

Detection and interpretation of cyclic patterns in coals from Los Cuervos Formation, Venezuela

Manuel Martínez S.¹, Grony Garbán¹, Alfonso Benavides¹, Marcos Escobar N.² e Iván Esteves

¹*Instituto de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela. Apartado postal 3895, Caracas 1010A, Venezuela. manmarti@strix.ciens.ucv.ve*

²*Gerencia de Investigación y Desarrollo, INZIT-CICASI. Carretera Vieja a La Cañada, Km 15 Maracaibo, Venezuela*

Abstract

A total of 21 coal samples, belonging to Los Cuervos Formation, were taken in Villa Páez, Táchira State, Venezuela, with the aim of establishing vertical variations in their geochemical parameters. The samples were subject to immediate (moisture, volatile matter, fixed carbon and ash), elemental (C, H, N, S) and petrographic analysis. It was found a significant statistically correlation between sulfur and ash content in coals, with width of beds, and their location in each lithofacies (Spearman correlation coefficient > 0.80): those in which coals are sporadic, the beds are thin, high in sulfur and ash. On the contrary, in lithofacies with abundant coal seams, these are of great thickness, clean (S < 0.7%) and ash low (< 6%). Cyclostratigraphic analysis of the sequence allowed the identification of a cycle of 72 m wavelength, and other two cycles of higher frequency but lower power, of wavelength of 11 and 5 m. These values are in agreement with Milankovitch's cycles of short excentricity (123 ky) and orbital precession (18 ky). Lithofacies and geochemical changes in coals match with the main cycle of 72 m.

Key words: Coal, cyclicity, lithofacies, sulfur, Venezuela

DetECCIÓN e interpretación de patrones cíclicos en carbones de la Formación Los Cuervos, Venezuela

Resumen

Se colectó un total de 21 muestras de carbón pertenecientes a la Formación Los Cuervos en Villa Páez, estado Táchira, Venezuela, con la finalidad de establecer variaciones verticales en sus parámetros geoquímicos. Las muestras fueron sometidas a los análisis inmediatos (humedad, materia volátil, carbono fijo y cenizas), elementales (C, H, N, S) y análisis petrográfico. Se encontró una correlación estadísticamente significativa (coeficiente de correlación de Spearman > 0,80) entre la concentración de azufre y cenizas en los carbones, con el espesor de los mantos y su ubicación en cada litofacies: en aquéllas en las que los carbones son esporádicos, los mantos son delgados, ricos en azufre y cenizas. Por el contrario, en las litofacies donde los carbones presentan una gran abundancia, éstos son de gran espesor, limpios (S < 0,7%) y bajos en cenizas (< 6%). El análisis cicloestratigráfico de la secuencia permitió identificar un ciclo de longitud de onda 72 m, y otros dos ciclos de mayor frecuencia, con longitudes de onda 11 y 5 m. Estos valores concuerdan con los ciclos de Milankovitch de excentricidad corta (123 ka) y de precesión orbital (18 ka). Los cambios en litofacies y en variables geoquímicas de los carbones se corresponden con el ciclo principal de 72 m.

Palabras clave: Azufre, carbón, ciclicidad, litofacies, Venezuela.

Introducción

En el occidente de Venezuela y parte oriental de Colombia se presentaron condiciones apropiadas para la acumulación de turbas durante el Paleoceno y Eoceno Tardío-Oligoceno Temprano [1]. La presencia de amplias llanuras fluvio-deltaicas determinó condiciones favorables para la formación de complejos de marismas en llanuras deltaicas, con acumulación de cantidades apreciables de restos orgánicos vegetales,

que dieron lugar a los depósitos de carbón del estado Táchira. El afloramiento de la Formación Los Cuervos en la vía que conduce a Villa Páez se presenta ideal para efectuar un levantamiento estratigráfico de la unidad (Figura 1). Los carbones contenidos en la misma (más de 20 mantos) pueden proporcionar información paleoambiental y sus variaciones temporales.

Con la finalidad de establecer el grado de variabilidad vertical en los parámetros geoquími-

