



Sobre la Utilización del Análisis de Fourier, Análisis Espectral Singular y Redes Neuronales Artificiales en Estratigrafía. Parte 2: Metodologías de Análisis Espectral en las Formaciones Tablazo – Simití, sección Sáchica (Boyacá), Colombia

On the Use of Fourier analysis, Singular Spectral Analysis and Artificial Neural Networks in Stratigraphy. Part 2: Methodological Spectral Analysis in the Tablazo - Simití Formations, Sáchica section (Boyacá), Colombia

OSCAR JAVIER GARCÍA – CABREJO¹

GIOVANNI MORENO-SÁNCHEZ²

¹Departamento de Geociencias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

E-mail: oscar.garcia@gmail.com

²Departamento de Geociencias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

Instituto Colombiano de Geología y Minería – INGEOMINAS

E-mail: gmorenos@unal.edu.co, gmoreno@ingominas.gov.co

GARCÍA-CABREJO, O. & MORENO-SÁNCHEZ, G. (2006): Sobre la Utilización del Análisis de Fourier, Análisis Espectral Singular y Redes Neuronales Artificiales en Estratigrafía. Parte 2: Metodologías de Análisis Espectral en las Formaciones Tablazo – Simití, sección Sáchica (Boyacá), Colombia.- GEOLOGÍA COLOMBIANA, 31, pp. 121-130, 12 Figs., Bogotá.

RESUMEN

En este trabajo se presentan los resultados de la aplicación del Análisis de Fourier, Análisis Espectral Singular Tradicional y Neuronal, y Redes Neuronales Artificiales para el análisis de información estratigráfica en una sección perteneciente a las formaciones Tablazo y Simití en cercanías del municipio de Sáchica, Boyacá, Colombia. Los resultados obtenidos indican que la combinación de Redes Neuronales de tipo Hebbiano y el Clasificador de Señal Múltiple permiten discriminar ciclos que no detectan tanto el Análisis de Fourier como el Análisis Espectral Singular. Los ciclos detectados en la sección estudiada corresponden a espesores de 50.00m, 27.03m, 19.61m, 14.29m, 10.00m y 5.98m. A partir del análisis de la información colectada los ciclos de 50.00m, 19.61m y el de 5.98m se interpretan como resultado de la acción de los parámetros orbitales de Milankovitch correspondientes a excentricidad larga, excentricidad corta y oblicuidad respectivamente.

Palabras Clave: *análisis espectral singular, análisis de Fourier, estratigrafía, redes neuronales artificiales, Tablazo – Simití.*

ABSTRACT

This paper deals with the application of Fourier Analysis, Traditional and Neural Singular Spectral Analysis and Artificial Neural Networks to analyze a stratigraphic section from Tablazo and Simití formations, near Sáchica, Boyacá, Colombia. The results obtained indicate that Artificial Neural Networks (Hebbian) combined with Multiple Signal Classifier enhance the discrimination of geological cycles when it is compared with Fourier and Singular Spectral Analysis. The cycles detected using the information obtained from the Sáchica section were 50.00m, 27.03m, 19.61m, 14.29m, 10.00m and 5.98m. The 50.00m, 19.61m and 5.98m periodicities are interpreted to be the result of orbital Milankovitch cycles and they correspond to long eccentricity, short eccentricity and obliquity respectively.

Key words: *artificial neural network, Fourier analysis, spectral analysis, stratigraphy, singular, Tablazo – Simití.*

INTRODUCCION

El estudio del registro estratigráfico revela que existen variaciones que presentan un comportamiento recurrente o cíclico en algunas características sedimentarias tales como tamaño de grano, concentraciones de isótopos, espesores de capa, etc. Este tipo de comportamiento en parte ha sido explicado como resultado de la variación de diferentes parámetros orbitales o ciclos de Milankovitch, los cuales presentan diferentes periodicidades (excentricidad 400ka y 130ka, oblicuidad 41ka y precesión 23ka).

A nivel tradicional el estudio de la ciclicidad en una sucesión estratigráfica se ha realizado a través de las metodologías de análisis de series de tiempo y específicamente las herramientas del análisis espectral. Siguiendo esta línea de razonamiento, MORENO & SARMIENTO (2002) aplican Análisis de Fourier en una sección levantada en las formaciones Tablazo y Simití, aflorante en Sáchica (Boyacá) Colombia, y detectan la ocurrencia de un ciclo predominante de 50m de espesor, el cual han interpretado como el resultado de la acción del ciclo de excentricidad larga.

Los resultados obtenidos por GARCÍA-CABREJO & MORENO-SÁNCHEZ (2006) en un caso sintético indican que las componentes periódicas presentes en la señal contaminada por ruido, se pueden separar utilizando herramientas como Análisis de Fourier (AF), Análisis Espectral Singular (AES) y Redes Neuronales Artificiales (RNA), sin embargo es de vital importancia evaluar si este mismo resultado se puede obtener para el caso de una señal estratigráfica real. En este trabajo, los métodos de análisis espectral de series de datos estratigráficos presentados en la Parte 1, se aplican a un caso de estudio correspondiente a las formaciones Tablazo y Simití, aflorantes en cercanías del municipio de Sáchica, Departamento de Boyacá, Colombia.

CASO DE APLICACIÓN FORMACIONES TABLAZO – SIMITI SECTOR SÁCHICA (BOYACÁ)

El rasgo estructural más importante del área de estudio es el Anticlinal de Arcabuco (ETAYO 1968), y en su flanco E el Sinclinal de Churuvita. Estas dos estructuras presentan una orientación NE – SW. El Anticlinal de Arcabuco y el Sinclinal de Tunja definen pliegues de primer orden, mientras el Sinclinal de Churuvita y el Anticlinal de Vélez definen estructuras de segundo orden (KAMMER 1997). Los pliegues de primer orden se caracterizan por longitudes de onda de unos 20km los de segundo orden por longitudes de onda de unos 2km y en general a mayor orden del pliegue menor longitud de onda.

