrón observado en tal extensión regional.

Palabras clave: Patrones ciclo, monotonía, modelamiento sintético, subsidencia tectónica

CYCLICITY IN THE CERREJON FORMATION

ABSTRACT

The Cerrejon Formation exhibits a stacking pattern characteristically repetitive and monotonous. It has a stratigraphic thickness of about 1000 m and a strike-length of at least 30 km through Cesar - Ranchería Valley. This monotony has been used to define eight lithofacies assemblages, and three typical sequences that describe the entire unit. The vertical arrangement of these lithofacies assemblages allows the recognition of stacking patterns, but not the mechanisms that generated the repetition and the vertical arrangement of these patterns. This study aims to identify cyclicity in the record and to establish a possible causal relationship for these patterns. To do this, forward modeling was used and preliminarily indicates that the punctuated progradational pattern observed in the Cerrejón Formation can be simulated keeping constant tectonic subsidence, sedimentation rates, and forcing a base level oscillation. Only tectonic or thermal subsidence, differential compaction or autocyclic phenomena could not easily generate the observed pattern on such regional extension.

Key words: Cycle patterns, monotony, forward modelling, tectonic subsidence.

INTRODUCCIÓN

La Formación Cerrejón se encuentra localizada en la cuenca del Cesar-Ranchería, limitada al noroeste por la Sierra Nevada de Santa Marta y al sureste por la falla del Cerrejón, que a su vez bordea al noroeste la Serranía de Perijá (FIGURA 1).

La explotación de carbón en la mina el Cerrejón se ha llevado a cabo durante más de 25 años, sin embargo es muy poco lo que se conoce sobre la génesis

del depósito. Trabajos recientes (Montes et al., 2005; Herrera 2004; Bayona 2004) han dado luces acerca del ambiente tectónico y climático de la Formación Cerrejón, sin embargo, estudios interdisciplinarios que expliquen la génesis del depósito en términos del complejo juego entre la subsidencia tectónica, el clima, el aporte sedimentario y de materia orgánica, los cambios eustáticos, y los procesos autocíclicos no han sido llevados a cabo. Este trabajo es una primera aproximación a este problema.

¹ Smithsonian Tropical Research Institute(STRI), CII 43 A # 9 -98 Bogotá D. C., semoronp@unal.edu.co

² Carbones de Cerrejón LLC, camilo.montes@cerrejoncoal.com

³ Smithsonian Tropical Research Institute(STRI), jaramilloc@si.edu

⁴ Corporación geológica ARES, gbayona@cgaes.org

⁵ Universidad Nacional de Colombia, casanchezq@unal.edu.co



FIGURA 1. Localización geográfica del área de estudio. Modificada de Montes et al., (2005).

ANTECEDENTES

Según el modelo geodinámico conceptual de Montes et al. (2005), la rotación de una placa continental rígida a lo largo de un eje horizontal, genera un espacio de acomodación al levantar la esquina noroccidental de la Sierra Nevada de Santa Marta, lo que permite la depositación de la Formación Cerrejón. Sin embargo esta hipótesis no explica ni la ciclicidad observada (Montes et al., 2006), ni el patrón de apilamiento agradacional a ligeramente progradacional puntuado de la Formación Cerrejón. Por otro lado, datos climáticos de Herrera (2004) basados en megaflores fósiles estiman una Precipitación Media Anual (MAP) de 350 cm/año o más y una Temperatura Media Anual (MAT) de $21.3^{\circ}\text{C} \pm 2.0^{\circ}\text{C}$, sugiriendo que la megaflores del Cerrejón se originó en un bosque húmedo tropical costero de tierras bajas. Estas cifras sugieren una alta productividad de materia orgánica, donde la generación de un equilibrio entre tabla de agua - altas

tasas de evaporación y generación de espacio de acomodación permitió la preservación de tal volumen de materia orgánica. Adicionalmente, algunas evidencias aparentemente contradictorias convierten a la Formación Cerrejón en un registro anómalo. Primero, el contenido de impurezas silíceas de los carbones de la Formación Cerrejón es muy bajo para carbones de origen parálico, lo que hace pensar en condiciones tectónicas estables durante su acumulación. Segundo, para justificar la acumulación de casi 1.000 m de espesor en menos de 2 millones de años, (Bayona et al., 2004) es necesario una alta tasa de subsidencia, contradiciendo la estabilidad mencionada anteriormente. Tercero, la Formación Cerrejón está constituida por aproximadamente 80 mantos de carbón, en contraste con otros yacimientos, donde el número de mantos es comúnmente de alrededor de 10 (Australia; Fielding, 1992; Holdgate, 2005, Sudáfrica; Selley, 1997; Faure et al., 1996). Si el mecanismo generador del espacio de acomodación de la Formación Cerrejón fuese neta-

mente tectónico (cuenca de antepaís por flexión), se observaría un patrón de sedimentación sencillo, probablemente progradacional con presencia de escasos mantos de carbón (Selley, 1997).