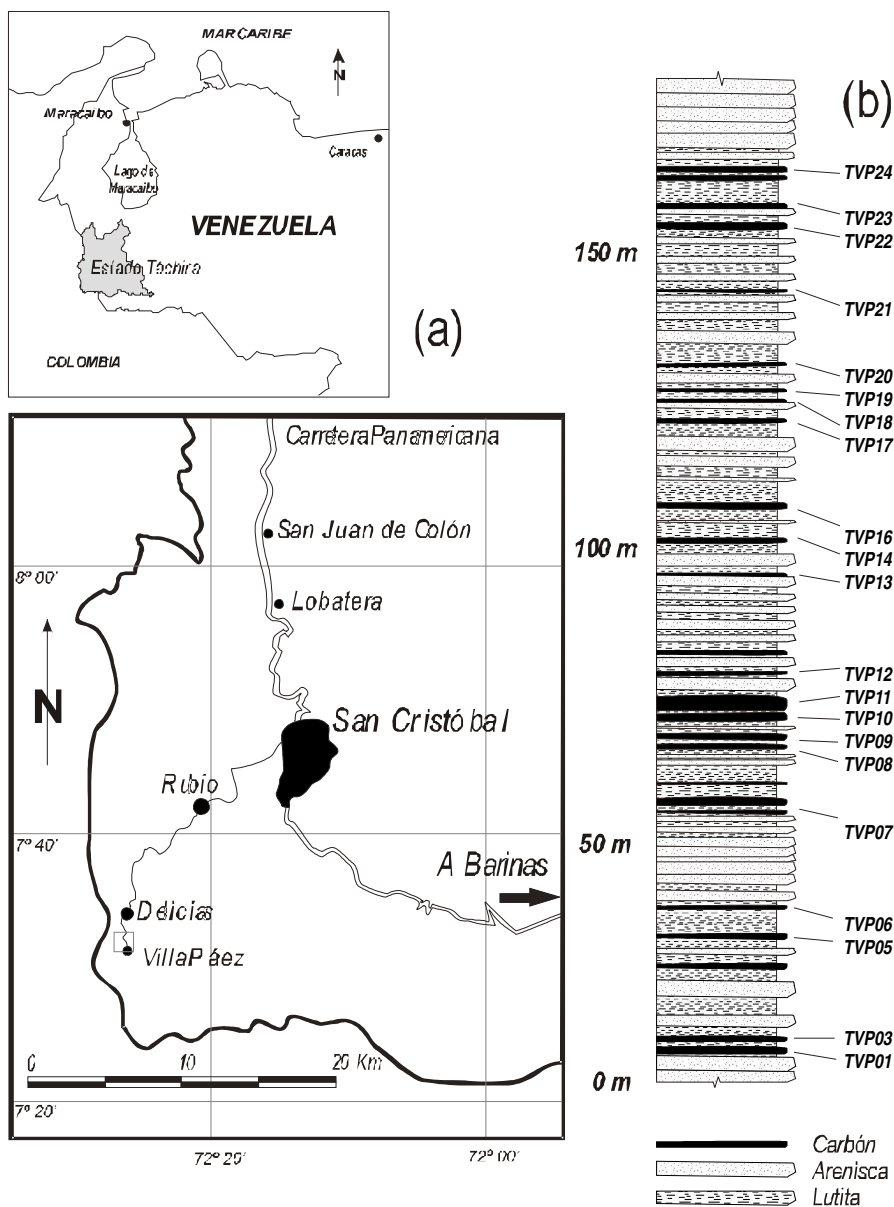


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio (a). Columna estratigráfica de la Formación Los Cuervos en la región de estudio, indicando la nomenclatura de las muestras colectadas (b).

cos que manifiesta la Formación Los Cuervos, se planteó el estudio detallado de la unidad, haciendo uso de dos poderosas herramientas de análisis: identificación de litofacies y caracterización geoquímica de los carbones contenidos en la unidad. Ambos métodos de estudio han probado ser útiles y valiosos para determinar objetivos como el planteado [2-3].

Experimental

Se efectuó un levantamiento litoestratigráfico de la Formación Los Cuervos en el afloramiento ubicado en la carretera que conduce a Villa Páez, que serpentea paralelamente al río Táchira y que sirve de límite con la República de Colombia (Figura 1-a). El espesor levantado de la unidad en el área de estudio es de 158 m. Se recolectó un total de 21 muestras frescas de canal en diferentes mantos de carbón. Las muestras fueron guardadas en bolsas plásticas.

Los análisis inmediatos se llevaron a cabo acorde con las normas ASTM. El análisis elemental se efectuó en un equipo Carlo Erba, modelo 1106. La determinación de azufre total se realizó en un equipo LECO SC-432. Los valores de reflectancia de la vitrinita se obtuvieron a través de un microscopio petrográfico marca Leitz-Orthoplan Pol, por inmersión en aceite. El análisis estadístico y de ciclicidad de la data se llevó a cabo con el software NCSS 2000™.

Resultados y Discusión

La Figura 1-b muestra la columna litoestratigráfica levantada sobre la Formación Los Cuervos en la localidad de Villa Páez. En ella se indican los carbones recolectados y la nomenclatura utilizada. Los resultados obtenidos se han incluido en la Tabla 1.

Características generales de los carbones

Los valores presentados en esta tabla permiten ubicar las muestras dentro del rango de carbones bituminosos altos en volátiles (porcentaje de materia volátil mayor al 33%). Los valores de la relación atómica H/C, así como el R_m medido en 3 muestras ($0,58 \pm 0,03\%$) corroboran la ubicación anterior. La composición maceral de

los carbones de Villa Páez está dominada por vitrinitas (56-77%). Se identificaron como componentes mayoritarios entre las vitrinitas, la desmocolinita, y en menor proporción la telocolinita. Las inertinitas (principalmente fusinita) constituyen el 20-40% de los macerales observados, mientras que las exinitas representan sólo el 3-4%. Dentro de esta familia predominan las resinitas; en menor proporción se hallan las esporinitas.

