

Los Microfósiles como Herramientas de Correlación Estratigráfica en Exploración Petrolera

José ■ Ignacio ■ Martínez

Las técnicas de Correlación Gráfica y “Ordenamiento y Escala” se destacan como herramientas de correlación estratigráfica cuantitativa. Estas técnicas permiten la visualización de información biostratigráfica, la elaboración de bases de datos biostratigráficos, la determinación de velocidades de acumulación y hiatos deposicionales. Con estos métodos también es posible determinar velocidades relativas de subsidencia y la postulación de escalas del tiempo geológico de carácter cuantitativo.

1. INTRODUCCIÓN

La Micropaleontología se ocupa del estudio de los microfósiles, de su distribución

José Ignacio Martínez R. Profesor del Departamento de Geología, Universidad EAFIT.

geográfica, de su evolución a través del tiempo geológico, y de los controles paleo-ambientales que determinan dicha distribución. Bajo el término de microfósiles se incluyen diversos grupos de organismos microscópicos poseedores de esqueletos fosilizables, -de composición calcárea, silicea, orgánica o quitinosa-, o partes de macro-organismos cuyo estudio requiere del uso del microscopio. En este agrupamiento arbitrario, -y utilitario, se incluyen organismos tan diversos como foraminíferos y radiolarios (Protistas), conodontes (partes de organismos Cordados), y granos de polen (Gymnospermas), entre muchos otros. La Micropaleontología como sub-disciplina de la Paleontología se desarrolló aceleradamente al lado de la exploración petrolera a principios del siglo. Tal desarrollo obedeció a la necesidad de datar y correlacionar con precisión las rocas sedimentarias atravesadas por los pozos exploratorios. Para tales efectos, los microfósiles abundantes de amplia distribución geográfica y de rápida evolución resultaron particularmente útiles.

Hasta los años 60, la Micropaleontología se ocupó fundamentalmente de la descripción sistemática de microfósiles (taxonomía y sistemática), de su distribución temporal (Bioestratigrafía), y de su distribución geográfica (Biogeografía). Los esfuerzos en bioestratigrafía se concentraron en la determinación de zonas, de carácter regional y global, cuya distribución cronoestratigráfica se ha usado para correlacionar secciones

estratigráficas o pozos exploratorios. Las zonificaciones bioestratigráficas alcanzan resoluciones cronoestratigráficas que varían entre 1 y 10 ma (millones de años; Emery and Myers: 1996); aunque en algunos casos se logran resoluciones que alcanzan los cientos de miles de años (e.g. durante el período Cuaternario).

Durante la década de los 70, la estratigrafía experimentó un vertiginoso desarrollo con la investigaciones de Vail y el equipo de Exxon (Vail et al., 1977) sobre estratigrafía sísmica. Tal desarrollo se vio culminado con los avances de la estratigrafía secuencial en los años 80 (e.g. Wilgus et al.: 1988). Mientras tanto

muchos paleontólogos continuaban dedicados al establecimiento de zonificaciones bioestratigráficas de carácter cualitativo. Tales esfuerzos sirvieron para depurar esquemas bioestratigráficos globales que han servido como herra-

Las técnicas de Correlación Gráfica y "Ordenamiento y Escala" se destacan como herramientas de correlación estratigráfica cuantitativa. Estas técnicas permiten la visualización de información bioestratigráfica, la elaboración de bases de datos bioestratigráficos, la determinación de velocidades de acumulación y hitos deposicionales.

mientas de correlación intercontinental (e.g. Berggren et al.: 1985). En estudios regionales, sin embargo, tanto la aplicación de esquemas globales como regionales muchas veces han dado una resolución inferior a la requerida en estudios de estratigrafía secuencial y por lo tanto su utilidad ha sido limitada.