MARCO GEOLÓGICO

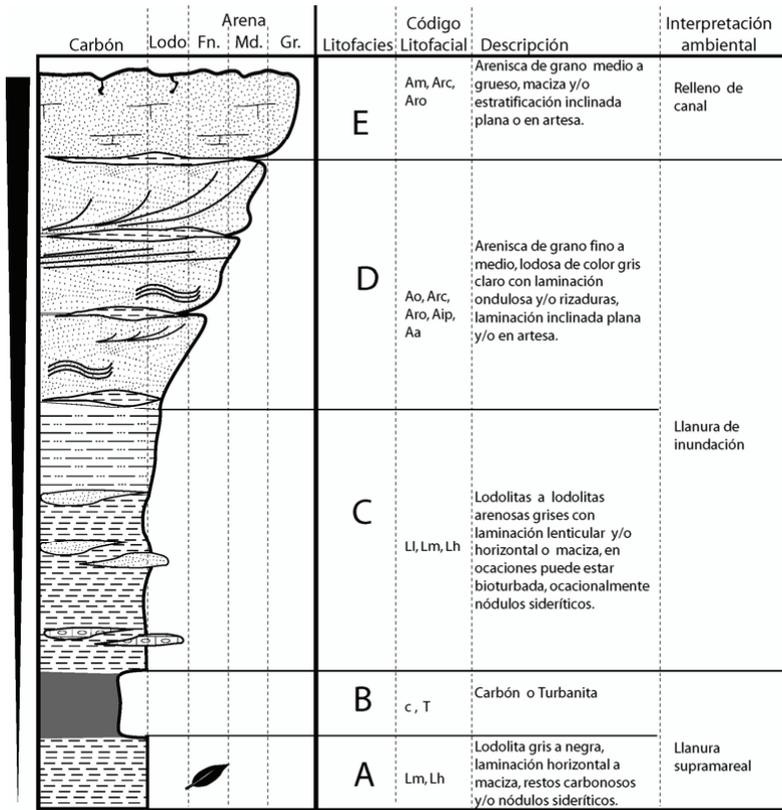
El Valle del César-Ranchería se encuentra limitado al norte por la falla dextral de Oca, al Suroeste por la falla Sinistral de Santa Marta – Bucaramanga y al Sureste por la falla de cabalgamiento del Cerrejón que también bordea la Serranía del Perijá. Cabe anotar que existe continuidad estructural con la Sierra Nevada de Santa Marta, formando un monoclinal buzando hacia el sureste.

Bayona et al., (2004) han establecido para la Formación Cerrejón 13 zonas palinológicas con un promedio de 48 metros estratigráficos por zona, asignando una edad Paleoceno Tardío y un tiempo de depositación de 2 Ma. Su composición litológica consiste esencialmente de litoarenitas grises claras a oscuras, arcillolitas, limolitas grises y shales grises a negros con abundantes mantos de carbón. Su ambiente de formación ha sido interpretado como parálico. Infrayaciendo a la Formación Cerrejón, en contacto transicional concordante se encuentra la Formación Manantial. Esta sucesión se encuentra compuesta por calizas fosilíferas con escasa glauconita, de colores blanco a amarillo, areniscas de grano fino, de color blanco a gris claro, con marcada laminación de material carbonoso, impresiones de hojas, e intercalaciones frecuentes de areniscas calcáreas oscuras, shales arenosos y shales laminados micáceos. El espesor de la formación varía entre 150 y 170 m, su edad es Paleoceno (Tschanz et al., 1974). Ocho asociaciones de litofacies y tres secuencias típicas han sido definidas por Montes et al., (2006) para describir la totalidad de la Formación Cerrejón. Dichas asociaciones de litofacies se han denominado como A, B, C, D, E, F, G y P, así como las secuencias tipo 1, 2 y 3. A continuación se hace una breve descripción de cada una de las asociaciones litofacies y secuencias tipo. La asociación de litofacies A consiste en lodolitas fisiles negras a lodolitas gris oscuras con alto contenido de materia orgánica (fragmentos aislados de restos vegetales), generalmente presenta estructura maciza. Si se observa la misma lodolita

