

CORRELACIÓN GRÁFICA Y CAMBIO DE FACIES ENTRE DOS LOCALIDADES DE LA FORMACIÓN LA FRONTERA, VÍA BOGOTÁ-MESITAS DEL COLEGIO, COLOMBIA.

Tomás Villamil¹, Claudia Arango¹, Daniel Castillo², Carlos Jaramillo² y Diego Mojica³.

Resumen.

La técnica de correlación gráfica propuesta por primera vez por Shaw (1964) es una herramienta poderosa para comparar secciones estratigráficas de edades similares. La correlación gráfica, fue originalmente utilizada para comparación con fósiles; sin embargo en el presente artículo utilizamos esta técnica para comparar intervalos litológicos coetáneos o aproximadamente coetáneos entre dos secciones de la Formación La Frontera (vía Bogotá-Mesitas del Colegio). Utilizamos los siguientes criterios: variaciones marcadas en la concentración de sílice, intervalos ricos en carbonatos, intervalos condensados y bentonitas. Con base en los resultados de esta correlación se presenta un modelo de variaciones faciales y sus implicaciones paleogeográficas para esta parte y edad del corredor marino Cretácico. Las facies de la sección oriental se interpretaron como más cercanas al continente que las facies de la sección occidental.

Abstract.

The graphic correlation technique was proposed originally by Shaw (1964); it is a wonderful tool to compare stratigraphic sections of similar ages. Graphic correlation has been commonly used to correlate sections with fossils, however, in the present paper we use this technique to compare two coeval or closely coeval lithologic intervals of the La Frontera Formation (Bogotá-Mesitas del Colegio road), we chose the following criteria: marked changes in silica concentration, intervals rich in carbonates, condensed intervals, and bentonites. Based on the correlation results, a facies changes model and its paleogeographic implications for this portion and age of the Cretaceous seaway is proposed. The eastern section facies are interpreted as deposited closer to the continent in relation to the facies of the western section.

1. Geological Sciences CB 250, University of Colorado at Boulder, USA.

2. Corporación ARES, Bogotá. FAX 3414164

3. Geoambiental, Bogotá.

Introducción.

Mediante un estudio detallado de terreno de dos afloramientos de la parte superior de la Formación La Frontera (distantes 3,5 km geográficos), se puede llegar a conclusiones de carácter regional. La comparación de ambas secciones utilizando el método de correlación gráfica propuesto por Shaw (1964) indica que estas facies coetáneas son de naturaleza heterópica. La sección oriental (km 23 vía Bogotá-Mesitas del Colegio) muestra facies que se pueden interpretar como depositadas más cerca al continente con relación a la facies de la sección occidental (km 28 vía Bogotá-Mesitas del Colegio).

El método empleado en el terreno fue medir cuidadosamente con bastón de Jacob las dos secciones, anotando todas las características litológicas y haciendo énfasis particularmente en los intervalos litológicos de significancia temporal. Se identificaron tres clases diferentes de eventos de esta índole: 1) eventos químicos como abundancia relativa de sílice o de carbonato de calcio en el océano (reflejados como intervalos ricos en chert o en caliza). 2) Eventos "temporales", particularmente la utilización de secciones condensadas (reflejadas como intervalos ricos en piritita autigénica, condensación de estratos de micritas, presencia de capas que por su contenido paleontológico se pueden interpretar como endurecidas o cementadas deposicionalmente). 3) Eventos físicos: explosiones volcánicas reflejadas como capas de bentonitas o de cenizas.

La realización de la correlación gráfica se hizo posible gracias a la combinación de dos programas de computador: Mac Draw versión II para las secciones estratigráficas y Cricket Graph para evaluar el valor estadístico de los resultados de correlación. Se utilizó la rutina "multifinder" para la combinación de programas. En la figura 1, se muestran los resultados de la correlación gráfica y dos líneas de regresión; la línea continua fue obtenida "al ojo" y la línea achurada por el computador.