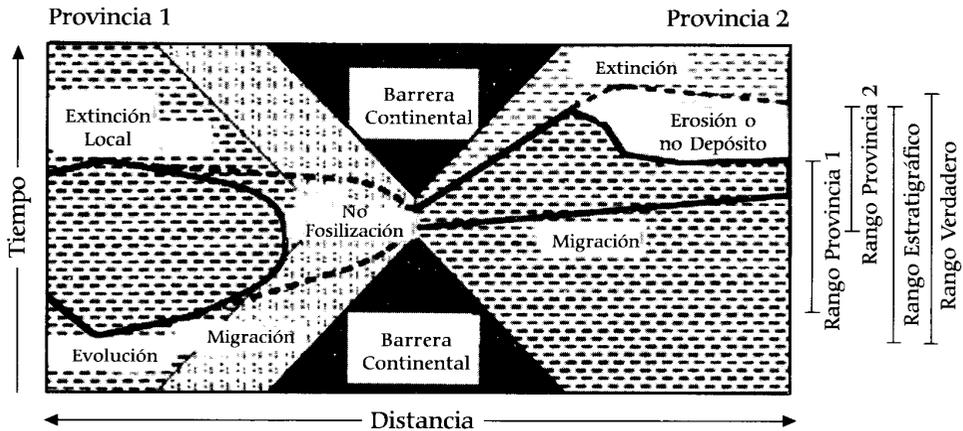
El supuesto de que la primera (FO, *first occurrence*) o última ocurrencia (LO, *last occurrence*) de una especie en el registro sedimentario, o la base o techo de una zona bioestratigráfica represente líneas de tiempo solo es válido dentro un margen de error que

algunas veces puede ser considerable. Tal limitación obedece a controles paleobiológicos y biogeográficos que afectan la distribución tiempo-espacio de las especies. La **Figura 1** ilustra el caso de una especie hipotética cuyos rangos estratigráficos difieren marcadamente en dos provincias biogeográficas debido a mecanismos de migración, preservación, erosión, control paleoambiental, etc. Aunque

se trata de un ejemplo hipotético, todas las especies tanto animales como vegetales son afectadas por los mismos mecanismos y en un esquema multi-especies análogo al ilustrado en la **Figura 1**, son comunes los cruces, en el espacio-tiempo, entre eventos bioestratigráficos, i.e. los eventos de FO y LO de cada especie paleontológica son heterócronos en alguna medida (e.g. Martínez, 1989).

FIGURA 1

Distribución hipotética de una especie en el espacio-tiempo. Note los diferentes rangos estratigráficos de la especie en las dos provincias geológicas. La especie se originó en la Provincia 1 y se extinguió en la Provincia 2. La exclusión de la especie en regiones de cada provincia se debe a efectos de erosión, no depositación o fosilización (modificada de Mann y Lane, 1995).



Dentro de los varios intentos por desarrollar métodos de correlación cuantitativa (para una revisión parcial véase a Tipper, 1988) en los que se controle o cuantifique la incertidumbre en la posición de los eventos bioestratigráficos en el tiempo geológico, se destacan dos técnicas: la Correlación Gráfica, y el "Ordenamiento y Escala" (*Ranking and Scaling*, RASC). Son objetivos de este artículo la introducción de estas dos técnicas mediante: (1) una breve discusión de sus principios, (2) ejemplos de aplicación, y (3) orientación bibliográfica para el lector interesado.

2. CORRELACIÓN GRÁFICA

2.1 PRINCIPIOS

El método de Correlación Gráfica fue propuesto por Alan Shaw (Shaw, 1964). Sin embargo su aplicación fue ignorada por la mayoría de paleontólogos, con excepción de la

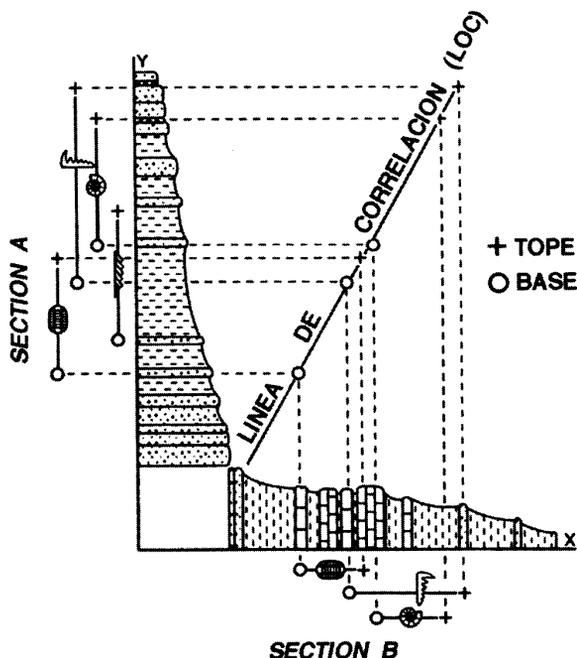
compañía Amoco que lo mantuvo dentro de la confidencialidad y lo estableció como su método estándar de manejo de bases de datos paleontológicos y como herramienta de correlación estratigráfica. Las publicaciones de Miller (1977) y Edwards (1984; 1989) son de destacar por el rescate de la técnica hasta su forma presente.