con restos de gasterópodos y/o bivalvos, esta asociación será denominada como F. Si se presentan lodolitas grises oscuras con poco o ningún contenido de restos vegetales fragmentados con laminación lenticular de arena gris clara de tamaño fino y en ocasiones laminación ondulosa (Lo) y laminación horizontal (Lh), ocasionalmente bioperturbada, esta asociación será llamada C. La asociación de litofacies D se caracteriza por presentar areniscas grises claras lodosas de grano muy fino a medio con laminación ondulosa y/o rizaduras de corriente y de oscilación, en algunas ocasiones aparece estratificación inclinada plana, el grado de bioperturbación es muy variable. Si se observan areniscas grises claras de granulometría fina a media generalmente con estructura maciza, ocasionalmente tenue estratificación horizontal y estratificación inclinada se denomina a esta asociación E. La asociación de litofacies G consiste en areniscas grises de tamaño fino a medio con laminación flaser, rizaduras asimétricas ondulosas o laminación ondulosa. Estas litofacies gradan a areniscas con laminación heterolítica en intercalaciones “rítmicas”. La arenisca se caracteriza por poseer bajo contenido de materia orgánica y ocasionalmente granos de glauconita. Si se observan biomicrocristos o wackestones fosilíferos de color gris medio con restos de moluscos en distribución caótica, con valvas desarticuladas, dicha asociación se denomina P. Puede también encontrarse como una arena lodosa muy fosilífera, donde la fragmentación de las valvas indica que hay algún porcentaje de energía. La secuencia tipo 1 consiste de base a techo de lodolitas carbonosas, finalizando en arenitas macizas indicando una tendencia granulométrica granocreciente. Su ambiente de depósito comienza en una llanura supramareal que transicionalmente pasa a llanura de inundación y termina en un relleno de canal.

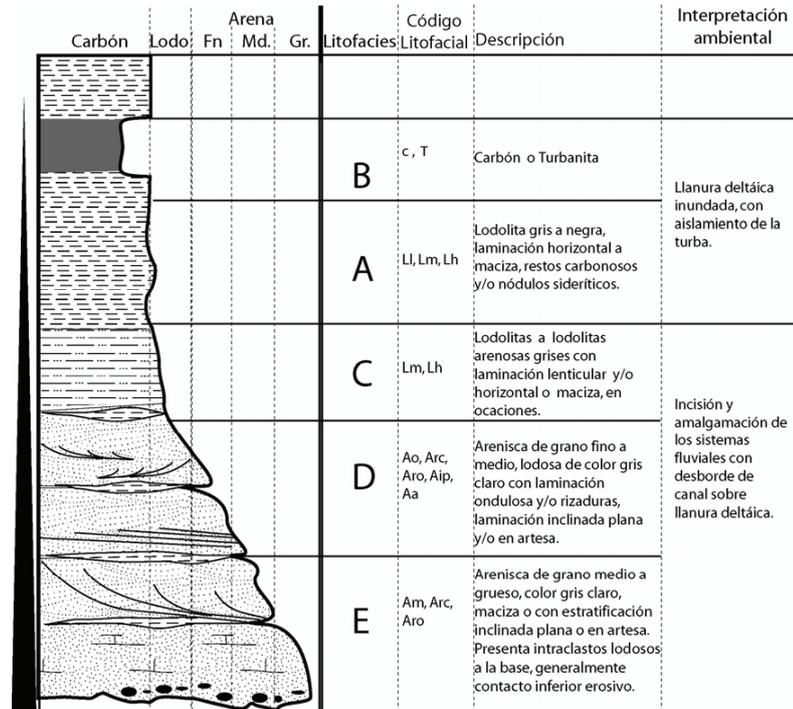
El arreglo vertical ideal de las asociaciones litofaciales propuestas (A,B,C,D,E) se presenta en la (FIGURA 2).

La secuencia tipo 2 es granodecreciente con presencia de mantos de carbón hacia el tope acumulados en ambientes propios de una llanura fluvial. De base a techo comienza con un contacto neto a la base de la asociación de litofacies E. La migración del canal se representa por el cambio vertical de las asociaciones E, D, C, B (FIGURA 3). La secuencia tipo 2 se reconoce por contener la asociación de litofacies E con



Secuencia Tipo 1

FIGURA 2. Secuencia tipo 1.