Los objetivos principales de este trabajo son: incrementar el conocimiento de la Formación La Frontera mediante el análisis de correlación gráfica y su correspondiente variación facial. Corroborar lo propuesto por Etayo et al. (1976) respecto a la posición del mar Cretácico durante el "Senoniano". Además, mostrar cómo la correlación gráfica se puede aplicar con facilidad a secciones de edades similares medidas al detalle y comprobar que ella es una herramienta poderosa para sustentar las interpretaciones realizadas.

Facies y ciclos de la Formación La Frontera.

La Formación La Frontera es la unidad superior del llamado Grupo Villeta. Esta formación fue propuesta informalmente por Cáceres y Etayo (1969), describiendo las rocas de la cantera La Frontera cerca de Albán, Cundinamarca. Su edad con base en "Inoceramus" es Turoniense a Coniaciense. En el presente trabajo sólo se

describirán brevemente las litofacias de la parte superior de la Formación La Frontera. Estas consisten de una interposición rítmica de intervalos ricos en carbonatos (micritas, niveles de concreciones y shales altamente calcáreos) e intervalos relativamente ricos en arcilla y limo (shales y lodolitas). Esta ritmicidad se puede explicar si asumimos que la precipitación de carbonatos es constante, como lo sugirió Barron et al. (1985), y el aporte de terrígenos es variable. El contacto entre los shales interpuestos con calizas y el intervalo de cherts hacia la parte superior es gradual rápido; se pueden definir dos pulsos de incremento dramático en la concentración de sílice en el océano Cretácico.

Un aspecto evidente de la facies de La Frontera es la ciclicidad en el patrón de deposición. Hay una ciclicidad primaria a escala métrica que domina la aparición de micritas y capas de concreciones calcáreas y una ciclicidad centimétrica que se puede observar en los intervalos relativamente pobres en carbonato de calcio (Fig. 2).

Las causas de la ciclicidad observada en la Formación La Frontera no se pueden deducir con los datos obtenidos en el terreno: hay varias posibilidades para su explicación y la única manera de escoger la más adecuada es mediante la realización de un análisis de series tiempo-frecuencia; para éste se requiere un control bioestratigráfico excelente o radiometría de las bentonitas dando valores "absolutos" de tiempo y la utilización de un programa específico de computador. Aún sin realizar el análisis de series

tiempo-frecuencia, nosotros proponemos dos alternativas para explicar la ciclicidad observada: la primera, variaciones rítmicas del nivel relativo del mar, siguiendo el concepto de parasecuencias del modelo de estratigrafía secuencial (Vail et al., 1977; Van Wagoner et al., 1991). Al subir el nivel relativo del mar, los sedimentos de origen terrígeno se atrapan hacia el continente.

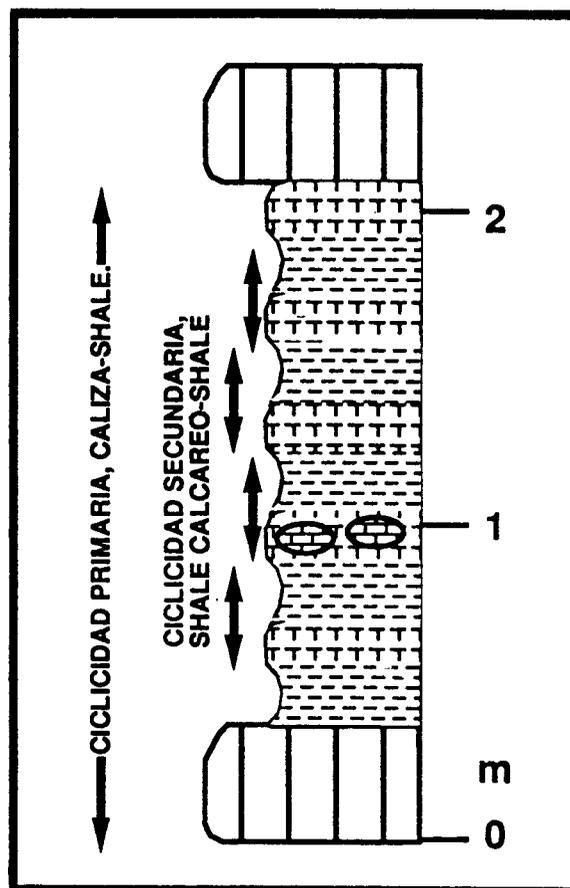


Fig. 2. Ciclicidad a escala métrica caliza-shale-caliza y centimétrica, shale calcáreo-shale, observada en la Formación La Frontera. El ejemplo proviene de la sección occidental (km 28). Ver discusión en el texto.