Concentración de azufre y su correspondencia con el espesor de los carbones

Los tenores de azufre (base seca y libre de cenizas, bslc) en los carbones varían entre 0,30 y 1,85%, aproximadamente, con un valor promedio de 0,60%. El patrón de variación vertical de los valores presenta dos máximos, uno aproximadamente en la muestra TVP 5 y el segundo en la muestra TVP 17 (Figura 2). Tal distribución no uniforme de azufre en la columna es interpretada como el producto de "pulsos" transgresivos, posiblemente controlados por un patrón cíclico, dentro del proceso regresivo general que caracteriza a la formación bajo estudio. En ambientes reductores, la captación de iones sulfato del agua de mar con la subsiguiente fijación e inmovilización como piritita es ocasionada por la reducción del azufre por la materia orgánica, y su posterior precipitación como piritita. En los pulsos transgresivos se incrementa el tenor de sulfatos en las aguas de las turberas, lo que a su vez incrementa el contenido de azufre en los carbones *a posteriori* [4].

De igual manera, los carbones con mayor concentración de azufre son delgados (20-50 cm), mientras que los que presentan un espesor mayor a 50 cm contienen menores concentraciones de este elemento. Esta observación concuerda con los modelos depositacionales para carbones, que establecen turberas tranquilas, de grandes espesores, asociadas a medios continentales, sin influencia marina importante [5]. Este es el caso de los depósitos fluviales y de llanura deltaica alta. Por el contrario, las marismas fuertemente afectadas por el mar, como en el caso de las llanuras deltaicas bajas, suelen ser de corta duración en el tiempo geológico, a causa de la alta movilidad lateral de los aparatos deltaicos, generan-

Tabla 1
Valores obtenidos en los distintos parámetros para los carbones analizados

Muestra	Análisis inmediatos ⁽¹⁾				Análisis elementales ⁽²⁾				
	Humedad (%)	Materia Volátil (%)	Carbono Fijo (%)	Cenizas (%)	Carbono (%)	Hidrógeno (%)	Nitrógeno (%)	Azufre (%)	Oxígeno (%) ⁽³⁾
TVP 01	3,1	32,7	22,2	42,9	76,16	7,11	1,24	0,39	14,7
TVP 03	2,8	43,6	41,2	11,4	78,83	6,28	1,33	0,69	12,9
TVP 05	2,6	31,3	25,4	31,9	75,95	6,6	0,88	0,85	15,3
TVP 06	2,6	33,7	51,5	12,0	72,07	6,07	0,77	0,81	20,1
TVP 07	2,0	37,9	47,0	13,4	77,74	6,24	0,79	0,59	14,8
TVP 08	3,5	37,3	47,2	14,1	80,60	4,53	1,80	0,46	13,1
TVP 09	1,0	43,6	48,1	5,8	74,62	5,34	0,93	0,53	18,5
TVP 10	2,4	37,2	57,0	5,2	75,33	5,52	0,97	0,48	17,7
TVP 11	1,9	37,7	58,2	2,5	80,58	4,58	1,68	0,43	13,1
TVP 12	1,0	38,6	56,8	3,4	77,24	5,27	1,66	0,57	15,5
TVP 13	0,8	40,1	56,0	3,2	72,55	6,98	1,96	0,65	18,0
TVP 14	3,3	33,0	36,1	30,5	80,04	6,38	1,18	0,85	11,2
TVP 16	3,5	43,4	43,7	10,4	75,61	4,08	1,20	0,63	18,6
TVP 17	2,7	46,3	46,3	5,0	73,98	5,66	1,09	1,45	17,7
TVP 18	4,4	39,9	44,3	14,3	77,91	5,62	1,62	0,49	14,4
TVP 19	3,0	47,5	39,9	9,6	79,96	4,83	1,86	0,21	13,0
TVP 20	3,8	45,4	42,2	9,7	72,04	5,55	0,93	0,64	20,7
TVP 21	9,8	43,6	33,4	13,2	80,59	6,47	1,31	0,74	10,7
TVP 22	3,2	43,7	50,9	3,3	73,20	5,25	1,90	0,50	19,0
TVP 23	2,0	42,6	53,6	2,4	81,58	6,23	0,87	0,55	10,7
TVP 24	1,0	42,7	51,9	4,7	81,44	5,10	1,47	0,82	10,6

(1) Determinado tal como se recibe. El error es en cada caso menor a 0,5%. (2) Calculado sobre base seca libre de cenizas. El error es del orden de ± 0,06. (3) Calculado por diferencia.

do por consiguiente carbones delgados. También es importante el efecto de la tasa de subsidencia: cuando ésta es alta, la preservación de las turberas es baja [5].

Concentración de cenizas – relación con la variabilidad en azufre

La distribución de cenizas en los carbones a lo largo de la columna también es desigual (Figura 2). Al igual que en el caso del azufre, las cenizas del carbón en la columna muestran una ten-

dencia bimodal, coincidiendo *a grosso modo* con los respectivos máximos en azufre. Las correlaciones *muestra a muestra* son pobres ($r^2 < 0,3$; coeficiente de correlación de Pearson = 0,49), lo que indica que otras variables están participando en el proceso sedimentario. No obstante, el análisis en su conjunto, a través de las líneas de tendencia polinomial mostradas, revelan que sí existe una sincronía general entre ambos parámetros (Figura 2). Los carbones más delgados del inicio de las condiciones paludales en Los Cuervos son los que manifiestan los mayores porcentajes de