Secuencia Tipo 2

FIGURA 3. Secuencia tipo

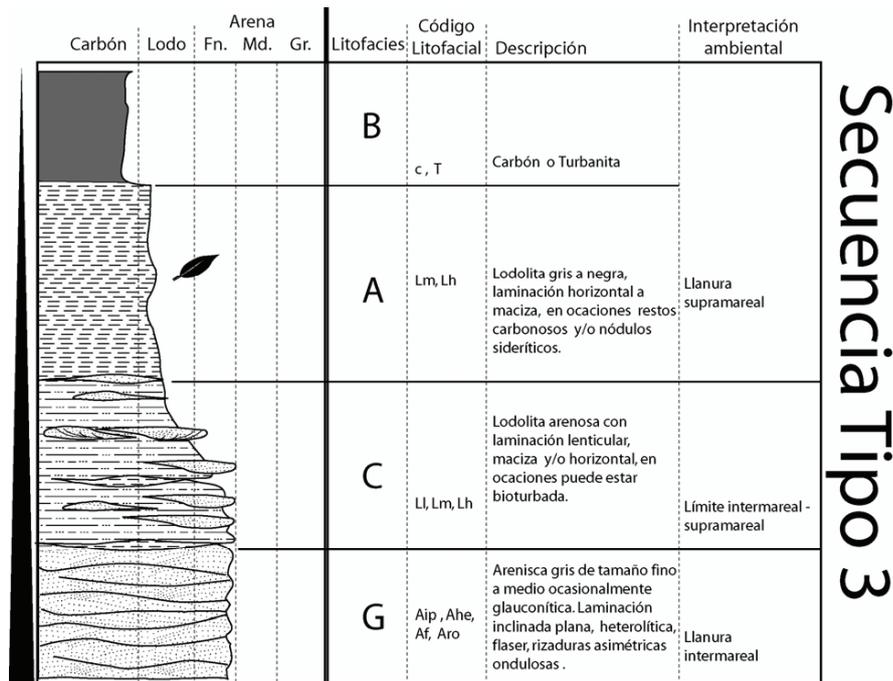


FIGURA 4. Secuencia tipo 3.

contacto inferior neto y ocasionalmente con intraclastos a la base, esto indica el avance de los ambientes de mayor régimen de energía en el sistema fluvial.

La secuencia tipo 3 es granodecreciente, incluye las asociaciones litofaciales cuyas estructuras indican la cercanía a la línea de costa con influencia mareal (FIGURA 4). Su progradación produce una secuencia característica que idealmente de base a techo incluye las asociaciones litofaciales G,C,A,B. Así esta secuencia tipo comienza con una planicie intermareal arenosa (asociación litofacial G) seguida de una zona con disminución del contenido clástico (asociaciones litofaciales C, A), evidenciando disminución en la capacidad de transporte y marcando el límite entre la planicie intermareal y supramareal. Por último se observa un enriquecimiento en materia orgánica con acumulación de plantas y formación de carbón (asociación litofacial B), típico de una planicie supramareal.

En la FIGURA 5 se presenta el esquema sin escala del estilo de sedimentación observado en la Formación Cerrejón, donde a la base se observa un predominio de secuencias tipo 3, en la parte media de la unidad, predominio de facies lodosas y secuencias granodecrecientes tipo 2 y al tope un mayor porcentaje de

secuencias tipo 1, evidenciando la progradación puntuada del sistema compuesta por arenitas y arenitas conglomeráticas grises a amarillentas y ambientalmente evidencia una zona de canales fluviales.

METODOLOGÍA

El primer paso para intentar entender los patrones de ciclicidad reconocidos por Montes et al., (2006) en el registro litológico es modelar el proceso de llenado de cuenca con herramientas de modelamiento sintético (forward modelling). Para este estudio fue necesario suponer tasas de depositación constantes y ausencia de mayores hiatos estratigráficos (Bayona et al., 2004). Asimismo se deben asumir tasas de subsidencia constantes. Con el fin de aislar el efecto de las diferentes relaciones causales arriba mencionadas, y entender la influencia de cada una, se realizó un modelamiento sintético en el programa Strata (Flemings & Jordan, 1989). Preliminarmente los posibles casos considerados fueron: subsidencia tectónica y subsidencia tectónica mas cambios de nivel del mar.

Los parámetros del modelamiento fueron basados en los datos de palinología (tiempo de depositación de 2 Millones de años), extensión real de la cuenca, tasas