En el presente trabajo se utilizan las columnas estratigráficas presentadas por MORENO & PÉREZ (2001) y MORENO & SARMIENTO (2002) de las formaciones Tablazo y Simití, las cuales se levantaron al SE de Sáchica (Boyacá), siguiendo el curso de la Quebrada Honda (Fig. 1). En

este sector la Formación Tablazo presenta un espesor de 490m y la Formación Simití un espesor de 1030m. MORENO & SARMIENTO (2002) indican que la Formación Tablazo representa principalmente medios de depósito someros tipo frente de playa con marcada influencia calcárea, mientras la Formación Simití registra principalmente ambientes tranquilos de costa afuera, con el esporádico establecimiento de ambientes costeros de aguas poco profundas (Fig. 2). ETAYO (1968a, 1968b) indica para las formaciones San Gil Inferior – San Gil Superior (sinónimas de las formaciones Tablazo – Simití) en el área de Villa de Leiva una edad oscilando del Aptiano superior al Albiano superior. MORENO & SARMIENTO (2002) indican que tanto el contacto de la Formación Tablazo (unidad mixta terrígena – calcárea) con la infrayacente Formación Paja (unidad lodolítica) como el contacto de la Formación Simití (unidad lodolítica) con la suprayacente Formación Churuvita (unidad mixta terrígena – calcárea) son netos y corresponden a caídas contrastantes del nivel del mar de importancia regional a nivel de la Cuenca Cretácica Colombiana (COOPER *et al.* 1995, GUERRERO *et al.* 2000, GUERRERO 2002).

MORENO & SARMIENTO (2002) indican que en las formaciones Tablazo y Simití se registra de forma completa la evolución cíclica de los sistemas de depósito (VAN WAGONER *et al.* 1988). El sistema de bajo nivel se presenta en la transición contrastante desde el punto de vista litológico y ambiental de lodolitas de la Formación Paja a arenitas y bioesparitas de la Formación Tablazo. Se presenta un sistema transgresivo en el paso de arenitas y bioesparitas de la Formación Tablazo a las lodolitas con intercalaciones arenosas – calcáreas de la Formación Simití. El desarrollo de un sistema de alto nivel se manifiesta en la predominancia de lodolitas e intercalaciones menores de arenitas y bioesparitas de la parte media y superior de la Formación Simití. El ciclo remata en el contacto de la Formación Simití con las Formación Churuvita, el cual corresponde de nuevo al desarrollo de un sistema de bajo nivel o caída regional del nivel del mar (Fig. 2).

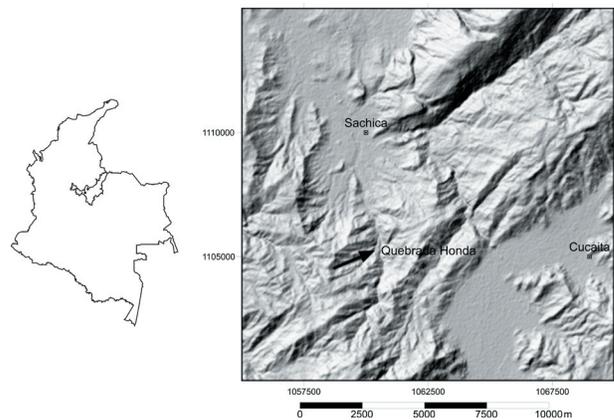


Fig. 1. Localización de la zona de estudio.

MORENO & SARMIENTO (2002) dividen las formaciones Tablazo y Simití en la sección de Sáchica en segmentos litológicos los cuales se describen de forma breve a continuación.

Formación Tablazo

Segmento A. Constituido por 44.8% de limolitas de cuarzo, 27.6% de lodolitas, 11.5% de limolitas fosilíferas, 6.7% de bioesparitas, 4.8% de arenitas de cuarzo y 4.6% de arenitas fosilíferas. Espesor: 212.6m.

Segmento B. Conformada por 57.4% de lodolitas, 18.1% de limolitas de cuarzo, 9.8% de arenitas fosilíferas, 5.3% de arenitas de cuarzo, 4.9% de bioesparitas y 4.5% de limolitas fosilíferas. Espesor: 101.2m.

Segmento C. Constituida por 48.7% de limolitas de cuarzo, 22.4% de lodolitas, 13.3% de arenitas de cuarzo, 5.8% de arenitas fosilíferas, 5.4% de bioesparitas y 4.4% de limolitas fosilíferas. Espesor: 75.1m.

Segmento D. Conformado por 54.4% de lodolitas, 21.2% de arenitas de cuarzo, 8.7% de limolitas de cuarzo, 8.3% de bioesparitas, 7.7% de lodolitas, 4.1% de limolitas fosilíferas y 3.3% de arenitas fosilíferas. Espesor: 83.2m.

Segmento E. Constituido por 51.1% de limolitas de cuarzo, 26.4% de arenitas de cuarzo, 12.7% de arenitas de cuarzo calcáreas, 6.9% de lodolitas y 2.9% de bioesparitas. Espesor: 52.8m.

Formación Simití

Segmento A. Conformado por 64.3% de lodolitas, 15.1% de arenitas fosilíferas, 10.4% de arenitas de cuarzo, 4.1% de bioesparitas, 3.8% de limolitas fosilíferas y 2.3% de limolitas de cuarzo. Espesor: 284.9m.

Segmento B. Constituido por 43.9% de lodolitas, 31.1% de arenitas de cuarzo, 9.4% de arenitas fosilíferas, 8.9% de limolitas de cuarzo, 3.6% de limolitas calcáreas y 3.1% de bioesparitas. Espesor: 190.1m.

Segmento C. Conformado por 80.4% de lodolitas, 10.7% de arenitas de cuarzo, 4.9% de limolitas de cuarzo, 3.3% de arenitas de cuarzo fosilíferas y 0.7% de bioesparitas. Espesor: 155.2m.

Segmento D. Constituido por 43.7% de lodolitas, 24.3% de arenitas de cuarzo, 17.4% de limolitas de cuarzo, 6.4% de arenitas fosilíferas, 6.1% de bioesparitas y 2.1% de limolitas fosilíferas. Es-

pesor: 98.6m.

Segmento E. Conformado por 75.9% de lodolitas, 12.1% de arenitas de cuarzo, 6.1% de limolitas de cuarzo, 3.4% de arenitas de cuarzo calcáreas y 2.5% de bioesparitas. Espesor: 188.5m.

Segmento F. Constituido por 51.9% de lodolitas, 19.9% de arenitas de cuarzo calcáreas, 18.9% de arenitas de cuarzo, 8.5% de limolitas de cuarzo, 0.5% de limolitas fosilíferas y 0.3% de bioesparitas. Espesor: 184.3m.