Al suceder ésto, la porción de la cuenca donde se estan depositando shales calcáreos queda empobrecida en aporte continental y la sedimentación por precipitación química domina, formandose así calizas (micritas).

La segunda posibilidad y por la que más nos inclinamos, es la de que estos ciclos sean causados por cambios climáticos que afectan la humedad ambiental (Fischer et al., 1985; Kauffman, 1985) sin variaciones netas del nivel del mar. Una época de intensa lluvia causa un aporte relativamente grande de sedimentos terrígenos, formando shales a shales levemente calcáreos en partes alejadas de la fuente de aporte. En contraposición, una época de sequía haría que el aporte de terrígenos fuera "cortado" y por lo tanto la sedimentación por precipitación química dominaría. Esta ciclicidad de épocas de humedad y sequía ha sido atribuida a diferencias en la posición de la órbita terrestre (ciclos de Milankovitch), ver Fischer et al. (1985).

Los fósiles encontrados en las secciones medidas (*Inoceramus* spp., *Mytiloides* spp., *Anomia* sp. cf. *A. Papyracea*, Amonitas indeterminadas llenas de gasolina y restos de peces incluyendo ejemplares casi completos) y las características litológicas (shales negros, calcáreos, finamente laminados, con alto contenido de materia orgánica, delgados niveles de pirita y concreciones piríticas), permiten interpretar que la facies de la Formación La Frontera fue depositada lentamente en un ambiente marino pobremente oxigenado (disóxico). La distancia de la fuente de

aporte era considerable, pues el tamaño de grano en ningún caso excede al limo.

Los estratos calcáreos no son contínuos de un afloramiento al otro. Si los criterios de correlación que utilizamos son los reales, hay cambios faciales correspondientes a cada intervalo calcáreo, lodoso y condensado.

Correlación gráfica, técnica y criterios.

La técnica de correlación gráfica consiste en colocar dos secciones estratigráficas a 90 grados una de la otra (gráfica X-Y), escoger eventos de significancia temporal en ambas secciones y unir pares de éstos. Después de realizado este ejercicio con varios puntos correlativos, se procede a trazar "al ojo" una línea de regresión, tratando de que el mismo número de puntos correlativos quede debajo y encima de la línea. Para confirmar la validez de la correlación gráfica realizada, los datos obtenidos se someten a un análisis estadístico. La ecuación de la curva y el coeficiente de correlación proporcionan respectivamente, resultados sobre la tasa de sedimentación y el grado de exactitud de la correlación. La pendiente de la recta= 0.82, indica que la acumulación en la sección oriental (eje X), fue mayor que en la sección occidental, corroborando así el análisis facial.

La correlación gráfica es una herramienta poderosa para comparar secciones estratigráficas; ésto ha sido demostrado claramente por su amplia utilización y éxito en los trabajos de exploración

de la compañía petrolera Amoco. Su validez ha sido demostrada también con modelos de computador, ver Edwards (1984).

Lo más crítico de la correlación gráfica es escoger elementos correlativos adecuados. Shaw (1964) propuso esta técnica para correlacionar secciones con fósiles, utilizando la primera y última aparición de cada elemento paleontológico. Barlow (1985), Kauffman (1988), Villamil and Kauffman (1991) y otros autores referenciados en esos artículos, han utilizado elementos de correlación, correspondientes a eventos súbitos. En el presente trabajo, nosotros utilizamos criterios similares que serán expuestos brevemente a continuación.