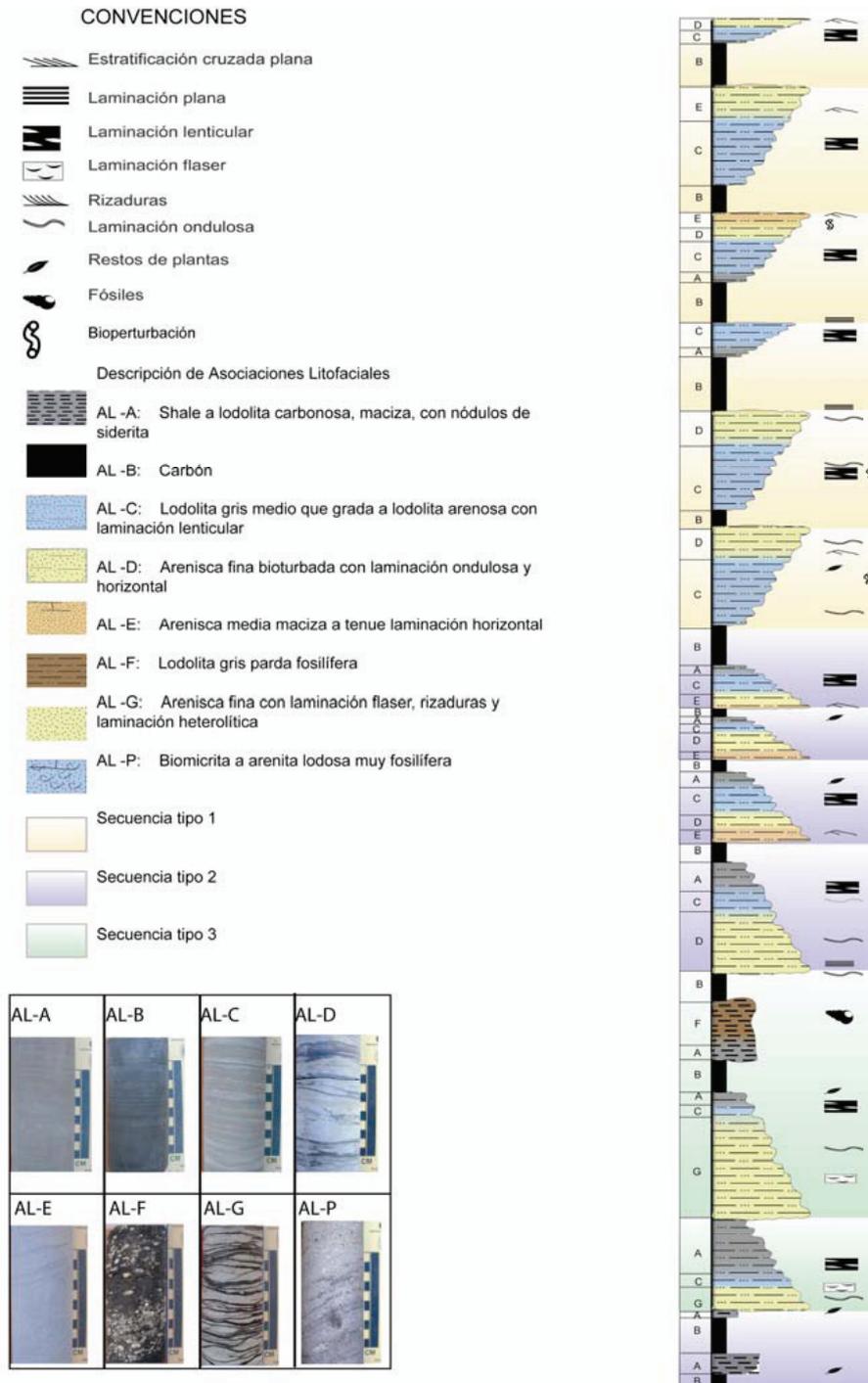


FIGURA 5. Esquema sin escala del estilo de sedimentación observado en la Formación Cerrejón. La Formación Tabaco suprayace discordantemente a la Formación Cerrejón y está compuesta por arenitas y arenitas conglomeráticas grises a amarillentas y ambientalmente evidencia una zona de canales fluviales.

TABLA 1. Parámetros del modelamiento para los dos posibles efectos causales.

	Subsidencia Tectónica (FIGURA 2)	Subsidencia Tectónica + Cambios del nivel del mar (FIGURA3)
Subsidencia	Uniforme	Uniforme
Extensión de cuenca (km)	350	350
Divisiones espaciales	1000	1000
Tiempo (Millones de años)	2	2
Divisiones temporales	4000	4000
Líneas de tiempo	100	100
Tasa de sedimentación (m ² /año)	150	150
Amplitud de la oscilación del nivel del mar (m)	0	20
Periodo de oscilación del nivel del mar	Nulo	10 ⁻⁵ años ⁻¹
Tasa de subsidencia (m/año)	0.001	0.001
Tasas de Compactación		
Lodolitas (m ⁻¹)	0.51*10 ⁻³	0.51*10 ⁻³
Arenitas (m ⁻¹)	0.27*10 ⁻³	0.27*10 ⁻³

de depositación calculadas mediante espesor y tiempo de depositación, cambios del nivel del mar cada 100.000 años. Los parámetros son enumerados en la TABLA 1.

RESULTADOS PRELIMINARES Y DISCUSIÓN

Del modelamiento realizado con los parámetros expuestos anteriormente, se obtuvieron perfiles NW-SE (coordenadas presentes) y diagramas de Wheeler, (1958, 1964). Para el caso de subsidencia tectónica se observó un patrón de apilamiento agradacional sencillo desarrollando una cuña sedimentaria uniforme sin hiatos u oscilaciones de ningún tipo (FIGURA 6).

Por el contrario el perfil obtenido para el caso de subsidencia tectónica mas cambios del nivel de base, muestra un patrón de agradacional puntuado dado por la ocurrencia de múltiples trasgresiones, regresiones y hiatos (FIGURA 7).