Análisis Exploratorio de Datos

La columna estratigráfica de las formaciones Tablazo y Simití en la sección de Sáchica (Fig. 2), fue levantada con un intervalo de muestreo de 10cm y codificada en función de los estados granulométricos presentes. La curva de variación granulométrica así obtenida (señal estratigráfica) se constituye en el parámetro de entrada para las metodologías de análisis espectral (Fig. 3a). La columna estratigráfica de la que se obtuvo esta señal tiene un espesor de 1593m y se encuentra muestreada cada 10cm, con lo cual se tienen 15930 muestras. El histograma de la curva de variación granulométrica (Fig. 3b), muestra que en conjunto, para las formaciones Tablazo y Simití, las granulometrías finas (arcilla + lodo) dan cuenta de 53.68%, el limo un 19.87% y la arena un 26.44% (Tabla 1). Característico de todo el conjunto litológico es la influencia calcárea. La forma del histograma indica que la granulometría tiene una distribución asimétrica con sesgo positivo. Esto se corrobora a partir de los resultados de los parámetros estadísticos de la curva granulométrica, los cuales aparecen reportados en la Tabla 2.

La función de autocorrelación espacial se calculó hasta separaciones de 100m (Fig. 4a) y no presenta ningún patrón que revele la existencia de componentes periódicos tales como el caso de la señal sintética (ver Fig. 9c en GARCÍA-CABREJO & MORENO-SÁNCHEZ 2006. Parte 1). Sin embargo hacia una separación de 50m se observa un ligero incremento del valor del co-

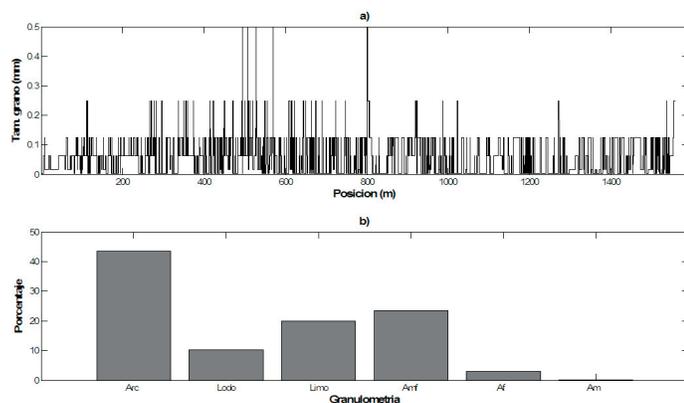


Fig. 3. a) Curva de variación del tamaño de grano. b) Porcentajes de las granulometrías presentes en la sección.

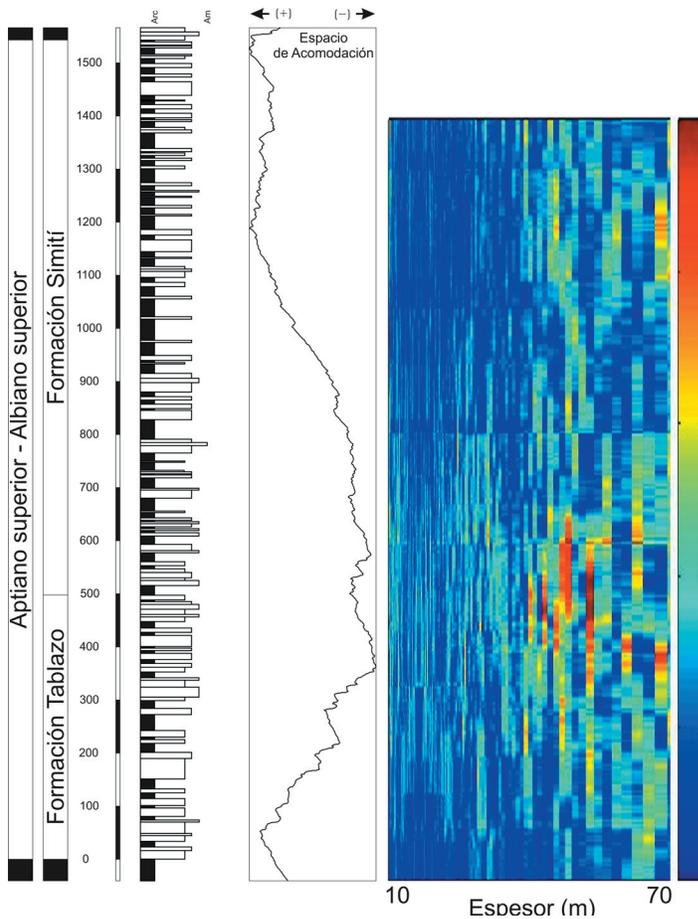


Fig. 2. Columna estratigráfica esquemática de las formaciones Tablazo y Simití en la sección de Sáchica (derecha), curva de variación de espacio de acomodación (centro) y variación de la densidad espectral de la granulometría con la posición estratigráfica.

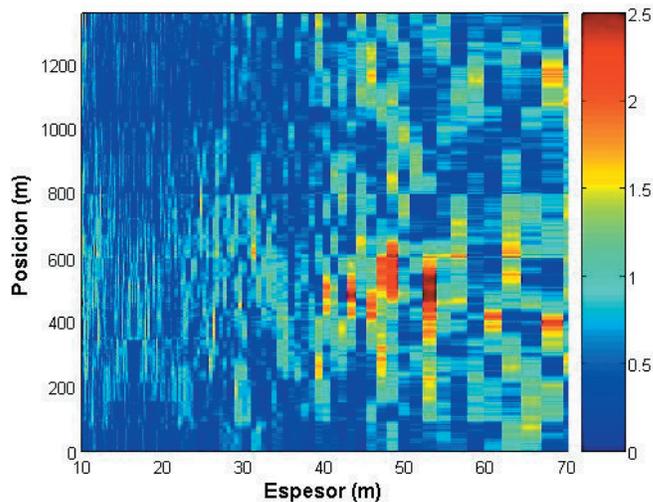


Fig. 5. Variación de la densidad espectral del tamaño de grano para la sección de Sáchica (tamaño de ventana 100m) con la posición dentro de la sección.

eficiente de correlación, aunque no alcanza valores que sean significativos. En el caso del periodograma (Fig. 4b) este presenta dos picos predominantes, uno a 50m y otro a 70m, y aunque hay otros picos para ciclos de espesor menor estos no son claramente discernibles debido a que presentan amplitudes similares. El ciclo de 50m fue interpretado por MORENO & SARMIENTO (2002) como asociado al parámetro orbital de Milankovitch de excentricidad larga (400ka), considerando el espesor total de la unidad (1590m), depositado en un intervalo de tiempo de 12Ma.