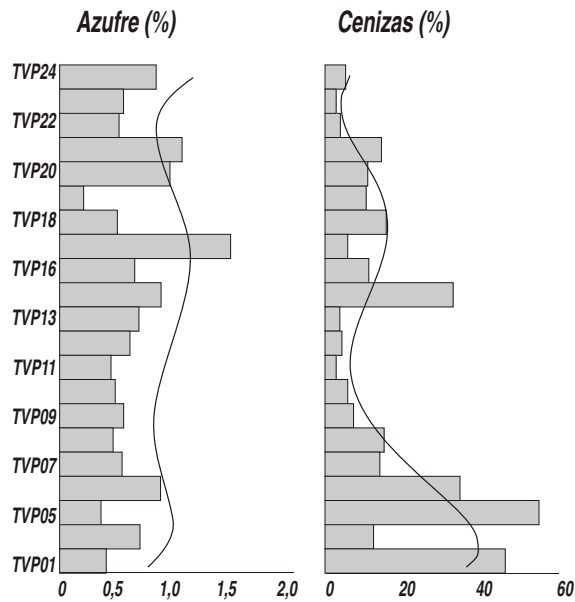


Figura 2. Variación vertical en la concentración de azufre y cenizas en los carbones analizados, en función de su posición en la columna

cenizas (>40%). Este parámetro disminuye rápidamente a valores entre 3 y 13% hacia el centro de la secuencia, donde se hallan los carbones con mayores espesores, para luego iniciar un aumento hacia el último tercio de la columna. Posteriormente, las cenizas declinan hasta valores menores a 5% en el tope de la unidad. La forma de ambas distribuciones sugiere que los dos eventos (bajo desarrollo vegetal en la marisma y/o alto aporte de clásticos, que controlan el contenido de cenizas, y la alta influencia marina, responsable de la presencia de azufre) están estrechamente relacionados.

Análisis estadístico

A fin de dar un soporte estadístico a los hallazgos antes indicados, se procedió a establecer un estudio de agrupamiento forzado [6] (“constrained clustering”) tomando como parámetros de comparación los análisis inmediatos, elementales, azufre y espesor de los mantos (Figura 3). El análisis “cluster” o de agrupamiento es una

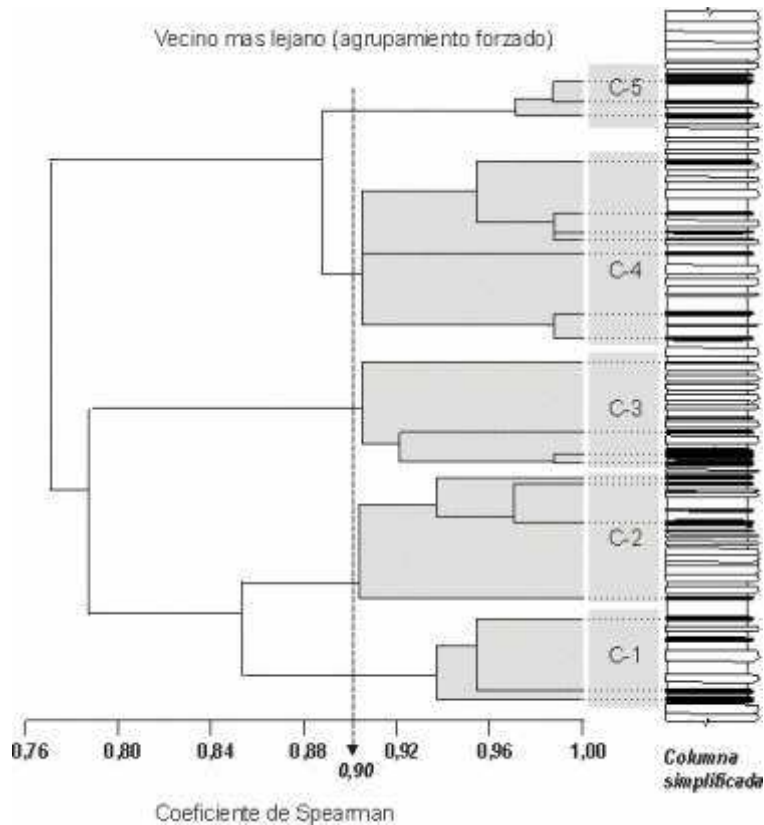


Figura 3. Análisis de agrupamiento forzado (“constrained clustering”) sobre los carbones estudiados, utilizando como variables los análisis inmediatos, elementales, azufre total y espesor de los mantos.

técnica estadística multivariada robusta, útil aún en distribuciones alejadas de la normalidad, por lo que es aplicable en el sistema bajo estudio; bajo la modalidad de agrupamiento forzado [6] es la mas adecuada en la situación planteada, pues cada muestra de carbón sólo puede compararse con su más cercana supra- o infrayacente. De esta manera se simplifica notablemente el dendrograma generado (Figura 3). Como se puede apreciar, los distintos carbones se agrupan en 4 asociaciones (denominadas como C-1, C-2, C-3 y C-4 en la Figura 3), tomando como punto de corte del dendrograma un coeficiente de Spearman (estimador no paramétrico de similitud entre muestras) de 0,90. Estas asociaciones se corresponden parcialmente con las sucesiones de litofacies, establecidas en el campo y por petrografía de las areniscas (Figura 4).