Bajo el término de microfósiles se incluyen diversos grupos de organismos microscópicos poseedores de esqueletos fosilizables, -de composición calcárea, silíceo, orgánica o quitinosa-, o partes de macro-organismos cuyo estudio requiere del uso del microscopio. En este agrupamiento arbitrario, -y utilitario-, se incluyen organismos tan diversos como foraminíferos y radiolarios (Protistas), conodontes (partes de organismos Cordados), y granos de polen (Gymnospermas), entre muchos otros.

El método de Correlación Gráfica consiste en comparar los eventos bioestratigráficos comunes de dos secciones estratigráficas dispuestas en una gráfica X-Y (Figura 2). Es decir la conexión de la primera y última ocurrencia estratigráfica de una especie común en las dos secciones, o su primera (FO) y última ocurrencia (LO) respectivamente. En el caso mas simple, cuando dos secciones son iguales, la conexión de la base y tope de todas las especies en las dos secciones se agrupa en una línea recta con una pendiente de 45°. A esta línea se llama la línea de correlación (o LOC, *line of correlation*, Figura 2). Variaciones relativas en la velocidad de acumulación de los sedimentos, hiatos deposicionales, variaciones faciales, retrabajamiento de especies, preservación diferencial, etc. dan como resultado un número de patrones en la LOC que se resumen en la Figura 3. En esta forma

FIGURA 2

Correlación Gráfica de dos secciones estratigráficas A y B. Note que la línea de correlación (LOC) conecta la primera (FO) y última ocurrencia (LO) de las especies comunes a las dos secciones (modificado de Mann y Lane, 1995).



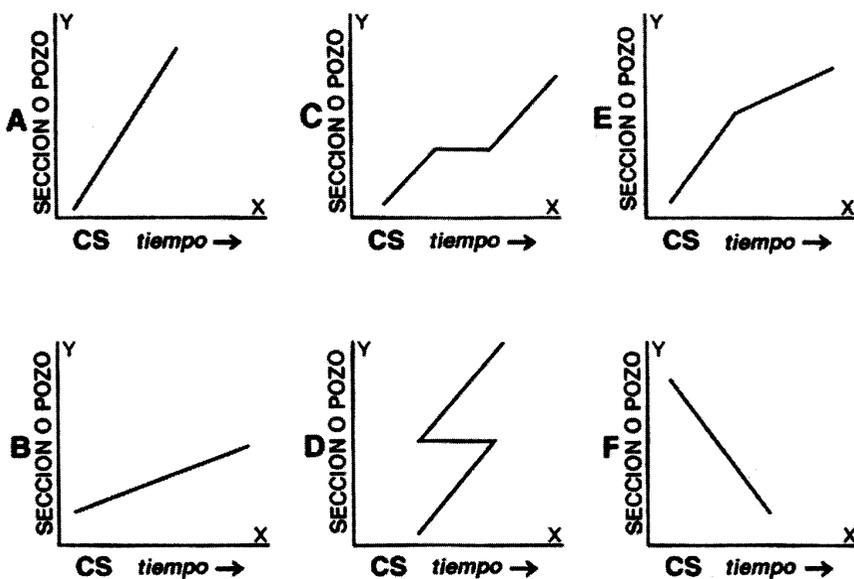
elemental de análisis, el método de Correlación Gráfica provee la siguiente información sobre las dos secciones estratigráficas comparadas, así:

1. Resume gráficamente su contenido micro-paleontológico.
2. Permite visualizar diferencias relativas en las velocidades de acumulación de la roca.
3. Permite determinar hiatos deposicionales y secciones condensadas.
4. Permite la postulación de hipótesis sobre posible retrabajamiento (*re-working*) y caída de material (*caving*) para los eventos de primera (FO) y última ocurrencia (LO) que no caen dentro de la línea de correlación

(LOC). En situaciones reales, la posición de las primeras (FO) y últimas ocurrencias (LO) aparecen como una nube de puntos en la que el trazo de la LOC requiere de la aplicación de ciertos criterios resumidos en MacLeod y Sadler (1995).

FIGURA 3

Algunos patrones de la línea de correlación (LOC) y su interpretación. Se compara una sección estratigráfica o pozo Y (espesor en metros o pies) con la estándar compuesta (CS, unidades de tiempo) para la cuenca: (a) la LOC representa una velocidad lenta de acumulación en la sección Y, (b) la LOC representa una velocidad rápida de acumulación en la sección Y, (c) la terraza en la LOC representa un hiato deposicional, falla o sección condensada en la sección Y, (d) la terraza en la LOC representa una falla inversa, (e) la LOC representa una falla normal en una cuenca de expansión, y (f) la LOC representa una sección estratigráfica invertida (tomado de Lane y Mann, 1995).