Dentro de la sección levantada se determinó un periodograma local, el cual se construyó seleccionando para cada punto de muestreo dentro de la columna estratigráfica, los valores de granulometría de los 100m suprayacentes, y sobre esta serie de tiempo de menor longitud se efectuó análisis de Fourier tradicional. Cada uno de los periodogramas resultantes se graficó en función de la posición estratigráfica, tal y como aparecen en la figura 2 (derecha) y en la figura 5.

En la figura 2 se presenta de forma integrada la variación granulométrica (columna estratigráfica), variación del espacio de acomodación (diagrama de Fischer; DRUMMOND & WILKINSON 1993, DAY 1997, WILKINSON *et al.* 1997, MARTÍN-CHIVELET *et al.* 2000) y periodograma de las formaciones Tablazo y Simití en la sección de Sáchica. Se observa la gran correspondencia entre los contrastes de amplitud del periodograma con la curva de variación del espacio de acomodación (Fig. 2). Dada la variación de la tasa de sedimentación a través del conjunto litológico, resulta evidente la variación de espesor de los ciclos predominantes presentes en la secuencia estratigráfica. De esta forma los ciclos predominantes de espesor igual a 58m y 47m se presentan entre el metro 100 y el metro 650. A partir del metro 800 se tiene un cambio abrupto en el contenido frecuencial de la señal, ya que los ciclos de 58m y 47m no tienen una señal tan fuerte como la observada en el intervalo 100m – 650m. Esto se puede apreciar a nivel visual en la figura 5, ya que a partir de este punto (metro 800) se observa un claro cambio en el patrón del periodograma que permite dividir esta gráfica en dos sectores. En el sector inferior predominan los ciclos de 58m y 47m de espesor y a partir del metro 800 la amplitud de los ciclos predominantes disminuye, así como su espesor, ya que de 52m en la parte inferior pasa a 42m en la parte superior de la sección, presentándose un cambio significativo en el

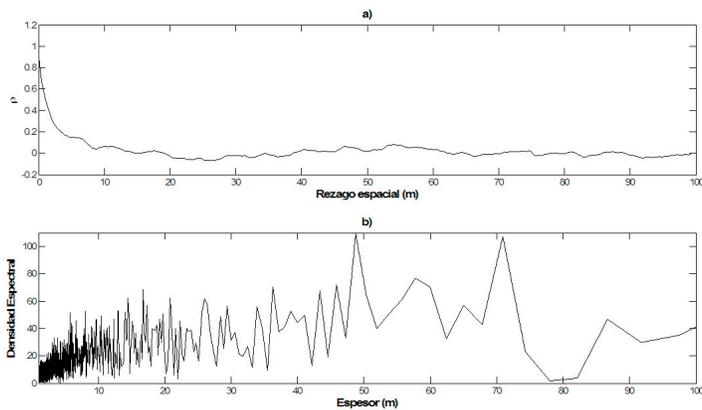


Fig. 4. a) Función de autocorrelación espacial. b) Periodograma.

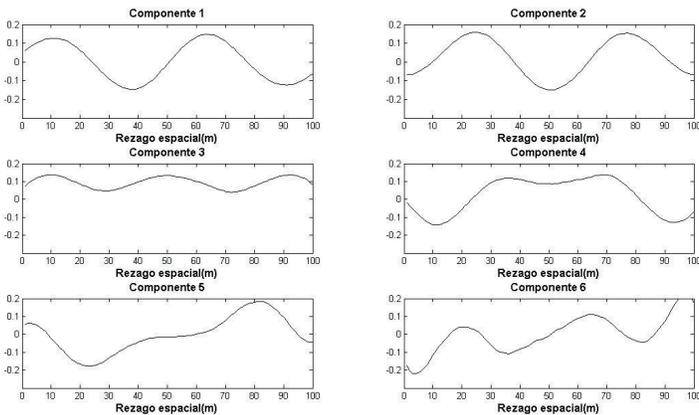


Fig. 6. 6 primeros componentes principales obtenidos en el procedimiento de análisis espectral singular tradicional para una ventana de tamaño 100m (dimensión de empotramiento M=1000 elementos).

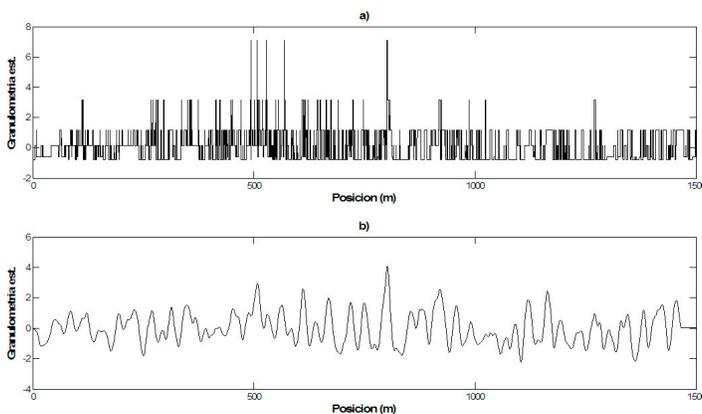


Fig. 7. a) Señal real y b) señal reconstruida con los 7 primeros componentes principales lineales obtenidos en el procedimiento de análisis espectral singular tradicional.

comportamiento de los ciclos de espesores bajos. Esto se interpreta como un cambio abrupto en la tasa de sedimentación a partir de este punto (metro 800) y la disminución progresiva de estos valores a medida que se asciende estratigráficamente en la sección analizada.

Análisis Espectral Singular Tradicional

El AES Tradicional para la sección de Sáchica se realizó especificando una ventana con un ancho de 100m, o lo que es equivalente a una dimensión de empotramiento de 1000. En la figura 6 se presentan los 6 primeros componentes obtenidos, los cuales se encuentran asociados a patrones periódicos. La reconstrucción de la curva de variación granulométrica se realizó usando

Tabla 1. Porcentajes de ocurrencia de los tamaños de grano en la sección de Sáchica.

Granulometría	Tamaño de grano	% en la Sección
Arcilla	0.0039	43.53
Lodolita	0.0156	10.15
Limolita	0.0625	19.87
Arena muy fina	0.1250	23.36
Arena fina	0.2500	2.88
Arena media	0.5000	0.2

Tabla 2. Estadísticas básicas de la curva granulométrica de la sección de Sáchica.