Eventos de correlación químicos. Incrementos relativos súbitos en la concentración de sílice o de carbonato de calcio en el océano Cretácico, se reflejan en el registro estratigráfico como intervalos de lodolitas silíceas o cherts y como intervalos de calizas o shales altamente calcáreos. El comienzo y la terminación de estos intervalos se pueden asumir coetáneos a casi coetáneos, ya que son el reflejo de cambios oceánicos de carácter regional o global. Los cambios químicos citados están representados por la letra "Q" en la Fig. 1. En la correlación gráfica propuesta, observamos cómo estos eventos químicos correlacionan de manera precisa entre las dos secciones. Estos mismos eventos químicos de incremento en la concentración de sílice, pueden observarse regionalmente *v. gr.* en el Valle Superior del Magdalena (el llamado Grupo Oliní).

Un aspecto de los eventos químicos que se debe considerar es cómo la posibilidad de cambios faciales en niveles coetáneos puede "camuflar" cualquier evento geoquímico determinado. Por ejemplo, un enriquecimiento en sílice produce lodolitas silíceas en facies cercanas a la fuente de aporte y cherts puros en facies alejadas. Un enriquecimiento en carbonatos produce shales calcáreos, concreciones y finalmente micritas al alejarse de la fuente de aporte terrígeno (Gustason y Kauffman, 1985)

Eventos de correlación temporales. Mediante la observación detallada de las secciones medidas, se detectan intervalos litológicos en los que la tasa de deposición fue marcadamente lenta en comparación con el resto de la sección. Estos intervalos se han denominado secciones condensadas (condensación de tiempo). En principio, si la sedimentación en un fondo relativamente cercano a la fuente de aporte es cortada o disminuida, la sedimentación en un fondo aún más lejano se afectaría en mayor escala. Los efectos de condensación causados por cambios en la subsidencia o en el nivel relativo del mar, afectarían ambas localidades correlativas.

En el presente trabajo los autores consideramos un intervalo condensado; asumimos coetáneos o casi coetáneos al comienzo y al final de la condensación (denominados con la letra "T" en la Fig. 1). Las evidencias de condensación en el terreno son las siguientes: en la sección oriental (km 23), el intervalo condensado está representado por 6 metros de calizas con bajo

contenido de shales (sugiriendo deposición química dominante= deposición lenta). En la sección occidental (km 28) este intervalo condensado está representado por la presencia de un gran número de finas capas de pirita autigénica (crecimiento de cristales *insitu*) y una capa de caliza endurecida diagenéticamente luego de su formación, es decir, la capa duró expuesta hasta su consolidación (la evidencia de este endurecimiento es la presencia de "bancos" de *Anomia*, bivalvos que sólo pueden vivir sobre superficies duras (Yonge, 1977; Villamil, 1991)).

Eventos de correlación físicos. Ciertos eventos físicos son coetáneos o casi coetáneos. Una turbidita por ejemplo, debido a su naturaleza de formación súbita, se puede considerar como una superficie de tiempo (línea de tiempo en términos comunes). Las capas de ceniza volcánica y las bentonitas han sido ampliamente utilizadas como superficies coetáneas. En las dos secciones hallamos una bentonita significativa (mide 3 cm en la sección oriental y 4 cm en la occidental); éste es el único evento físico que utilizamos en el presente trabajo y está denominado con la letra "F" en la Fig. 1.

Variaciones faciales e implicaciones paleogeográficas.

Las dos secciones medidas están separadas 3,5 km geográficos (Fig 3); sin embargo la separación paleogeográfica original no se puede obtener sin restaurar la sección estructural Bogotá-Mesitas del Colegio; éste está lejos de los objetivos del

trabajo. El problema básico es que una falla de cabalgamiento hace que la sección se repita 3,5 km geográficos hacia el oriente, y no una repetición debida a replegamiento como afirmaron Cáceres y Etayo (1969). Las rocas de la sección oriental provienen con seguridad de una distancia paleogeográfica mayor a la geográfica. Por lo tanto la variación facial entre las dos localidades es mayor a la esperada.