2.2 EL ESTÁNDAR COMPUESTO (O CS, COMPOSITE STANDARD)

La siguiente etapa en el desarrollo de la técnica consiste en resumir la información bioestratigráfica de muchas secciones de una cuenca sedimentaria en una sola gráfica. Esto, por convención, se consigue al proyectar los eventos bioestratigráficos de la sección dispuesta en el eje X sobre la sección Y que recibirá el nombre de Estándar Compuesto o CS (*composite standard*). El nuevo CS se

compara con nuevas secciones hasta obtener un CS que resuma la información bioestratigráfica de la cuenca. En este proceso la escala del CS se torna en una escala de tiempo relativa en unidades compuestas (*composite units*) que mediante calibración adecuada con los esquemas biocronoestratigráficos globales permite su uso como herramienta cronoestratigráfica. El CS constituye también una excelente base de datos bioestratigráficos cuyo producto final es la determinación de los rangos estratigráficos máximos (o

globales) de cada una de las especies. Es por esto por lo que el método de Correlación Gráfica es considerado como determinístico. Para detalles sobre la construcción del CS véase a Edwards (1984) y Carney y Pierce (1995).

De la construcción del CS, se obtiene la siguiente información adicional:

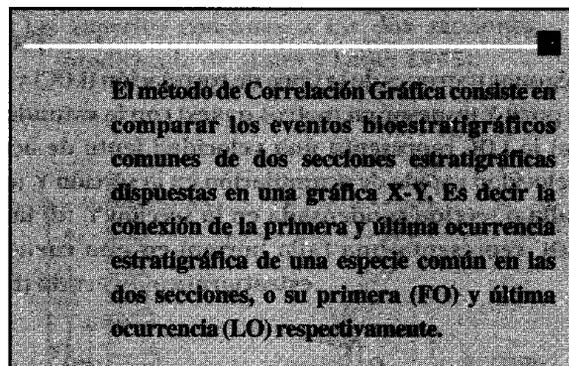
1. El control cronoestratigráfico de la sección desconocida.
2. La correlación de secciones estratigráficas que usan unidades compuestas (CSU, *composite standard units*).
3. La elaboración de una base de datos bioestratigráficos para una cuenca o región.
4. La determinación de velocidades de acumulación de las rocas; que no deben ser confundidas con las velocidades de acumulación de los sedimentos. Estas últimas medidas se derivan de la aplicación de correcciones del espesor por decompacción.

2.3 CORRELACIÓN GRÁFICA Y ESTRATIGRAFIA SECUENCIAL

La determinación de hiatos deposicionales y secciones condensadas por el método de Correlación Gráfica ha permitido el amarre de la información bioestratigráfica con la estratigrafía secuencial. La Correlación Gráfica permite la formulación de hipótesis sobre patrones de sedimentación que pueden ser evaluados frente a modelos de estratigrafía secuencial.

Se debe enfatizar que el método no es una "caja negra" sino más bien, un método interactivo donde el paleontólogo pone a prueba hipótesis en las que rechaza información que contenga ruido estadístico. Es el conocimiento

paleobiológico también el que permite que las hipótesis sean factibles dentro de los modelos secuenciales (Figura 4).