PARÁMETRO ESTADÍSTICO	VALOR
Media	0.0531
Desviación Estándar	0.0628
Coefficiente de Variación	1.1824
Máximo	0.5000
Cuartil Superior	0.1250
Mediana	0.0156
Cuartil Inferior	0.0039
Mínimo	0.0039

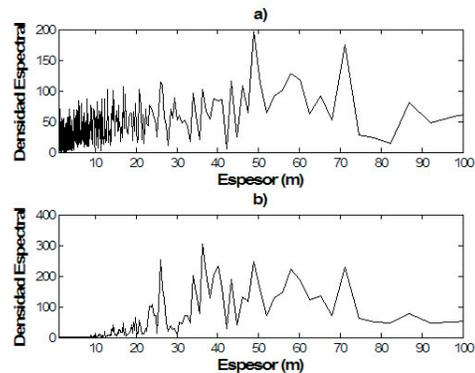


Fig. 8. a) Espectro de potencia de la señal original. b) Espectro de potencia de la señal reconstruida a partir de 7 componentes principales.

do 7 componentes principales (Fig. 7b), la cual se puede comparar con la curva real (Fig. 7a). Como es evidente, la curva reconstruida tiene un patrón de variación mucho más suave que el de la señal original. Esto también se puede apreciar del hecho que el periodograma de la curva reconstruida no incluye las frecuencias altas (ciclos de espesor bajo, Fig. 8a y 8b). Los espesores de ciclos predominantes corresponden a 47.5m y 58.5m, aunque aparecen otros picos a 34m y a 26m.

Tabla 3. Valores de los Parámetros empleados en el procedimiento de análisis espectral singular neuronal para la sección de Sáchica.

PARAMETRO	VALOR
Número de Neuronas de entrada	1000
Número de Neuronas de salida	2
Tasa de aprendizaje	1.00E-05
Parámetro de activación	10
Tolerancia mínima	1.00E-04

Análisis Espectral Singular Neuronal

Para realizar el AES usando redes neuronales artificiales para la curva de variación granulométrica se emplearon los parámetros de entrenamiento consignados en la Tabla 3. En este caso particular se extrajeron 6 componentes principales no lineales (Fig. 9), los cuales reflejan patrones periódicos. Al proyectar el primer componente sobre la señal original y compararlo con la curva granulométrica de Sáchica (Fig. 10), resulta evidente que con solo un componente se esta capturando una gran parte de la variación presente en la curva original. Esto se puede corroborar al comparar los periodogramas de la curva original (Fig. 11a) con el de la proyección del primer componente (Fig. 11b), en el cual es claro la incorporación de frecuencias altas (ciclos de espesor bajo) que el AES tradicional no incorporó y filtró como ruido. El espesor del ciclo predominante corresponde a 47.5m, valor cercano al reportado por MORENO & SARMIENTO (2002) a partir del análisis espectral de Fourier.

Red Neuronal Artificial y Clasificación de Señal Múltiple

Para la determinación de las frecuencias principales asociadas a la curva de variación granulométrica levantada en el municipio de Sáchica se empleó el mismo procedimiento usado para la señal sintética (GARCÍA-CABREJO & MORENO-SÁNCHEZ 2006), incluyendo los parámetros

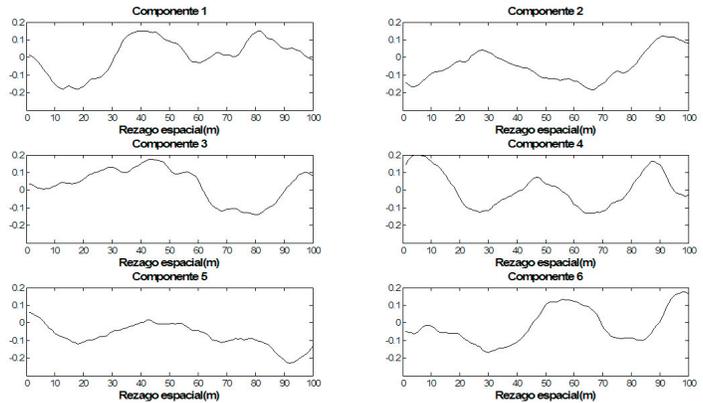


Fig. 9. Componentes principales no lineales obtenidos, extraídos por la red neuronal artificial de tipo Hebbiano para una ventana de tamaño 100m.

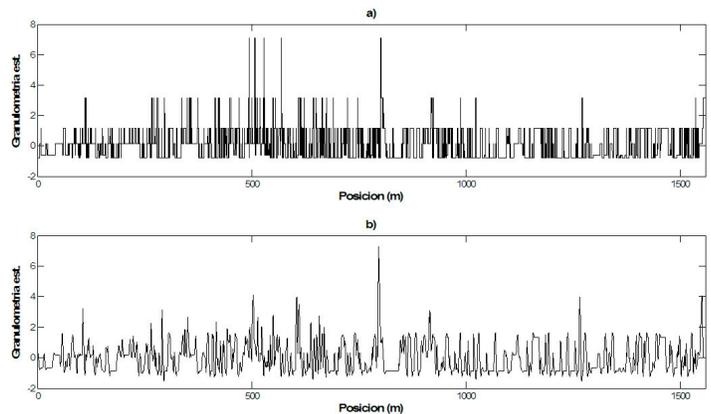


Fig. 10. a) Curva de variación de granulometría estandarizada real para la sección de Sáchica. b) Curva de variación de granulometría estandarizada reconstruida usando el primer componente extraído por la red neuronal artificial.

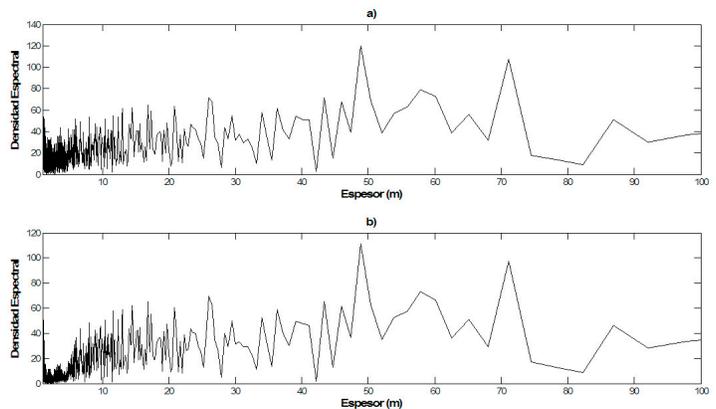


Fig. 11. a) Espectro de potencia de la curva de variación granulométrica obtenido mediante la transformada de Fourier. b) Espectro de potencia de la curva de variación granulométrica reconstruida usando 1 componente principal no lineal.