En una primera aproximación, la monotonía y ciclicidad observada en la Formación Cerrejón pueden ser adecuadamente reproducidas manteniendo una

subsidencia alta (1mm/año) -pero constante- un flujo sedimentario igualmente alto pero constante, e imponiendo una variación regular en el nivel de base con un período de oscilación de 100.000 años. La oscilación aquí modelada como cambios rítmicos en el nivel de base puede también ser asignada a cambios climáticos (ciclos secos/húmedos) igualmente rítmicos, o algún otro factor aquí no considerado que pueda imponer una ciclicidad sobre factores inicialmente fijados como constantes (subsidencia o la tasa de sedimentación). Simulaciones más complejas pueden ser propuestas modelando variación rítmica y no rítmica en varios factores y simultáneamente, con el fin de investigar los patrones resultantes y compararlos con el apilamiento observado en el registro litológico de la Formación Cerrejón.

CONCLUSIONES

Usando parámetros de subsidencia, tasas de sedimentación, datos de espesor y extensión de la cuenca, es posible reproducir sintéticamente patrones de apilamiento rítmicos similares a los observados en el registro litológico de la Formación Cerrejón. Este trabajo es una primera aproximación que involucra

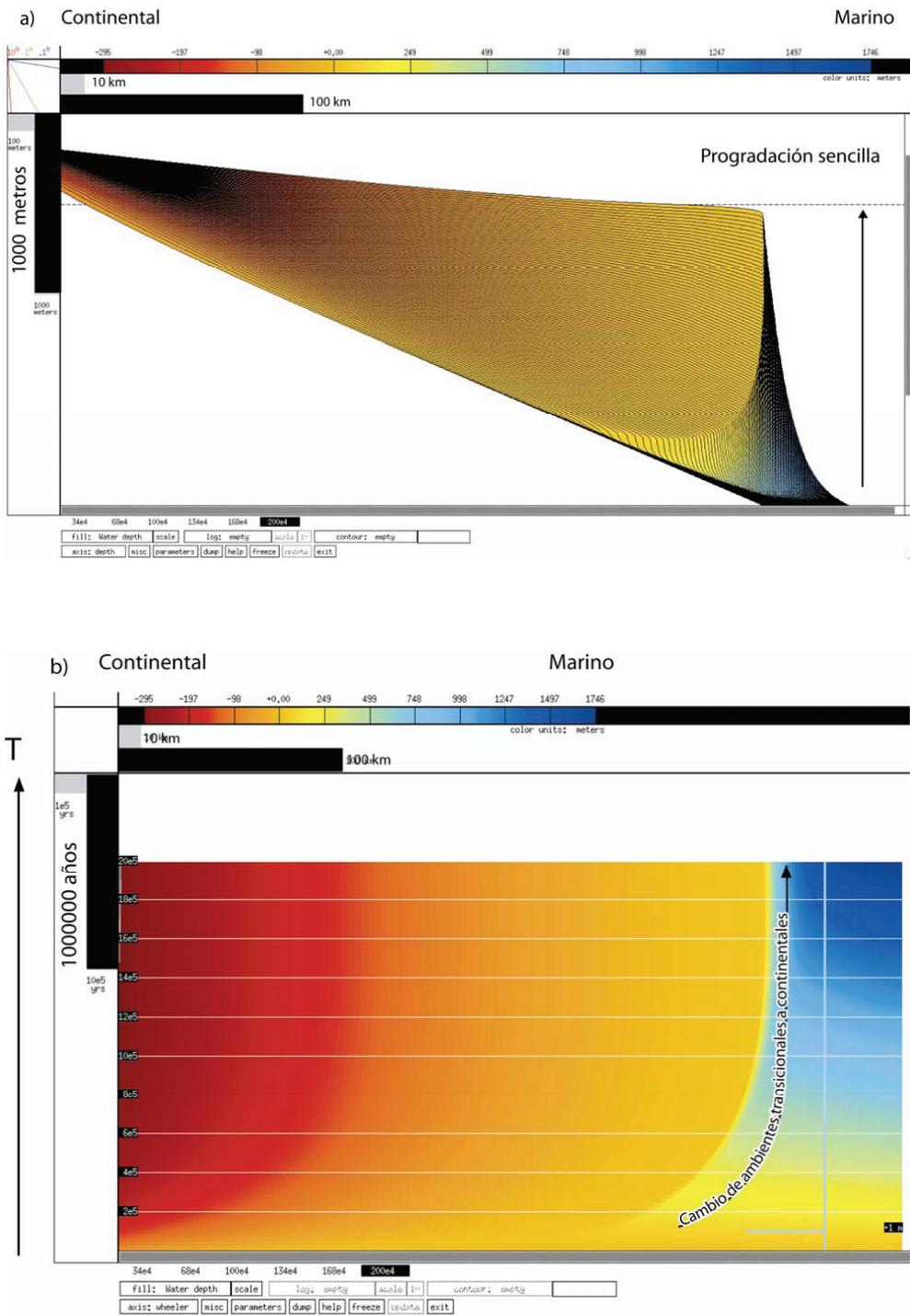


FIGURA 6. a) Perfil modelado de la Formación Cerrejón, caso subsidencia tectónica b) diagrama Wheeler, (1958, 1964) correspondiente.