La variación facial entre las secciones está resumida en la Fig. 4. Lo que se puede observar en términos generales es que la mayoría de los intervalos comprendidos entre dos "líneas de tiempo" se hacen más gruesos hacia el oriente. Los intervalos de calizas y concreciones de la sección oriental (16-22 m) corresponden con intervalos condensados, niveles de pirita y de calizas cementadas diagenéticamente *insitu* de la sección occidental (9-13 m). Las capas ricas en concreciones de la sección oriental (41-43 m) corresponden con la capa de micrita de la sección occidental (29 m); la capa de concreciones pequeñas de la sección oriental (44 m) corresponde con la capa de concreciones gigantes de la sección occidental (31 m); la capa de shale calcáreo de la sección oriental (47 m) corresponde con la micrita de la sección occidental (35 m).

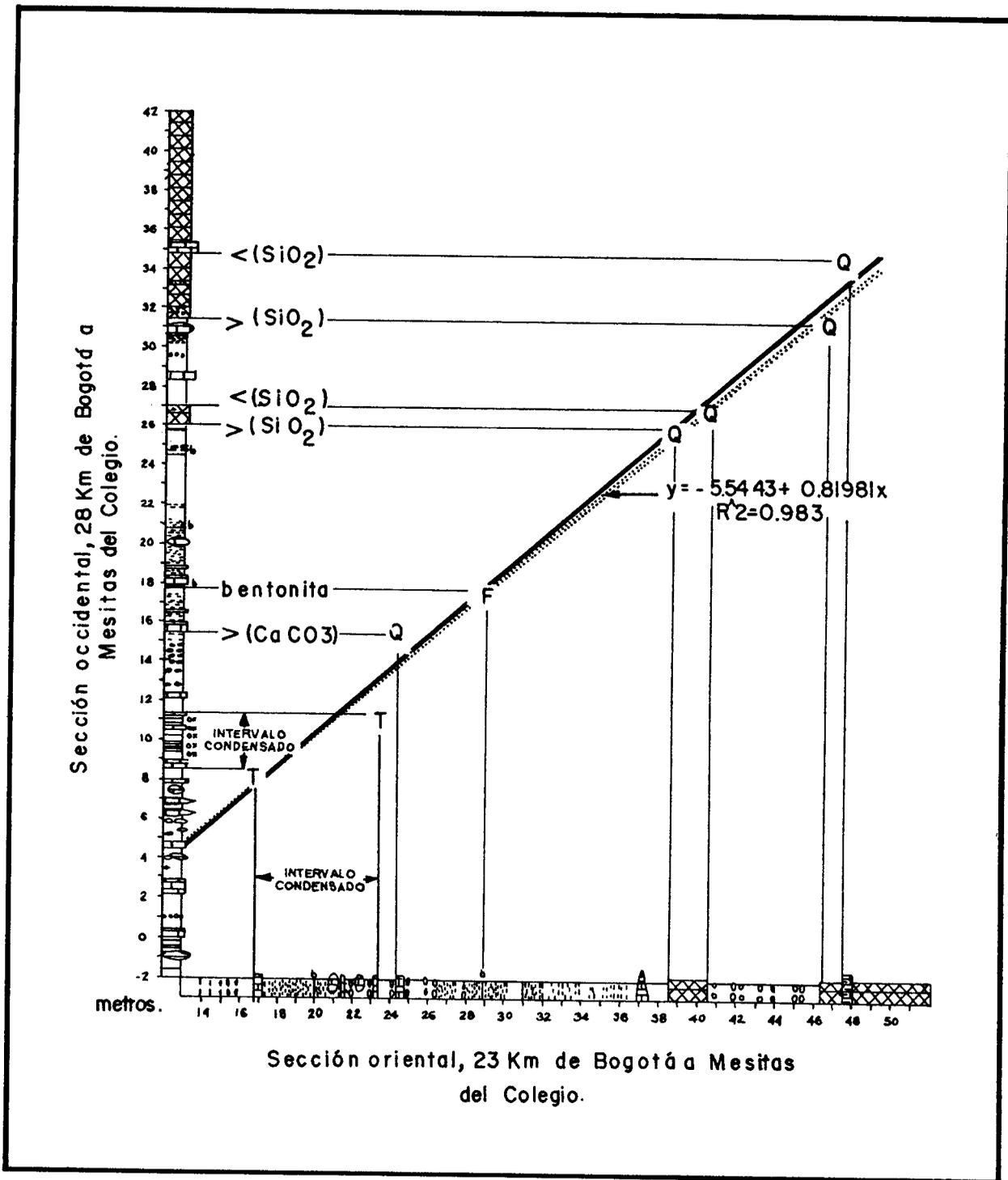


Fig. 1. Correlación gráfica utilizando criterios coetáneos de eventos súbitos. Eje X= columna estratigráfica de la Formación La Frontera en la localidad oriental (km 23, Bogotá-Mesitas del Colegio); eje Y= sección de la misma formación en la localidad occidental (km 28). T= criterios temporales, secciones condensadas; F= criterios físicos; Q= criterios químicos. ox= niveles ricos en pirita autígena, b= bentonitas. Ver texto para más información.

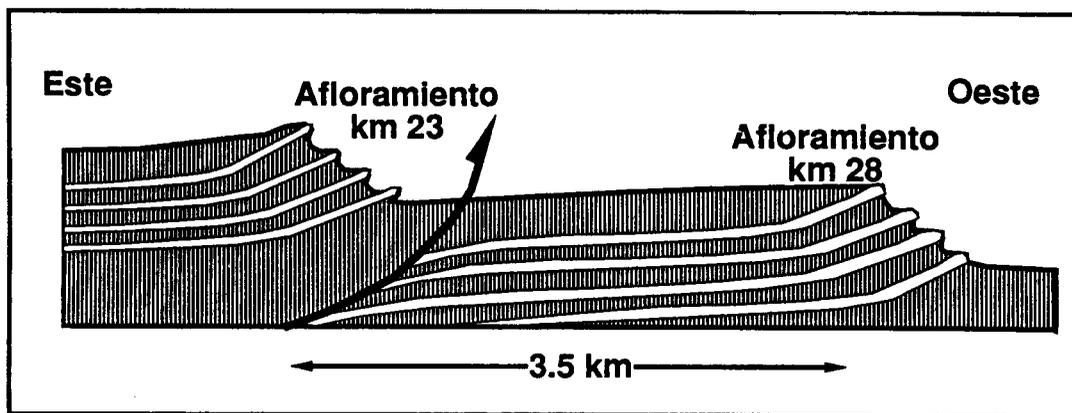


Fig. 3. Corte geológico esquemático que muestra las dos secciones medidas en el trabajo.

finalmente, el primer intervalo de chert se hace más fino hacia el occidente.