Tabla 4. Relaciones entre los parámetros orbitales y los ciclos detectados del análisis espectral combinando red neuronal artificial y el clasificador de señal múltiple para la curva de variación granulométrica de la sección de Sáchica.

Parámetro Orbital (ka)	Proporción Relativa 1 (41 Ka)	Proporción Relativa 2 (100 Ka)	Ciclos Observados (m)	Proporción Relativa 1 (5.98 m)	Periodicidad (ka)
41	1.00		5.98	1.00	47.84
			10.00	1.67	80.00
			14.29	2.39	114.32
130	3.17	1.00	19.61	3.28	156.88
			27.03	4.52	216.24
400	9.76	3.08	50.00	8.36	400.00

para el entrenamiento de la red neuronal artificial (Tabla 3), pero variando las dimensiones de empotramiento (en este caso el espesor de ventana es de 100m o dimensión de empotramiento 1000). Para efectos de comparación se presenta el periodograma de la curva de variación granulométrica de la sección de Sáchica (Fig. 12a), y de la cual resulta clara la existencia de un ciclo de aproximadamente 50m. Sin embargo el periodograma también muestra otros picos, los cuales no resultan fáciles de interpretar, y lo cual es la principal motivación para la utilización de otros estimadores alternativos. En la primera corrida se aplicó la red neuronal a la señal convenientemente estandarizada y los resultados del estimador de clasificación de señal múltiple aparecen en la figura 12b. En este caso se identificó el ciclo de 50m como principal en la curva de variación granulométrica.

La identificación del ciclo de 50m es concordante con lo reportado por MORENO & SARMIENTO (2002), quienes interpretan el ciclo de 50m presente en las formaciones Tablazo y Simití como correspondiente al parámetro orbital de Milankovitch de excentricidad larga, a partir de una tasa de sedimentación de 12.7cm/ka para todo el conjunto litológico. Una vez identificado este ciclo principal se filtra el mismo de la señal con el fin de continuar con el procedimiento de identificación de las frecuencias de la señal en estudio. Esta señal filtrada se somete nuevamente al procedimiento de determinación de los componentes principales no lineales por medio de la red neuronal usando los mismos parámetros de entrenamiento usados en la corrida anterior (Tabla 3).

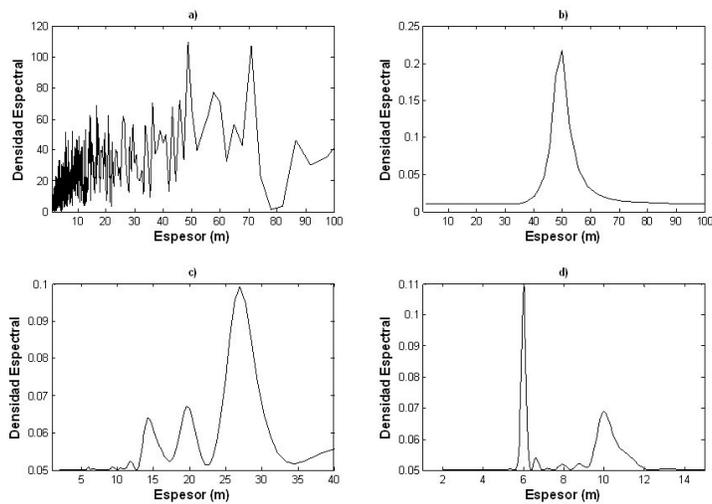


Fig. 12. a) Espectro de potencia para el tamaño de grano obtenido mediante transformada de Fourier. El espesor del ciclo predominante corresponde a 47.5m. b) Espectro de potencia obtenido mediante la Red Neuronal Artificial y clasificador de señal múltiple (ciclo principal 50m). c) Espectro de potencia obtenido mediante la Red Neuronal Artificial y clasificador de señal múltiple (Señal filtrada ciclos entre de 4 y 40m), ciclos principales 27.03m, 19.61m y 14.29m. d) Espectro de potencia obtenido mediante la Red Neuronal Artificial y clasificador de señal múltiple (Señal filtrada ciclos entre de 4 y 13m), ciclos principales 10m y 5.98m.

Los resultados aparecen en la figura 12c, en donde los ciclos que predominan corresponden a 27.03m, 19.61m y 14.29m respectivamente. Nuevamente estos ciclos son filtrados de la señal y se repite el procedimiento de tal forma que se detectan otros ciclos correspondientes a 10m y a 5.98m (Fig. 12d). Todos los resultados anteriores aparecen resumidos en la Tabla 4. Con el fin de determinar las equivalencias temporales de los ciclos detectados, se calcularon las relaciones entre las periodicidades expresadas en años (valores de los parámetros orbitales; PROKOPH & BARTHELMES 1996, PROKOPH & AGTERBERG 1999, SAGEMAN *et al.* 1997, VILLAMIL 1988, SCHWARZACHER 2000) y en metros (detectadas en la curva de variación granulométrica), los cuales se presentan en la Tabla 4.

Las columnas 2 y 3 incluyen la relación entre los parámetros orbitales en unidades de 41ka y 130ka respectivamente. La columna 4 presenta los ciclos determinados para la sección de Sáchica, mientras que la columna 5 presenta las proporciones relativas en unidades de 5.98m. En la columna 6 se presentan las periodicidades asociadas a los ciclos y calculadas de acuerdo a la tasa de sedimentación reportadas en MORENO & SARMIENTO (2002). Los resultados presentados en las columnas 5 y 6 (Tabla 4) sugieren que

los ciclos detectados en la sección de Sáchica se pueden relacionar a parámetros orbitales de Milankovitch, en los cuales el ciclo de 5.98m correspondería al parámetro orbital de oblicuidad (41ka), mientras que los ciclos de 19.61m y 50m se podrían asociar a los parámetros orbitales de excentricidad corta y larga respectivamente (130ka y 400ka). Los otros ciclos presentes 27.03m, 14.29m y 10.0m tienen unas periodicidades que no corresponden a parámetros orbitales.

DISCUSION DE RESULTADOS

Para el caso de la curva de variación granulométrica de las formaciones Tablazo y Simití levantada en Sáchica, el contenido frecuencial se determinó inicialmente mediante análisis de Fourier. Sin embargo como es de esperar en el caso de las señales reales, la determinación de las frecuencias predominantes a partir del periodograma en este caso es particularmente difícil si se tiene en cuenta que aparecen múltiples picos debido a frecuencias altas (o ciclos de espesor bajo) que en algunos casos incluso pueden ocultar picos asociados a ciclos significativos.