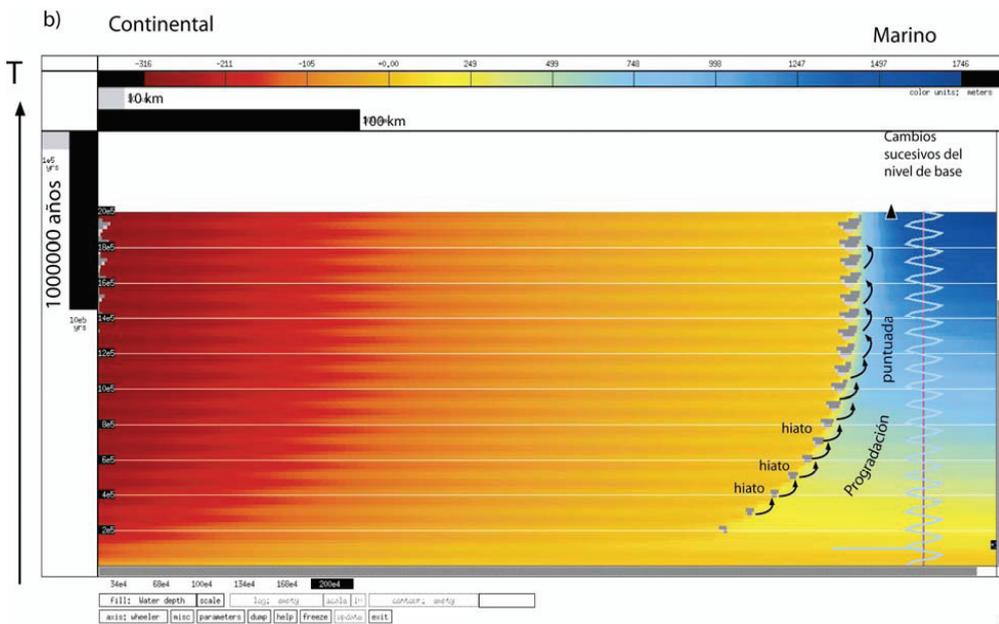
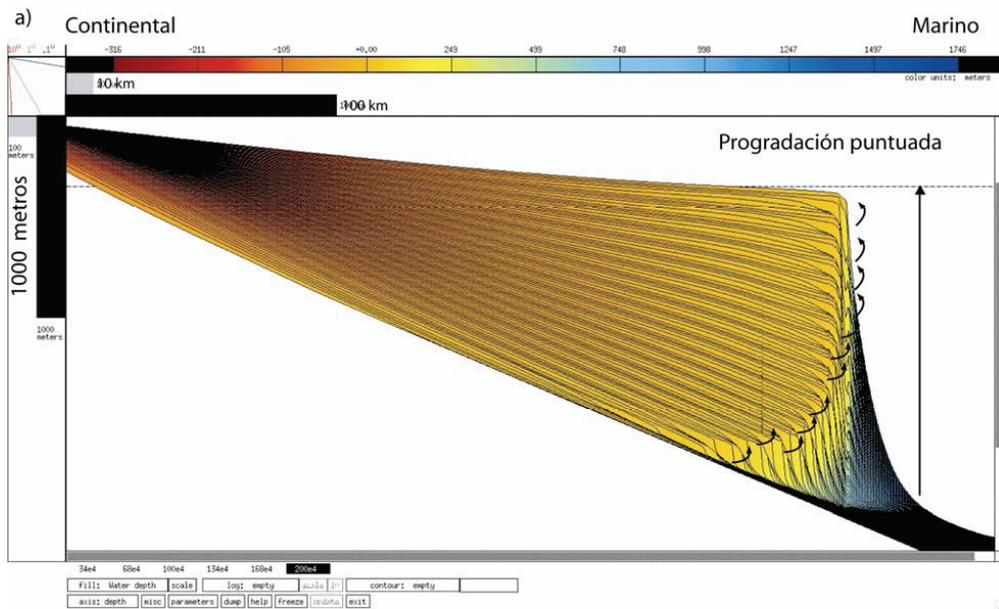


FIGURA 7. a) Perfil modelado de la Formación Cerrejón, caso subsidencia tectónica mas cambios de nivel del mar b)diagrama Wheeler, (1958, 1964) correspondiente.

efecto tectónico y cambios de nivel del mar, lo que sugiere causas de tipo regional o quizás de tipo climático global. Se hace necesario realizar modelamientos más complejos en los que se consideren efectos tectónicos y climáticos que generen cambios cíclicos en la curva de nivel del mar, ya que subsidencia tectónica o termal, compactación diferencial, o fenómenos autocíclicos podrían difícilmente generar el patrón observado en tal extensión regional.