La variación facial descrita en el párrafo anterior nos permite interpretar que las rocas de la sección oriental se depositaron más cerca a la fuente de aporte en comparación con las de la sección occidental. Se puede interpretar que la línea de costa estaba hacia el oriente de ambas secciones, corroborando lo propuesto por Etayo et al. (1976); sin embargo no podemos predecir la distancia de la línea de costa Turoniense a Coniaciense.

Conclusiones.

1) El empleo de la técnica de correlación gráfica nos permite llegar a resultados estratigráficos de gran importancia: reconocimiento de facies coetáneas heterópicas (cambios faciales) y de la posición relativa de la fuente de aporte.

Notar como la distancia paleogeográfica entre las dos secciones es necesariamente mayor a la geográfica.

La validez de los resultados obtenidos en este trabajo es bastante alta, la línea de correlación tiene un coeficiente de 0.983, estadísticamente válido.

2) La ciclicidad observada la interpretamos como causada por cambios climáticos (ciclos de Milankovitch); sin embargo es necesario un análisis de tiempo-frecuencia para comprobarlo.

3) Los eventos escogidos para la correlación gráfica fueron considerados como coetáneos y proponemos que se pueden seguir utilizando en trabajos similares.

4) Las facies de la sección oriental (km 23, Bogotá-Mesitas del Colegio) fueron depositadas relativamente cerca a la fuente de aporte de sedimentos en comparación con las facies de la sección occidental (km 28). La línea de costa, por lo tanto, estaba localizada al oriente de ambas secciones.