Una de las suposiciones más importantes que debe cumplir una señal para ser objeto del análisis de series de tiempo empleando metodologías tradicionales es la de estacionalidad (Hsu 1987). Esta propiedad hace referencia a la invarianza por translación de la distribución conjunta del atributo de interés sobre toda la serie de tiempo (o serie espacial). Esto implica que los diferentes parámetros estadísticos asociados a esta, como el promedio, la varianza, y las frecuencias predominantes son constantes para toda la serie. Esta propiedad esta lejos de ser válida para las series estratigráficas reales, ya que en estas siempre existen tendencias impuestas por los diferentes procesos alocíclicos como la tectónica, el clima y las condiciones locales de la cuenca.

La reconstrucción de la curva granulométrica de la sección de Sáchica usando Análisis Espectral Singular Tradicional permitió obtener una curva suave que resalta la tendencia general presente en la información y donde las frecuencias altas (ciclos de espesores menores a 10m) se eliminan casi por completo (esto se corrobora del análisis del periodograma). En este caso estas frecuencias se encontrarían asociadas al ruido presente en la señal original.

Para el caso del AES Neuronal, la señal se reconstruye mejor que en el caso anterior (AES tradicional). El análisis del contenido frecuencial indica que en la señal reconstruida usando el primer componente principal no lineal se incluyen más frecuencias altas (ciclos de espesor menor a 10m) que en el AES tradicional se eliminaron. De aquí resulta importante mencionar que los componentes principales no lineales obtenidos con la red neuronal en el caso de una señal compleja como lo es la de Sáchica, permiten incorporar mayor grado de detalle que sus equivalentes lineales. Esto es de vital importancia, ya que en

el caso del AES tradicional una porción significativa de las frecuencias altas (ciclos de espesor bajo) fueron filtradas, pero en el caso del AES Neuronal una parte de estas se conservaron como parte importante de la señal. Esto indica que el problema de la separación señal – ruido es dependiente de las herramientas de análisis empleadas y que solo por medio de la experimentación con estas se pueden establecer pautas para su utilización de acuerdo al problema específico.

Con el análisis combinado de Red Neuronal Artificial y Clasificador de Señal Múltiple se detectaron frecuencias (ciclos) adicionales presentes en la curva de variación granulométrica, diferentes a las reportadas por MORENO & SARMIENTO (2002). Estas frecuencias (ciclos) son muy difíciles de separar en el periodograma de la señal obtenido con la transformada de Fourier. Algunas de estas frecuencias se han interpretado como originadas por ciclos de Milankovitch, específicamente se detectaron los ciclos asociados a la excentricidad corta (130ka) y oblicuidad (41ka).

El AES tradicional filtra frecuencias altas (espesores bajos) que con la Red Neuronal y el Clasificador de Señal Múltiple se identificaron como importantes, con lo cual se infiere que el AES tradicional puede presentar problemas para la separación de frecuencias altas cuando la señal se encuentra contaminada por ruido. Este resultado sugiere que los componentes principales no lineales extraídos por la Red Neuronal Artificial incorporan frecuencias altas asociadas a la señal original y que su utilización se recomienda para el filtrado de señales contaminadas con ruido.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El algoritmo de Análisis Espectral Singular basado en redes neuronales artificiales de tipo hebbiano permitió reconstruir la señal original de una mejor forma que el algoritmo tradicional basado en componentes principales lineales, tanto en el caso sintético como en la sección de Sáchica. Esto indica que los componentes principales no lineales obtenidos por este tipo de procedimientos de análisis permiten capturar rasgos más finos de la señal y que son importantes para la reconstrucción de la misma.

La elección del algoritmo depende del objetivo del estudio. En el caso que se quieran resaltar tendencias de la señal se recomienda AES tradicional, si se quiere filtrar la señal AES Neuronal y para la detección de frecuencias predominantes Redes Neuronales Artificiales y Clasificador de Señal Múltiple.

De acuerdo a los resultados obtenidos del caso sintético y del caso real, si el objetivo del estudio de la señal estratigráfica corresponde al filtrado de una señal estratigráfica, de acuerdo a los resultados obtenidos en el presente trabajo la metodología a seguir es la siguiente:

1. Estimación del periodograma mediante la transfor-

mada rápida de Fourier y determinación de las frecuencias predominantes del periodograma obtenido anteriormente.

2. Empotramiento de la señal estratigráfica usando una ventana de espesor igual al del ciclo que se quiera separar.

3. Determinación de los componentes principales y sus respectivas proyecciones sobre la señal usando el Análisis Espectral Singular (Tradicional o Neuronal).

4. Estimación del periodograma y determinación de las frecuencias fundamentales de los componentes principales proyectados sobre la señal original.

5. Si el resultado es satisfactorio realizar ya sea la interpretación de los componentes proyectados y la reconstrucción de señal original con un número pequeño de componentes (un número menor al de la dimensión de empotramiento empleada anteriormente). La señal reconstruida corresponde a la señal filtrada que preserva las frecuencias predominantes presentes en la señal original.

6. Si el resultado no es satisfactorio probar con otras dimensiones de empotramiento para realizar la separación de las frecuencias predominantes.

Los resultados obtenidos en el caso de la sección de Sáchica indican que la combinación de las redes neuronales artificiales de tipo hebbiano y el clasificador de señal múltiple permiten realizar una mejor estimación de las frecuencias fundamentales (ciclos) de la señal estratigráfica que la realizada con el periodograma obtenido a partir de la transformada de Fourier. Con esta aproximación basada en redes neuronales se detectaron en la sección de Sáchica, la ocurrencia de ciclos de 19.61m y de 5.98m que se interpretaron como el registro de los parámetros orbitales de excentricidad corta y oblicuidad respectivamente, los cuales no habían sido reportados anteriormente y además complementan los resultados de MORENO & SARMIENTO (2002) para las formaciones Tablazo y Simití en la sección estudiada.

Agradecimientos

El presente trabajo hace parte de los resultados presentados por los autores en el Seminario – Taller “Metodologías Cuantitativas en el Análisis de Datos Estratigráficos”, realizado durante los días 20 y 21 de Junio de 2003 en INGEOMINAS – Bogotá, evento auspiciado por la Sociedad Colombiana de Geología, AGUNAL, Comisión Colombiana de Estratigrafía y la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Los autores agradecen a los directivos de estas organizaciones el apoyo recibido para la realización de la presente investigación.