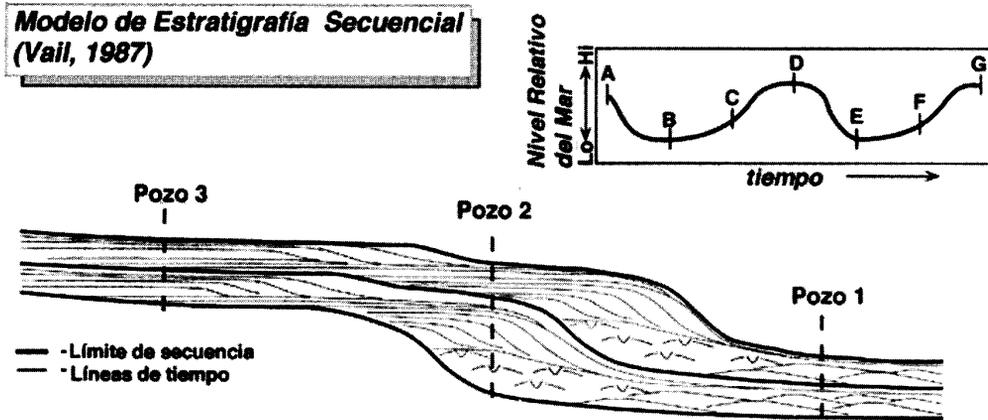
2.4 OTRAS APLICACIONES

Es evidente que no sólo es posible comparar eventos bioestratigráficos sino también todo evento geológico único en las dos secciones y del que se presume existe isocronismo. De estos eventos, las capas de ceniza volcánica son las más confiables, pero cualquier otro evento como fondos duros (*hard grounds*), acumulaciones de minerales autigénicos como glauconita o fosfatos, capas de chert, etc. sirven para los mismos propósitos. Señales geoquímicas como picos en el registro gamma (GR), picos en el contenido de iridio, CaCO_3 , etc también son de uso potencial, y permiten enriquecer substancialmente la resolución estratigráfica de una cuenca sedimentaria (e.g. Edwards, 1989).

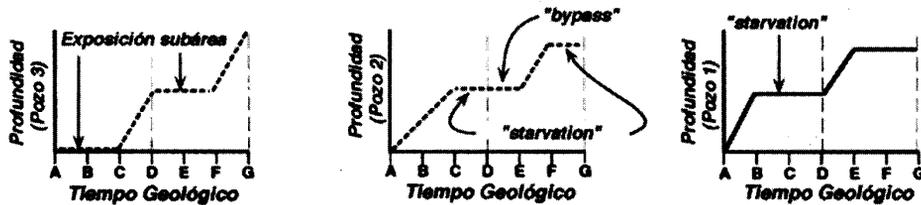
Shaw (1964) exploró el uso de las velocidades de acumulación de la roca en la elaboración de mapas de subsidencia relativa. Esta aplicación ha tenido su máximo desarrollo en la exploración del carbón y en el análisis de cuencas, constituyéndose en una poderosa herramienta predictiva (Edwards, 1988).

FIGURA 4

Interpretación de terrazas en la LOC y estratigrafía secuencial. Las terrazas en el Pozo 3 representan exposición subaérea (valles incisos). En el Pozo 2 hay paso de sedimentos (*bypass*) y ausencia de sedimentación (*starvation*). En el Pozo 1 solo hay *starvation*. Note la diferencias cronológicas de las terrazas en los tres pozos y la correspondencia de las terrazas con los límites de secuencias (modificado de Mann y Lane, 1995).



Interpretación, Correlación Gráfica



Tiempo Geológico = Unidades Estándar Compuestas (CSU)
 ----- Línea de Correlación (LOC)

3. "ORDENAMIENTO Y ESCALA" (RASC)

A diferencia del método de Correlación Gráfica, el método de RASC es probabilístico y para su desarrollo se ha requerido de un intenso trabajo computacional. La técnica fue desarrollada en Canadá por Frederick Agterberg y Félix Gradstein en los años 80 (para resúmenes véase a Gradstein et al., 1985

y Agterberg y Gradstein, 1988), pero sólo recientemente su difusión se ha hecho extensa (e.g. Agterberg, 1990).

El método de RASC consiste en la elaboración de una secuencia óptima de eventos bioestratigráficos (*scaled optimum sequence*) en una cuenca sedimentaria. La secuencia óptima escalada se obtiene a partir de cartas de dispersión bioestratigráfica de tantas secciones

o pozos como sea posible en la cuenca, y usando el programa RASC que ordena los eventos en el tiempo ("ranking") y escala su distancia relativa ("scaling"). Una vez se compara la información bioestratigráfica de una sección o pozo con la secuencia óptima escalada, la desviación en la posición estratigráfica de un evento con respecto a la secuencia óptima escalada puede ser interpretada como el resultado de exclusión ecológica, caída de material del pozo (*caving*), retrabajamiento, etc. La **Figura 5** ilustra el ejemplo de la secuencia óptima escalada del Valle Inferior del Magdalena obtenida a partir de los eventos de última ocurrencia (LO) de las especies de foraminíferos planctónicos de 18 pozos (Martínez, 1995).