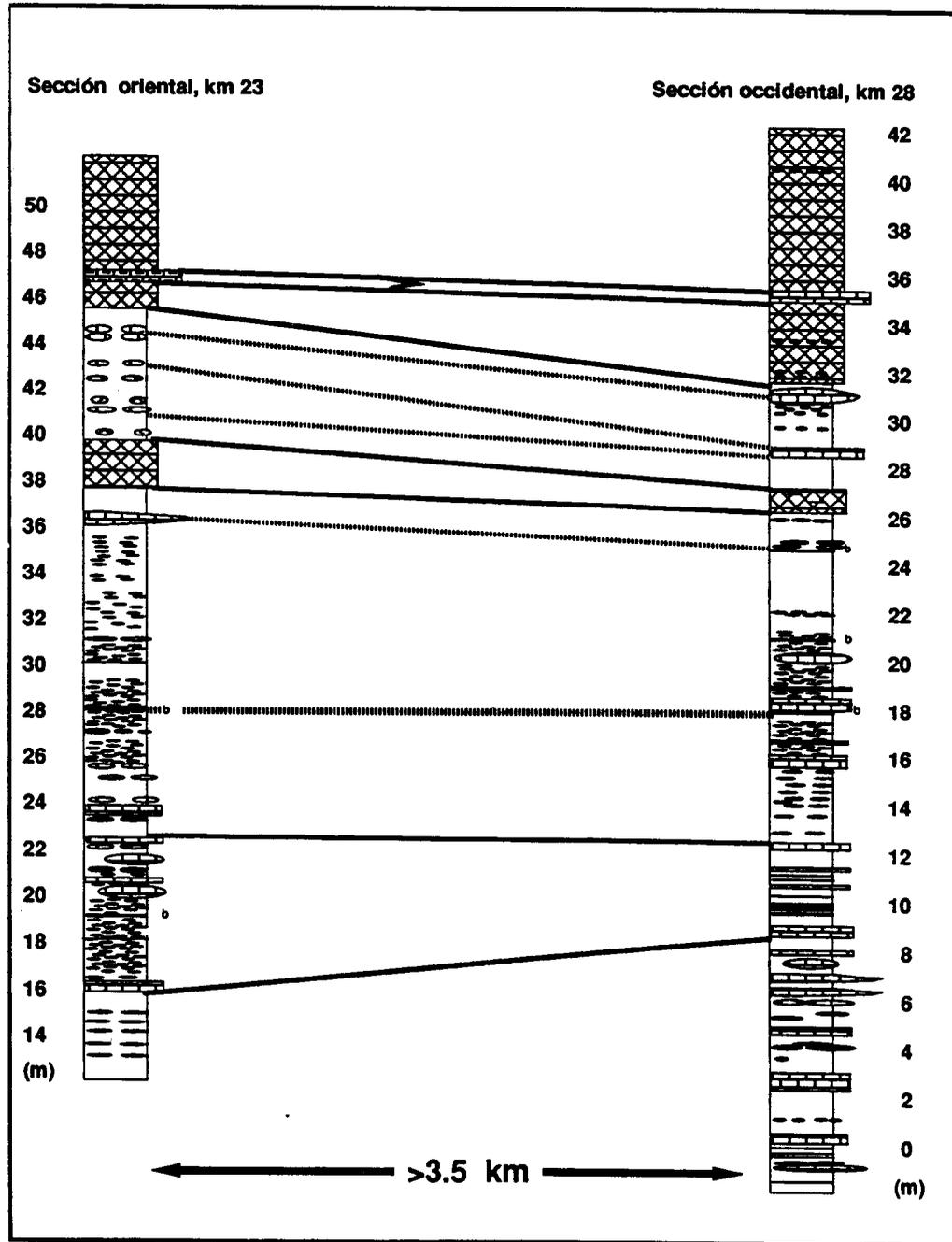


Fig. 4. Correlación y cambios de facies entre las dos secciones estudiadas, ver texto para explicación y discusión.

Para concluir, recalcamos la importancia del trabajo de terreno detallado; sin éste no se pueden realizar experimentos geológicos de comparación estratigráfica y de significancia estadística.