Secuencia de litofacies y definición de ciclos

El patrón sedimentológico de la unidad estudiada en la columna permite postular dos ciclos de acumulación de carbones (Figura 4). El ciclo I comienza en la base de la secuencia y se prolonga hasta aproximadamente 80 m medidos desde la base; se inicia con una secuencia esencialmente lutácea (**facies L1**), con escasos carbones sumamente delgados (<0,3 m), lenticulares en algunos casos, ricos en cenizas y con porcentajes de azufre total (bslc) entre 0,7 y 1,2%. Continúa un intervalo básicamente arenáceo, de aproximadamente 20 m de espesor (**facies A1**). Luego la secuencia pasa a una intercalación de areniscas limosas y limolitas (**facies AL1**) y hacia el tope se desarrollan varias capas de carbón, cercanas entre sí, con espesores entre 0,5 y 2,5 m,

OJO LA TABLA 2 NO ESTÁ MENCIONADA. NO SÉ SI VA AQUÍ OJO OJO OJO

Tabla 2

Comparación entre distribución de litofacies, asociación y características de los carbones, con los parámetros geoquímicos

Litofacies	Descripción	Asociación de los Carbones	Características de los carbones	Parámetros geoquímicos
L1	Secuencia lutácea con intercalaciones de areniscas y limolitas de espesor reducido; algunas lutitas son carbonosas	Esencialmente la asociación C-1; en el segundo ciclo corresponde con C-4	Pocos carbones lenticulares delgados (< 0.3 m)	Carbones ricos en cenizas (> 10%) y azufre (>1%).
A1	Secuencia dominada por areniscas con intercalaciones de limolitas delgadas, con presencia de canales, estructuras de corte y relleno. Algunas arenas amalgamadas.	No se corresponde con alguna asociación.	Inexistentes	-
AL1	Secuencia similar a A1 pero con mayor abundancia de limolitas y lutitas limosas, con bioturbación ocasional. Secuencia rítmica.	Se corresponde en forma parcial con C-2 ó C-3.	Inexistentes o esporádicos	-
C	Secuencia dominada por carbones y lutitas carbonosas. Presencia de estigmarias en la base.	La asociación C-5 queda totalmente incluida. El grupo C-3 se corresponde en menor grado.	Varios mantos de gran espesor, cercanos entre sí	Carbones bajos en cenizas (<6%) y azufre (< 0,7%)

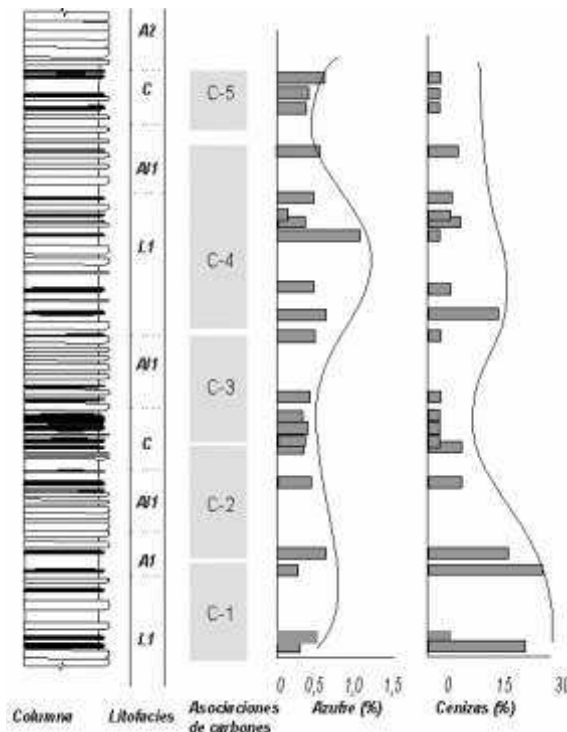


Figura 4. Correlación entre las litofacies sedimentarias y la variación vertical de azufre y cenizas (curvas de ajuste polinomial de grado 6) en los carbones de la Formación Los Cuervos en Villa Páez.

pobres en cenizas (<10%) y con tenores de azufre (bslc) entre 0,4 y 0,5% (**facies C**). Este ciclo se interpreta como la transición desde una llanura deltaica baja con desarrollo de marismas (facies L1) que evoluciona con el tiempo hacia un plano deltaico alto por efecto del proceso regresivo general (facies AL1 y AL2) y que logra albergar zonas paludales extensas y duraderas (facies C). El ciclo observado es regresivo; pero las condiciones que permiten el retroceso de la línea de costa no se mantienen constantes, pues la columna muestra nuevamente un conjunto litológico propio de llanura deltaica baja (ciclo II).

Los resultados obtenidos permiten aseverar que la Formación Los Cuervos muestra, en la localidad de Villa Páez, variaciones importantes en paleosalinidad, que concuerdan con las sucesiones de litofacies. En efecto, las oscilaciones en el tenor de azufre son amplias: el valor más alto detectado en los carbones bajo estudio alcanza 1,45%, lo que prácticamente triplica a los valores

más bajos registrados, del orden de 0,40%. Estas variaciones tan pronunciadas en una misma litología son controladas por la disponibilidad relativa de iones sulfato en la turbera que dio origen a los carbones.