AGRADECIMIENTOS

A la empresa Carbones del Cerrejón, LLC por el acceso a información y el apoyo logístico, a los geólogos de mina, de exploración (G-7, G-14) y de modelo por su apoyo y sus discusiones, a los operarios de exploración.

REFERENCIAS

- Bayona, G.; Jaramillo, C.; Rueda, M.; Pardo, A.; Christie, A.; Hernández, G. (2004). Important paleotectonic and chronostratigraphic considerations of the Late Paleocene in the Northernmost Andes as constrained by Paleocene rocks in The Cerrejón Coal Mine, Guajira, Colombia. *Memorias de la Tercera Convención Técnica de la Asociación Colombiana de Geólogos y Geofísicos del Petróleo*. Bogotá.
- Faure, K.; Willis, J. P.; Dreyer, J.C. (1996). The grootegeeluk formation in the Waterberg Coalfield, South Africa: facies, palaeoenvironment and thermal history evidence from organic and clastic matter. *International Journal of Coal Geology*, Vol. 29, pp.147-186
- Fielding, C. R., (1992). A review of Cretaceous coal-bearing sequences in Australia, in McCabe, P. J., and Parrish, J. T. (editors), *Controls on the Distribution and Quality of Cretaceous Coals: Boulder, Colorado*, Geological Society of America Special Paper 267, pp. 303-324
- Flemings, P.B. & T.E. Jordan (1989). A Synthetic Stratigraphic Model of Foreland Basin Development. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 94, pp. 3851-3866.
- Herrera, F. (2004). Paleotemperatura y paleoprecipitación del paleoceno superior en zonas tropicales usando plantas megafósiles de la Formación Cerrejón, Mina de carbón El Cerrejón, Guajira. Universidad Industrial de Santander. Tesis de grado, 50p.
- Holdgate, R.G. (2005). Geological processes that control lateral and vertical variability in coal seam moisture contents Latrobe Valley (Gippsland Basin) Australia. *International Journal of Coal Geology*, Vol. 63, pp.130-155
- Hinnov, L. (2000). New perspectives on orbitally forced Stratigraphy. *Annual Review of Earth and Planetary Science*, Vol. 28, pp. 419- 475.
- Jones, T.P.; Fortier, S. M.; Mosbrugger, V.; Roessler, J.; Utescher, T.; Ashraf, A. R. (1997). 13C/12C ratio double cyclicity in a Miocene browncoal: isotopic signals and orbital forcing. *Terra Nova*, Vol. 9, No. 1, pp. 19-23.
- Large, D. J.; Jones, T. F.; Somerfield, C.; Goringe, M. C.; Spiro, B.; Macquaker, J. H. S.; Atkin B.P.; (2003). High-resolution terrestrial record of orbital climate forcing in coal. *Geology*, Vol. 31, No. 4, pp. 303–306.
- Montes, C.; Bayona, G.; Ojeda, C.; Molina, M.; Herrera, F. (2005). Uplift of the Sierra Nevada de Santa Marta and subsidence in the Cesar -Ranchería valley: Rigid-beam pivot model. *Extended Abstracts 6th international symposium on Andean geodynamic (ISAG)*. Barcelona 2005.
- Montes, C.; Bayona, G.; Meza, L. A. ; Martínez, C. (2006). Estudios Estratigráficos en la Formación Cerrejón: Aplicabilidad de Herramientas Estratigráficas Predictivas en una Cuña Sedimentaria Paleocena. *Memorias del IX Simposio Bolivariano de Cuencas Subandinas*. Cartagena Septiembre de 2006.
- Selley, R.C., 1997, African Basins. In: Hsu, K. J. (series editor), *Sedimentary Basins of the World*, Elsevier, Amsterdam, Vol. 3, pp. 269-317
- Tschanz, C.; Marvin, R.; Cruz, J.; Mennert, H.; Cebula, E. (1974). Geologic evolution of the Sierra Nevada de Santa Marta. *Geological Society of America Bulletin*, Vol. 85, pp. 269-276.
- Wheeler, H.E., (1958), *Time-stratigraphy: American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, Vol. 42, pp. 1047-1063.
- Wheeler, H.E., (1964), *Baselevel, lithosphere surface, and time-stratigraphy: Geological Society of America Bulletin*, Vol. 75, pp. 599-610.

Trabajo recibido: febrero 20 de 2007
Trabajo aceptado: mayo 15 de 2007