Agradecimientos.

El Profesor Alvaro Villamil leyó el trabajo con sumo cuidado e hizo sugerencias positivas.

Referencias.

- Barlow, L. K. 1985. Event Stratigraphy, paleoenvironments and petroleum source rock potential of the lower Niobrara Formation (Cretaceous), north Front Range, Colorado. MS Thesis UC Boulder, 288 p.
- Barron, E. J., Arthur, M. A., y Kauffman, E. G. 1985. Cretaceous rhythmic bedding sequences-- A plausible link between orbital variations and climate. *Earth and Pl. Sci. Letters*, 72, pp. 327-340.
- Cáceres, C. y Etayo-Serna, F. 1969. Bosquejo Geológico de la región del Tequendama. Opúsculo guía de la Excursión Pre-Congreso. 1er. Congreso Colombiano de Geología, pp. 1-23.
- Edwards, L. E. 1984. Insights of why graphic correlation (Shaw's method) works. *Journal of Geology* 92, pp. 583-597.
- Etayo-Serna, F., Renzoni, G. y Barrero, D. 1976. Contornos Sucesivos del Mar Cretáceo en Colombia. *In Memoria del Primer Congreso Colombiano de Geología 1969*, pp. 217-253.
- Fischer, A. G., Herbert, T. and Premoli-Silva, I. 1985. Carbonate Bedding Cycles in Cretaceous Pelagic and Hemipelagic Sequences. *In Pratt, L. M., Kauffman, E. G., and Zelt, F. B. Fine-Grained Deposits and Biofacies of the Cretaceous Western Interior Seaway: evidence of Cyclic Sedimentary Processes. SEPM Second Annual Midyear Meeting, Field Trip No. 4.*
- Gustason, G. R. and Kauffman, E. G. 1985. The Dakota Group and the Kiowa-Skull Creek Cyclothem in the Canon City-Pueblo Area, Colorado. *In Pratt, L. M., Kauffman, E. G., and Zelt, F. B. Fine-Grained Deposits and Biofacies of the Cretaceous Western Interior Seaway: evidence of Cyclic Sedimentary Processes. SEPM Second Annual Midyear Meeting, Field Trip No. 4*, pp. IV-XI. pp. 72-89.
- Kauffman, E. G. 1985. Introduction. *In Pratt, L. M., Kauffman, E. G., and Zelt, F. B. Fine-Grained Deposits and Biofacies of the Cretaceous Western Interior Seaway: evidence of Cyclic Sedimentary Processes. SEPM Second Annual Midyear Meeting, Field Trip No. 4*, pp. IV-XI.
- Kauffman, E. G. 1988. Concepts and Methods of High-Resolution Event Stratigraphy. *Ann. Rev. Earth and Planet. Sci.* v. 16, pp. 605-654.
- Shaw, A. B. 1964. *Time in Stratigraphy*. Mc Graw-Hill, 246
- Vail, P. R., Mitchum, R. M., and Thompson III, S. 1977. Seismic Stratigraphy and Global Changes of Sea Level, part 3: relative changes of sea level from coastal onlap, *In Payton, C. W., ed., Seismic Stratigraphy Applications to Hydrocarbon Exploration. AAPG Memoir 26*, pp. 63-97.
- Van Wagoner, C., Mitchum, R. M., Campion, K. M. and Rahmanian, V. D. 1991. Siliclastic Sequence Stratigraphy in Well Logs, Cores, and Outcrops. *AAPG Methods in Exploration Series, No. 7*, 55 p.
- Villamil, T. 1991. Paleocological analysis of *Anomia*, high abundance intervals and contrasts between mass mortality events and event communities. *In Mns.*, 38 ms pp.
- Villamil, T. and Kauffman, E. G. 1991. The Cenomanian-Turonian boundary in Colombia. *In Cenomanian-Turonian Meeting, Grenoble, France. Memoirs.*
- Yonge, C. M. 1977. Form and Evolution in the Anomiacea (Mollusca, Bivalvia). *R. Soc. London, Phyllos Trans., Series B 276 p.*