Las variaciones detectadas corresponderían [7-10] a pulsos transgresivos-regresivos de tercer orden. Para corroborarlo, se requiere de un análisis espectral de los datos obtenidos.

Análisis espectral

Los ciclos de sedimentación identificados en la secuencia paleocena de Villa Páez pueden ser correlacionados con ciclos climáticos, como los derivados de los cambios en la órbita terrestre (excentricidad, precesión y oblicuidad) determinados por Milankovitch en 1941 e identificados en infinidad de secuencias estratigráficas a nivel mundial y en distintos períodos geológicos [10-14]. Otras interpretaciones para la ciclicidad observada en una secuencia han sido indicadas: tectonismo [15] o un conjunto de procesos simultáneos (clima, subsidencia de la plataforma, aporte sedimentario [16]).

El relativamente escaso número de carbones impide hacer uso de herramientas matemáticas de alta resolución cicloestratigráfica, como las Transformadas de Fourier, o las Transformadas continuas de Morlet [17]. Sin embargo, aun una herramienta menos sofisticada como la atenuación por ajuste polinomial de los datos de concentración de azufre, de cenizas, el espesor de los carbones y de las arenas, permite apreciar una ciclicidad evidente.

Como puede apreciarse en la Figura 5, los dos máximos en azufre en los carbones de la secuencia estudiada se hallan en desfase con los máximos correspondientes a los espesores de las arenas correspondientes. De igual manera, la distribución de la concentración de cenizas a lo largo del perfil genera un conjunto de máximos en fase con el parámetro azufre, pero en desfase con el espesor de las arenas.

Estos resultados permiten establecer un patrón cíclico en la sedimentación de la Formación Los Cuervos. A fin de corroborar y definir el patrón de ciclicidad presente en la unidad, se efectuó un análisis espectral sencillo, graficando los espesores individuales de los estratos de are-

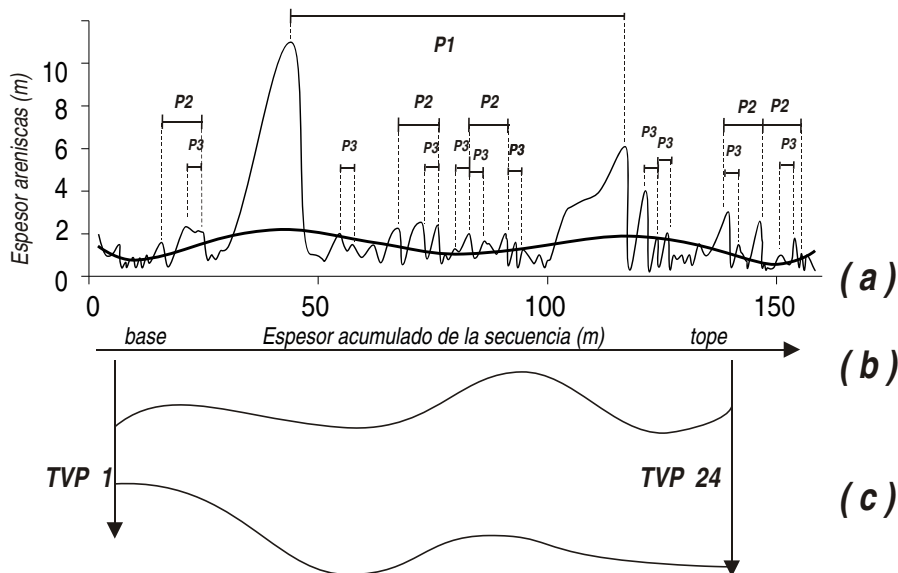


Figura 5. Patrón cíclico en la Formación Los Cuervos. (a) Patrón de variación en el espesor de las areniscas en la unidad estudiada. Se aprecia un gran ciclo de período aproximado 70-75 m (P1), un segundo ciclo de mayor frecuencia pero menor intensidad, con período aproximado 11 m (P2), y un ciclo menor, de período 5 m (P3).

nisca en función de su altura estratigráfica (Figura 5-a). El ajuste matemático en los valores, haciendo uso de un polinomio de orden 6 [12] permite distinguir claramente dos máximos, que corresponden a una longitud de onda de aproximadamente 70 m.

El método de ajuste polinomial de los datos posee la indudable ventaja de su sencillez de cálculo. Sin embargo, no permite la definición de órdenes de ciclicidad menores; por tanto, se llevó a cabo un análisis de Fourier (FFT, "Fast Fourier Transform") con los datos de espesor de las areniscas en la secuencia (Figura 6). Se presentan tres frecuencias significativas: la mayor a 72 m, una cada 11 m, y la más corta a aproximadamente 5 m.