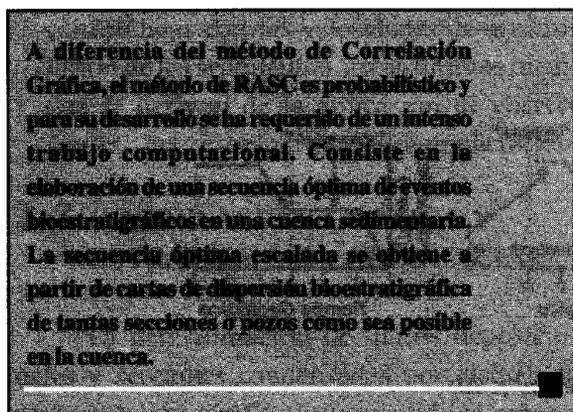
Caracoli-1 y Media Luna-1 del Valle Inferior del Magdalena. Para detalles sobre el método de RASC el lector es referido a las publicaciones de Agterberg y Gradstein (e.g. Agterberg y Gradstein, 1988; Agterberg, 1990), y para detalles sobre la aplicación del método de RASC en el Valle Inferior del Magdalena el lector es referido al trabajo de Martínez (1995).

A diferencia del método de Correlación Gráfica, en el método de RASC los hiatos deposicionales no son señalados específicamente, aunque los eventos que delimitan las zonas bioestratigráficas generalmente corresponden con límites de la estratigrafía secuencial, e.g. el evento 50 corresponde a un límite de secuencia en los pozos Caracoli-1 y Media Luna-1 (**Figura 6**). La comparación de los dos métodos en el Valle Inferior del Magdalena está en progreso por parte del autor.

Como extensión del método de RASC, se desarrolló el método de CASC ("*correlación and scaling in time*") cuyo objeto es la correlación de secciones o pozos y el análisis de cuencas. El método de CASC hace uso de los principios de Correlación Gráfica; sin embargo, la línea de correlación es trazada usando métodos estadísticos, e.g. "*spline fitting*" y "*Jackknife*". Este método ha permitido la postulación de una nueva escala del tiempo geológico (Gradstein y Ogg, 1996).

4. CONCLUSIONES

Los métodos de Correlación Gráfica y RASC tienen las siguientes ventajas sobre los métodos tradicionales:



El siguiente paso en el método de RASC es la correlación cuantitativa de pozos. Para tales efectos, se usan los eventos bioestratigráficos que limitan las zonas, como elementos de correlación (números en la columna 1 de la **Figura 5**; e.g. 19, 8, 15 etc.). La posición de tales eventos en un pozo en particular se obtiene mediante una gráfica X-Y donde se proyectan los eventos de la escala óptima escalada sobre el pozo en cuestión. La **Figura 6** ilustra la correlación entre los pozos

1. Resumen gráficamente el contenido biostratigráfico de pozos o secciones de campo y permiten visualizar diferencias relativas en las velocidades de acumulación de la roca, y de hiatos deposicionales y secciones condensadas. En el caso de la Correlación Gráfica es posible la postulación de hipótesis sobre retrabajamiento y caída de material de pozo.

2. Permiten un control cronoestratigráfico cuantitativo libre de los prejuicios del investigador paleontólogo, y la postulación de escalas del tiempo geológico de carácter cuantitativo.

3. Son ideales para la elaboración de bases de datos bioestratigráficos para una cuenca o región.

FIGURA 5

Secuencia óptima escalada basada en la última ocurrencia (LO) de foraminíferos planctónicos de 18 pozos del Valle Inferior del Magdalena según el método del RASC. Las áreas sombreadas en el dendrograma representan la última ocurrencia (LO) de las especies que tienen la mayor probabilidad de ocurrir próximas en el tiempo. Para detalles adicionales véase a Martínez (1995).