Los autores agradecen de forma especial al Geólogo Gustavo Sarmiento Ph.D., Profesor del Departamento de Geociencias de la Universidad Nacional de Colombia y al Ingeniero Nelson Obregón Neira, M.Sc., Ph.D., Profesor de la Pontificia Universi-

dad Javeriana por sus valiosos comentarios que ayudaron enormemente a mejorar la calidad del presente trabajo. Al Departamento de Ingeniería Civil de la Pontificia Universidad Javeriana, por las facilidades computacionales brindadas.

GMS reconoce el apoyo recibido mediante el programa “Becas para Estudiantes Sobresalientes de Postgrado” (Vicerrectoría Académica, Universidad Nacional de Colombia) durante sus estudios en el programa curricular “Maestría en Ciencias – Geología” del Departamento de Geociencias de la Universidad Nacional de Colombia.

REFERENCIAS

- COOPER, M., ADDISON, F., ALVAREZ, R., CORAL, M., GRAMHAM, R., HAYWARD, A., HOWE, S., MARTINEZ, J., NAAR, J., PEÑA, R., PULHAM, A. & TABORDA, A. (1995): Basin Development and Tectonic History of the Llanos Basin, Eastern Cordillera, and Middle Magdalena Valley, Colombia. *AAPG Bulletin* 79(10), 1421 – 1443.
- DAY, P. (1997): The Fisher Diagram in The Depth Domain: A Tool for Sequence Stratigraphy. *Journal Of Sedimentary Research* 67 (5), 982 – 984.
- DRUMMON, C. & WILKINSON, B. (1993): On the Use of Cycle Thickness Diagrams as Records of Long – Term Sealevel Change during Accumulation of Carbonate Sequences. *Journal of Geology* 101, 687 – 702.
- ETAYO, F. (1968A): El Sistema Cretáceo en la Región de Villa de Leiva y Zonas Próximas. *Geología Colombiana* 5, 5 – 74.
- ETAYO, F. (1968B): Sinopsis Estratigráfica de la Región de Villa de Leiva y Zonas Próximas.- *Boletín de Geología UIS* 21, 19 – 32.
- GARCÍA-CABREJO, O. & MORENO-SÁNCHEZ, G. (2006): Sobre la Utilización del Análisis de Fourier, Análisis Espectral Singular y Redes Neuronales Artificiales en Estratigrafía. Parte 1: Revisión Metodológica y Caso Sintético. *Geología Colombiana* 31, XX – 102.
- GUERRERO, J., SARMIENTO, G. & NAVARRETE, R. (2000): The Stratigraphy of the W Side of the Cretaceous Colombian Basin in the Upper Magdalena Valley. Reevaluation of Selected Areas and Type Localities Including Aipe, Guaduas, Ortega, and Piedras. *Geología Colombiana* 25, 45 – 110.
- GUERRERO, J. (2002): A Proposal on the Classification of Systems Tracts: Application to the Allostratigraphy and Sequence Stratigraphy of the Cretaceous Colombian Basin. Part 2: Barremian to Maastrichtian. *Geología Colombiana* 27, 27 – 49.
- HSU, H. (1987): Análisis de Fourier. McGraw Hill. 287p. De-laware.
- KAMMER, A. (1997): Los Pliegues del Sinclinal de Tunja. Análisis Estructural y Modelamiento Geométrico. *Geología Colombiana* 22, 3 – 25.
- MARTÍN-CHIVELET, J., OSLEGER, D. & MONTAÑEZ, I. (2000): Modified Fischer Plots as Graphical Tools for Evaluating Thickness Patterns in Stratigraphic Successions. *Journal of Geoscience Education* 48, 179 – 183.

- MORENO, G. & PÉREZ, A. (2001): Caracterización del Grupo San Gil y las Formaciones Tablazo y Simití. Trabajo de Grado No Publicado. Universidad Nacional, Departamento de Geociencias, Bogotá.
- MORENO, G. & SARMIENTO, G. (2002): Estratigrafía Cuantitativa de las Formaciones Tablazo y Simití en las localidades de Sáchica (Boyacá) y Barichara - San Gil (Santander), Colombia. *Geología Colombiana* 27, 51 – 76.
- MORENO-SÁNCHEZ, G. & GARCÍA-CABREJO, O. (2003): Metodologías Cuantitativas en el Análisis de Datos Estratigráficos. Notas de Clase (Material No Publicado). 105 pp.
- PROKOPH, A. & BARTHELMES, F. (1996): Detection of Nonstationarities in Geological Time Series: Wavelet Transform of Chaotic and Cyclic Sequences. *Computers & Geosciences* 22 (7), 1097 – 1108.
- PROKOPH, A. & AGTERBERG, F. (1999): Detection of Sedimentary Cyclicality and Stratigraphic Completeness by Wavelet Analysis: An Application to Late Albian Cyclostratigraphy of the Western Canada Sedimentary Basin. *Journal of Sedimentary Research* 69 (4), 862 – 875.
- SAGEMAN, B., RICH, J., ARTHUR, M., BIRCHFIELD, G. & DEAN, W. (1997): Evidence of Milankovitch periodicities in Cenomanian - Turonian lithologic and geochemical cycles, Western Interior U.S.A. *Journal of Sedimentary Research* 67 (2), 286 – 302.
- SCHWARZACHER, W. (2000): Repetitions and cycles in stratigraphy. *Earth Science Reviews* 50, 51 – 75.
- VAN WAGONER, J., POSAMENTIER, H., MITCHUM, R., VAIL, P., SARG, J., LOUITT, T. & HARDENBOL, J. (1988): An overview of the fundamentals of sequence stratigraphy and key definitions. In Wilgus, C., Hastings, b., Kendall, C., Posamentier, H., Ross, c., & Van Wagoner, J. (Eds). *Sea level changes: An integrated approach*. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Special Publication 42, 39 – 45. Tulsa.
- VILLAMIL, T. (1998): Chronology, Relative Sea - Level History and a New Sequence Stratigraphic Model for Basinal Cretaceous Facies of Colombia. *SEPM Special Publication* 58, 161 – 216.
- WILKINSON, B., DRUMMOND, C., ROTHMAN, E & DIEDRICH, N. (1997): Estratal Order in Peritidal Carbonate Sequences. *Journal Of Sedimentary Research* 67 (6), 1068 – 1082.

Manuscrito recibido Octubre 2005; aceptado Octubre 2006.