El patrón cíclico en los tenores de azufre y cenizas de los carbones se ajusta tanto en frecuencia como en la posición de sus correspondientes máximos y mínimos, con el ciclo a 72 m. De igual manera, el patrón de sucesión de las litofacies en la secuencia se corresponde con este ciclo. El patrón cíclico de menor orden, de longitud de onda 11 m, parece corresponder con el tamaño promedio de las ciclotemas de la secuencia; sin embargo, su resolución no es tan clara como el ciclo de mayor orden. El ciclo de mayor

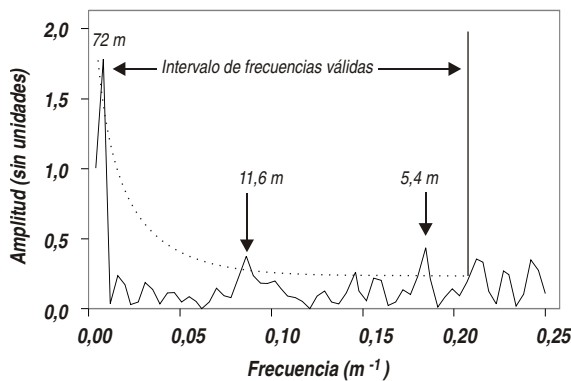


Figura 6. Análisis espectral de los valores de espesor de las areniscas, mediante Transformadas de Fourier (FFT).

frecuencia, de longitud aproximada 5 m, se interpreta como el reflejo de cambios climáticos rápidos.

Los pulsos de variación en el nivel del mar, determinados a partir de los indicadores geoquímicos y de litofacies pueden ser el producto de los cambios eustáticos de Milankovitch: el cociente entre los dos principales ciclos determinados (72 m/11m) proporciona un valor (asumiendo tasa de sedimentación constante) de 6,5, cercano

al valor de 6,8 propio de la relación entre los movimientos orbitales de excentricidad corta y de precesión (123 ka para el ciclo largo, de período 72 m; 18 ka para el ciclo corto de período 11 m). La tasa de sedimentación promedio para la Fm. Los Cuervos en el área de estudio oscilaría entre 58 y 61 cm/ka, por lo que se sugiere un valor promedio de 60 cm/ka, para la unidad estudiada. Este valor es cónsono con el estimado como tasa media en secuencias polilitológicas [14].

Intervalo de sedimentación de la unidad

Es necesario en este punto hacer una reflexión importante: se ha asumido que la Formación Los Cuervos se sedimentó durante el Paleoceno Superior (Thanetiense). El lapso de depositación del Thanetiense se estima en 2,9 Ma ($58,7 \pm 0,2$ a $55,8 \pm 0,2$ Ma [18]) lo que sugiere, con la tasa de sedimentación deducida en Los Cuervos, un espesor de secuencia mínima de 1740 m de columna. En la región de Villa Páez, la columna levantada no alcanza los 160 m; luego de una complicación estructural y de zonas cubiertas, aparecen las areniscas de Mirador. En las zonas donde la Formación Los Cuervos presenta mayores espesores (835 y 840 m en los ríos Cuite y La Línea, respectivamente, en Táchira sur-oriental), no alcanza ni la mitad del espesor predicho. Este hecho obliga a pensar en cuatro posibles direcciones:

1. La Formación Los Cuervos se halla parcialmente erosionada y/o su sedimentación contiene intervalos de no depositación ("completeness" [19]). Es muy probable que ambos hechos estén presentes en el registro actual, ya que por un lado la sedimentación de la Fm. Mirador trajo consigo remoción parcial de los sedimentos infrayacentes; por otro, en sistemas deltaicos como los atribuidos a la unidad, es muy probable la existencia de diastemas, hiatos y otros lapsos de no sedimentación, que explicarían la ausencia de una mayor cantidad de sedimentos.
2. La tasa de acumulación calculada es excesivamente baja. El valor obtenido en este trabajo es aproximadamente 1/3 de la tasa de acumulación actual del Delta del Manhakam (Borneo, 1,6 m/ka) [9]. Sin embargo, el efecto de la compactación de los sedi-

mentos puede llevar este valor a números cercanos al calculado. El aspecto más débil del cálculo es el haber asumido una tasa de acumulación constante, y posiblemente sea la mayor fuente de error.

3. Las asignaciones de los ciclos son sólo una inferencia, que requiere siempre de un control cronoestratigráfico que este trabajo no posee. Se está extrapolando hasta el Paleoceno una serie de relaciones entre los ciclos de Milankovitch, que fueron definidos y son válidos a partir del Mioceno. Este hecho genera un error por extrapolación a períodos más antiguos.
4. La ciclicidad observada puede no ser debida a forzamiento orbital tipo Milankovitch. Si éste fuera el caso, entonces no tiene sentido la tasa de acumulación calculada, pero deja abierta la interrogante acerca de qué otros procesos puedan generar el patrón cíclico observado.

Sin embargo, e independientemente de la magnitud e incertidumbre asociada a la tasa de sedimentación calculada, un conjunto de apreciaciones permiten postular controles climáticos sobre la ciclicidad sedimentaria: el espesor de las unidades (ciclotema básica, de 11 m de espesor), y su asociación en secuencias que determinan las litofacies identificadas, son consistentes con los ciclos de precesión orbital, en forma similar a la secuencia eocena de la Fm. Cayraz, en Turquía [20]. El ajuste con los ciclos orbitales soporta la hipótesis de un control climático y no tectónico en la secuencia estudiada. Ello no implica que existan factores tectónicos en juego, pero no son los responsables del patrón cíclico detectado.