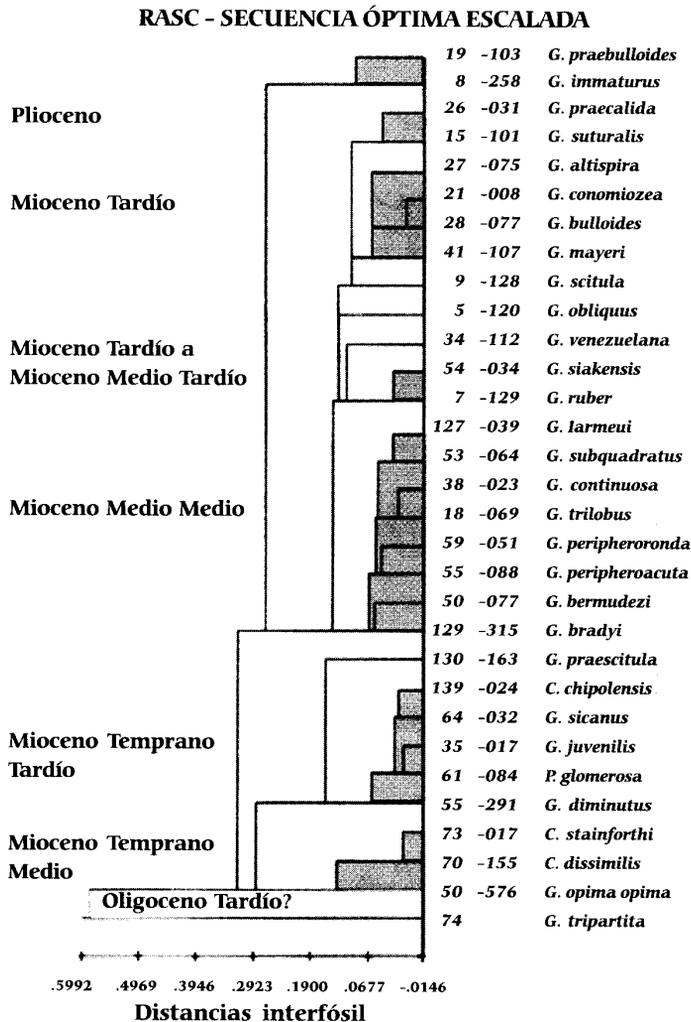
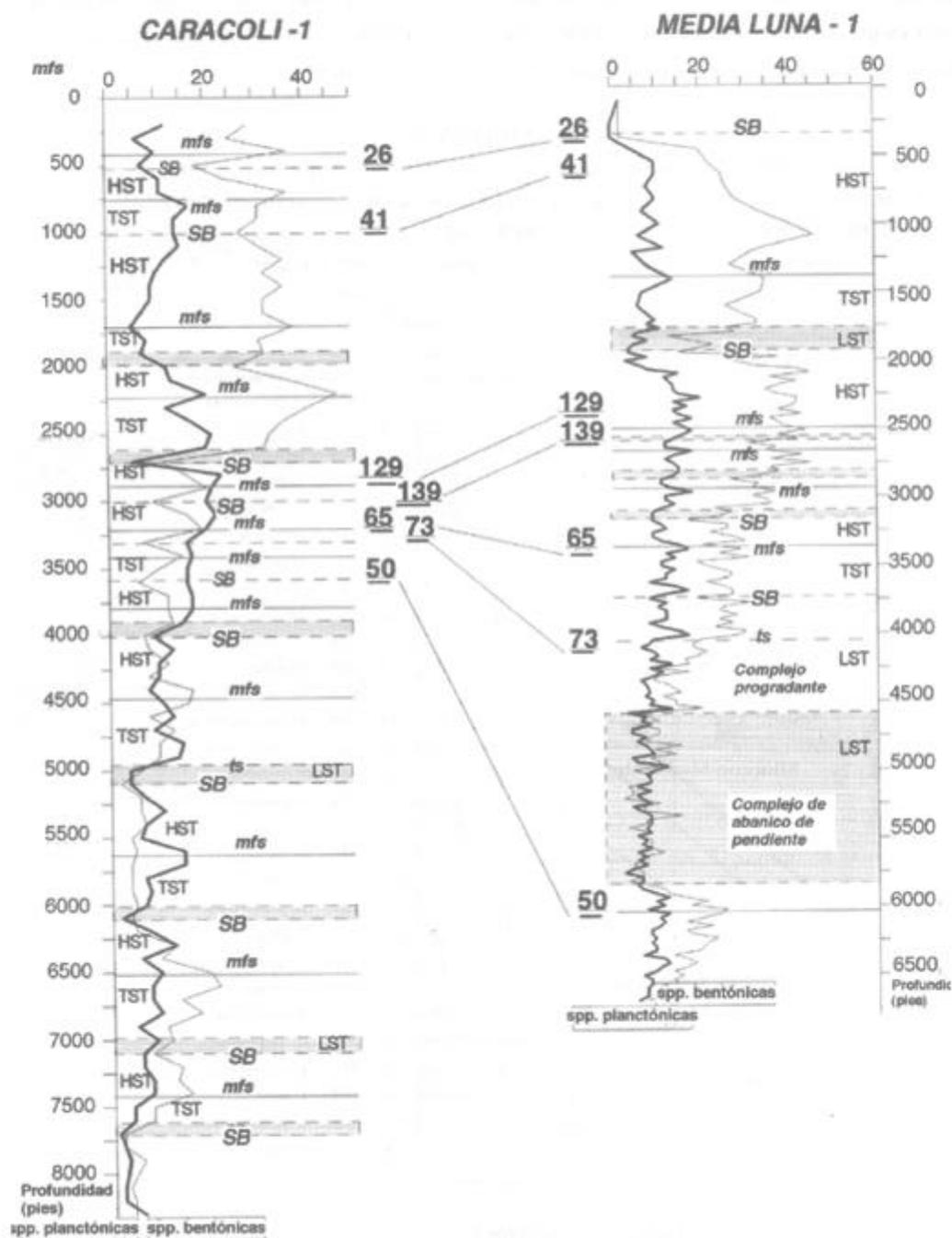