Conclusiones

Se identificaron tres patrones de ciclicidad superpuestos, a partir de información geoquímica de los carbones, y de la sucesión de litofacies en la columna estratigráfica de la Formación Los Cuervos: un ciclo de orden mayor, que se repite cada 72 m y que coincide con la ciclicidad observada a partir del estudio de las litofacies, de los indicadores geoquímicos y del espesor en los carbones; un segundo patrón de ciclicidad, que se repite cada 11 m, y un ciclo menor, de frecuencia 5 m. Estos ciclos corresponden a fluctuaciones importantes en

el nivel del mar, ciclotemas en la secuencia y variaciones climáticas cortas, respectivamente. Los ciclos mayores concuerdan en magnitud y en relación de frecuencias con las oscilaciones de Milankovitch, correspondiendo a los movimientos orbitales de excentricidad corta (123 ka) y precesión (18 ka). Se infiere un valor de 60 cm/ka como tasa de acumulación promedio para la secuencia; este resultado es sumamente bajo y obliga a estudiar la unidad en otras localidades.

Agradecimiento

Este trabajo fue financiado por el Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico de la UCV, a través de los proyectos CDCH C-03.32.2274/1999 y C-03-32-4412-1999. Dos evaluadores anónimos contribuyeron notablemente a mejorar el manuscrito.

Referencias Bibliográficas

- González de Juana, C., Iturralde de A., J., Picard, X.: "Geología de Venezuela y sus cuencas petrolíferas": Caracas, Ediciones Foninves, 1980.
- Márquez, X., Mederos, S.: "Areniscas deltaiacas del Grupo Orocué: Potenciales yacimientos petrolíferos": Barquisimeto, Memorias del VII Congreso Geológico Venezolano, vol. II, pp. 773-793, 1989.
- Swaine, D.: "Trace elements in coal": London, Butterworth & Co. (publishers) LTD, First Edition. 178 p., 1990.
- Berner, A., "Sedimentary pyrite formation: An update". *Geochim. Cosmochim. Acta* 48 (1983), 605-615.
- Fielding, C.: "Coal depositional models and the distinction between alluvial and delta plain environments": *Sedimentary Geology*, vol. 42 (1985), 41-48.
- Gill, D., Shomrony, A., and Fligelman, H. "Numerical zonation of Log suites and Log facies recognition by multivariate clustering". *AAPG Bull.* vol. 77 (1993), 1781-1791.
- Huc, A.: "Stratigraphic control on source rock distribution". Guest speaker in oral session of the 6^o Latin American Congress on Organic Geochemistry, October 18-21, 1998, Margarita Island, Venezuela.
- Haq, B., Hardenbol, J., Vail, P.: "Chronology of Fluctuating sea levels since the Triassic". *Science*, vol. 235 (1987), 1156-1166.
- Miall, A.: "Principles of Sedimentary Basin Analysis". 2nd. Edition. Springer Verlag, New York, 668 p., 1990.
- Milankovitch, M.: "Kanon der erdbestrahlung und seine Anwendung auf das Eiszeitproblem". *Serbian Academy of Science*, vol 133, 633 p., 1941.
- Bellanca, A., Claps, M., Erba, E., Masetti, D.: "Orbitally induced limestone/marlstone rhythms in the Albian-Cenomanian Cismon section northern Italy): sedimentology, calcareous and siliceous plankton, elemental and isotope geochemistry". *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, vol. 126 (1996), 227-260.
- Juhász, E., Kovács, L., Müller, P., Tóth-Makk, A.: "Climatically driven sedimentary cycles in the late Miocene sediments of the Pannonian Basin, Hungary". *Tectonophysics*, vol. 282 (1997), 257-276.
- Niebuhr, B., Prokoph, A.: "Periodic-cyclic and chaotic successions of Upper Cretaceous (Cenomanian to Campanian) pelagic sediments in the North German Basin". *Cretaceous Research*, vol. 18 (1997), 731-750.
- Prokoph, A., Agterberg, F.: "Detection of sedimentary cyclicity by wavelet analysis: an application to late Albian Cyclostratigraphy of the Western Canada Sedimentary Basin". *Journal of Sedimentary Research*, vol. 69 (1999), 862-875.
- Jones, N., Fyfe, J., Sewell, R., Lai, K.: "Devonian fluviodeltaic sedimentation in Hong Kong". *Journal of Asian Earth Sciences*, vol. 15 (1997), 533-545.
- Yang, W.: "Cycle symmetry and its causes, Cisco Group (Virgilian and Wolfcampian), Texas". *Journal of Sedimentary Research*, vol. 66 (1996), 1102-1121.
- Morlet, J., Arehs, G., Fourgeau, I., Giard, D.: "Wave propagation and sample theory." *Geophysics*, vol. 47 (1982), 203.
- International Union of Geological Sciences "International Stratigraphic Chart". Compiled by Jürgen Remane (2000).

-
19. Sadler, P. "Sediment accumulation rates and the completeness of stratigraphic sections". *Journal of Geology* vol 89 (1981), 569-584.
 20. Ciner, A., Deynoux, M., Ricou, S.: "Cyclicality in the Middle Eocene Cayraz Carbonate Formation, Haymana Basin, Central Anatolia, Turkey". *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, vol. 121 (1996), 313-329.

Recibido el 31 de Mayo de 2004

En forma revisada el 11 de Julio de 2005