FIGURA 6

Estratigrafía secuencial y correlación cuantitativa (RASC) de los pozos Caracoli-1 y Media Luna-1 del Valle Inferior del Magdalena. Los eventos bioestratigráficos (números en negrilla) comunes a los dos pozos fueron tomados de la Fig. 5. System tracts: HST = highstand, TST = transgressive, LST = lowstand, SB = límite de secuencia, ts = superficie transgresiva. Para detalles adicionales véase a Martínez (1995).



REFERENCIAS

- Agterberg, F.P. (1990). Automated Stratigraphic Correlation. Elsevier. *Developments in Palaeontology and Stratigraphy*, 13, 1-423.
- Agterberg, F. P., y Gradstein, F. M. (1988). Recent developments in quantitative stratigraphy. *Earth Science Reviews*, 25(1):1-73.
- Berggren, W. A., Kent, D. y Van Couvering, J.A. (1985). Neogene geochronology and chronostratigraphy. *Geological Society of London, Memoir*, 10:211-260.
- Carney, J. L., y Pierce, R. W. (1995). Graphic correlation and composite standard databases as tools for the exploration biostratigrapher. En: *Graphic Correlation* (K.O. Mann y H. R. Lane, eds.), SEPM Society for Sedimentary Geology, Spec. Publ. 53:23-43.
- Edwards, L.E. (1984). Insights on why graphic correlation (Shaw's method) works. *Journal of Geology*, 92:583-597.
- Edwards, L.E. (1989). Supplemented graphic correlation: a powerful tool for paleontologists and nonpaleontologists. *Palaios*, 4:127-143.
- Emery, D., y Myers, K.J. (1996). *Sequence Stratigraphy*. Blackwell Science, 297 pp.
- Gradstein, F.M., y Agterberg, F.P., Brower, J.C., y Schwarzacher, W.S. (1985). *Quantitative Stratigraphy*. Unesco, Paris, y Reidel, Dordrecht, 598 pp.
- Gradstein, F.M., y Ogg, J.G., (1996). A Phanerozoic Time Scale. *Episodes*, 19 (1-2).
- MacLeod, N., y Sadler, P. (1995). Estimating the line of correlation. En: *Graphic Correlation* (K.O. Mann y H. R. Lane, eds.), SEPM Society for Sedimentary Geology, Spec. Publ. 53:51-64.
- Martínez, J.I. (1989). Stratigraphic mensuration, order and homotaxy. *Lethaia*, 22(1):59-60.
- Martinez, J.I. (1995). Biostratigraphic re-assessment of the Cenozoic Lower Magdalena Valley. VI Congreso Colombiano del Petróleo, Memoria, Bogotá.
- Miller, F.X. (1977). The graphic correlation method in biostratigraphy. En: *Concepts and Methods of Biostratigraphy* (E. G. Kauffman y J. E. Hazel, eds.), Hutchinson and Ross, p. 165-186.
- Nemec, W. (1988). Coal Correlation in intrabasinal subsidence: A new analytical perspective. En: *New Perspectives in Basin Analysis* (K. L. Kleinspehn y C. Paola, eds.), Springer-Verlag, 453 pp.
- Shaw, A.B. (1964). *Time in Stratigraphy*. McGraw-Hill, 365 pp.
- Tipper, J.C. (1988). Techniques for quantitative stratigraphic correlation: a review and annotated bibliography. *Geological Magazine*, 125:475-494.
- Vail, P.R., Mitchum, R.M., Jr., Todd, R.G., Widmier, J.M., Thompson, S., III, Sangree, J.B., Bubb, J.N., y Hatleid, W.G. (1977). Seismic stratigraphy and global changes in sea level. En: *Seismic Stratigraphy - Applications to hydrocarbon exploration* (C.E. Payton, ed.). American Association of Petroleum Geologists, *Memoir* 26:49-62.
- Wilgus, C.K., Hastings, B.S., Kendall, C.G. St. C., Posamentier, H.W., Ross, C.A., y Van Wagoner, J.C., (eds.). (1988). *Sea Level Changes: An Integrated Approach*, Society for Sedimentary Geology, SEPM Special Publ. 42, 407 pp.